А. Ш. ГОТМАН

Г738

М-1298/002

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБВОДОВ СУДОВ С РАЗВЕРТЫВАЮЩЕЙСЯ ОБШИВКОЙ

ЛЕНИНГРАД
«СУДОСТРОЕНИЕ»
1979

БИБЛИОТЕКА
Новосибирского института
инженеров водного транспорта

Г73
УДК 629.12.011.1.001.2

Научный редактор
инж. А. А. БОГДАНОВ

Рецензенты:
докт. техн. наук проф. В. В. АШИК, инж. М. Н. РЕЙНОВ

Готман А. Ш. Проектирование обводов судов с развертывающейся обшивкой.— Л.: Судостроение, 1979. 192 с.

В книге впервые систематизированы методы проектирования обводов судов с развертывающейся наружной обшивкой и методы аппроксимации обычных судовых обводов развертывающимися поверхностями. Изложен новый метод проектирования хорошо обтекаемых судовых обводов из развертывающихся поверхностей. Кроме графического способа построения теоретического чертежа приведены алгоритмы для согласования обводов, расчетов плавучести, остойчивости и сопротивления воды судов с развертывающейся обшивкой на ЭВМ. Впервые показан аналитический метод и алгоритм построения точной развертки наружной обшивки на ЭВМ.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников проектных организаций, вычислительных центров и технологов судостроительных предприятий и институтов.

АДА ШОЛОМОВНА ГОТМАН

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБВОДОВ СУДОВ С РАЗВЕРТЫВАЮЩЕЙСЯ ОБШИВКОЙ

Редактор М. П. Александрова. Художественный редактор В. А. Пурицкий. Технические редакторы Р. К. Чистякова и А. П. Ширяева. Корректор Е. П. Смирнова. Обложка художника Б. Н. Осенчакова.

ИБ № 47

Сдано в набор 12.03.79. Подписано в печать 02.07.79. М-26346. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 12,0. Уч.-изд. л. 12,0. Тираж 1100 экз. Изд. № 3273—76. Заказ 148. Цена 75 коп.

Издательство «Судостроение», 191065, Ленинград, Д-65, ул. Гоголя, 8.

Ленинградская типография № 8 ЛПО «Техническая книга» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.

Г $\frac{31805-044}{048(01)-79}$ БЗ-36-11-79 3605030000

© Издательство «Судостроение», 1979 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Методы проектирования обводов судов с развертывающейся наружной обшивкой и методы аппроксимации обычных судовых обводов развертывающимися поверхностями применяют для снижения трудоемкости и сокращения сроков постройки корпуса судна. Однако упрощения в форме обводов чаще всего приводят к потере гидродинамического качества, и поэтому они допустимы только в тех случаях, когда ходкость не является решающим фактором при разработке проекта судна.

Исследование развертывающихся поверхностей показало, что участки конечных размеров имеют более разнообразные конфигурации, чем выявленные при изучении в бесконечно малом цилиндрические, конические и формы с ребром возврата. Получены решения, позволившие разработать принципиально новые методы проектирования обводов судов из развертывающихся поверхностей без потери гидродинамического качества.

Для выполнения согласования обводов и расчета плазовых ординат на ЭВМ разработана математическая модель судна, поверхность которого образуется из произвольного сочетания развертывающихся и неразвертывающихся поверхностей. С целью исследования влияния кривизны судовой поверхности разработаны практические методы сравнительной оценки на ЭВМ сопротивления судна на базе теории волнового сопротивления Мичелля и интегрального соотношения Кармана. В книге приведены решения, позволяющие проследить, за счет каких изменений формы обводов можно снизить сопротивление воды.

Получено точное аналитическое решение для построения развертки наружной обшивки корпусов из развертывающихся поверхностей, что позволяет одновременно с плазовыми ординатами рассчитать на ЭВМ координаты соответствующих точек на развертке.

В книге изложены результаты экспериментальных исследований ходовых качеств судов с РО* и дано их сравнение с обычными и упрощенными обводами. Подробно описаны алгоритмы согласования обводов с РО, расчетов плавучести, остойчивости, сопротивления и ординат развертки наружной обшивки на ЭВМ.

Автор пользуется возможностью выразить глубокую благодарность за многолетнюю поддержку и помощь в работе М. Я. Алферьеву, главному конструктору ТУ МРФ А. П. Богданову, профессору А. М. Басину, доценту Л. М. Витаверу.

* Вместо слов «обводы из развертывающихся поверхностей» и «суда с развертывающейся наружной обшивкой» вводится сокращение «суда с РО».

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УПРОЩЕННЫХ ОБВОДОВ СУДОВ С РО

§ 1

Особенности хорошо обтекаемых, скуловых и упрощенных обводов

В форме обводов корпуса, как в фокусе, сосредоточены решения многочисленных и сложных задач, связанных с обеспечением вместимости, остойчивости, непотопляемости и ходовых качеств судна. Технологические требования обычно учитывают при разработке конструкции корпуса применительно к выбранной форме. Вопрос о том, в какой мере допустимы изменения обводов с целью повышения технологичности конструкции корпуса, очень сложен. Основное противоречие возникает при стремлении обеспечить за счет обводов максимальную технологичность конструкции таким образом, чтобы не ухудшить ходовые качества судна. Технологические требования в этом случае предъявляются к геометрии судовой поверхности. И если технологи естественно стремятся к прямым линиям, то инженер-гидромеханик, учитывая особенности сопротивления воды, всегда будет предпочитать лекальные обводы. Следовательно, для оптимального решения этой задачи проектировщику необходимо хорошо знать геометрические свойства судовой поверхности, чтобы по сечениям теоретического чертежа оценить трудности изготовления корпуса.

Обычно к вычерчиванию теоретического чертежа приступают, зная объем подводной части, главные размерения, высоту надводного борта в носу, в корме и на миделе, коэффициенты формы и имея строевую по шпангоутам. Для выбора всех этих характеристик служит теория проектирования судов.

При вычерчивании теоретического чертежа для выбора формы сечений в носу, в корме и на миделе необходимо использовать весь опыт проектирования обводов каждого типа судна, нашедший отражение в литературе по теории корабля и сопротивлению воды движению судов [10, 13, 46, 66].

Рассматривая влияние различных параметров формы на величину волнового и остаточного сопротивления, следует, очевидно, проанализировать возможность отказа от хорошо обтекаемых обводов. Например, для судов, относительная скорость которых соответствует числам Фруда от 0,13 до 0,15, когда волнообразование почти отсутствует, были исследованы различные формы корпуса несамоходной речной баржи в Одесском

опытовом бассейне [22]. Испытания показали, что хорошо обтекаемые обводы имеют сопротивление на 30% меньше, чем плоскодонные с прямыми бортами. Такие же результаты были получены в Гамбургском опытовом бассейне [10]. В этом случае нет смысла отказываться от хорошо обтекаемых обводов.

Но даже если не делать очень грубых упрощений форм обводов, а просто менять тип обводов, то и тогда изменение сопротивления значительно. Приведенные ниже результаты опытов позволяют оценить диапазон влияния на ходовые качества судна различных изменений в форме обводов.

При исследованиях различных форм корпуса рыболовных траулеров Н. К. Кен [29] нашел, что майеровская и цилиндрическая формы носовой оконечности дают снижение сопротивления по сравнению с обычными на 20—25%. Значительное влияние на сопротивление оказывают бульбовые образования [13]. Удачно спроектированные бульбовые обводы дают снижение полного сопротивления на 15—18%. Испытания моделей речных пассажирских судов, проведенные в опытовом бассейне [34], показали, что даже подрезание носовой оконечности может уменьшить сопротивление на 5%. Примерно таково же влияние на полное сопротивление бульбообразной кормы [23].

Исследуя модели быстроходных грузовых судов, Линдблад [88] обнаружил, что разница в сопротивлении у моделей с U-образными и V-образными шпангоутами составляет 5%. При испытании моделей судов внутреннего плавания Конинг [10] выяснил, что эта разница может достигать 10%.

Испытания моделей каботажных судов, выполненные Тоддом в Кардерокском бассейне [96], показали, что одновременное изменение формы шпангоутов и вогнутости ватерлиний позволяет снизить сопротивление на 20%.

При увеличении относительной скорости движения до $Fr = 0{,}6$ влияние формы обводов еще значительнее. Связано это с тем, что при большой скорости меняется посадка судна в ходу и происходит перераспределение гидродинамических давлений.

Для выявления влияния формы шпангоутов на величину остаточного сопротивления была спроектирована серия моделей быстроходного катамарана для местных линий ($Fr = 0{,}63$) таким образом, что все основные параметры, кроме формы диаметрального батокса, были сохранены, а шпангоуты менялись от треугольных до прямостенных через вогнутые и эллипсоидальные. Испытания показали, что разница в сопротивлении составляет 6,5%, в то время как вариации продольных сечений этих же моделей приводят к изменению сопротивления в пределах 10%. Следовательно, форма поперечных сечений влияет на величину сопротивления воды движению судна несколько меньше, чем форма продольных сечений, но все же не в такой мере, чтобы этим влиянием можно было пренебречь.

На основании опыта эксплуатации и экспериментального изучения судовых обводов можно с уверенностью утверждать, что для достижения высокого гидродинамического качества обводы должны быть хорошо обтекаемыми, не иметь поперечных сломов, щелей и острых кромок на пути обтекающего потока.

Упрощенные обводы имеют свою историю. Начало ее можно отнести ко времени первой мировой войны, когда впервые начали переходить к массовой постройке судна. Упрощения корпусов делались с целью стандартизации типов судов [35]. Первые предложения принадлежат проф. Лиенау и Рамаджу. Их предложения относились к уничтожению седловатости, удлинению цилиндрической вставки, замене криволинейных шпангоутов ломаными, ватерлиний — прямыми. По таким принципам строили суда в Англии, в Германии, в США.

Во время второй мировой войны необходимость в срочном увеличении тоннажа флота также привела к постройке судов с упрощенными обводами. В 1942 г. в Ленинграде были построены баржи грузоподъемностью 400 т, корпус которых состоял из плоскостных секций [57]. Линия палубы у этих барж была сломана в трех точках, а оконечности каждого борта образованы тремя наклонными плоскостями. Такого же типа морская баржа грузоподъемностью 1000 т была построена в Ленинграде в 1945 г. Были спроектированы и построены баржи, у которых борта подходили к днищу под прямым углом. Палуба имела один перелом, а оконечности образованы лишь двумя плоскостями.

Исследования гидродинамического качества всех видов упрощенных обводов проводились Цейссом в Гамбурге в 1920—1922 гг.

В СССР изучением влияния различных упрощений формы обводов на сопротивление занимались проф. В. В. Семенов-Тян-Шанский, Н. А. Крысов, проф. А. Б. Карпов, А. А. Брайловский, Б. В. Богданов и др. [7, 8, 55]. В результате испытаний выяснилось, что плоскостные обводы имеют сопротивление на 16—17% большее, чем обычные.

Неуклонное стремление к стандартизации и унификации при постройке корпуса снова и снова привлекает внимание судостроителей к упрощенным формам обводов. Упрощать формы обводов можно двумя путями. Первый путь — это применение прямых шпангоутов, второй — развертывающейся или плоской наружной обшивки. Если шпангоуты состоят из ветвей прямых линий (рис. 1), то обшивка приобретает форму винтовой поверхности, которая не получается из листового материала простым изгибанием. Выигрыш при постройке такого корпуса невелик, а обводы значительно искажаются. Второй вид упрощений относится к наружной обшивке корпуса, а шпангоуты остаются

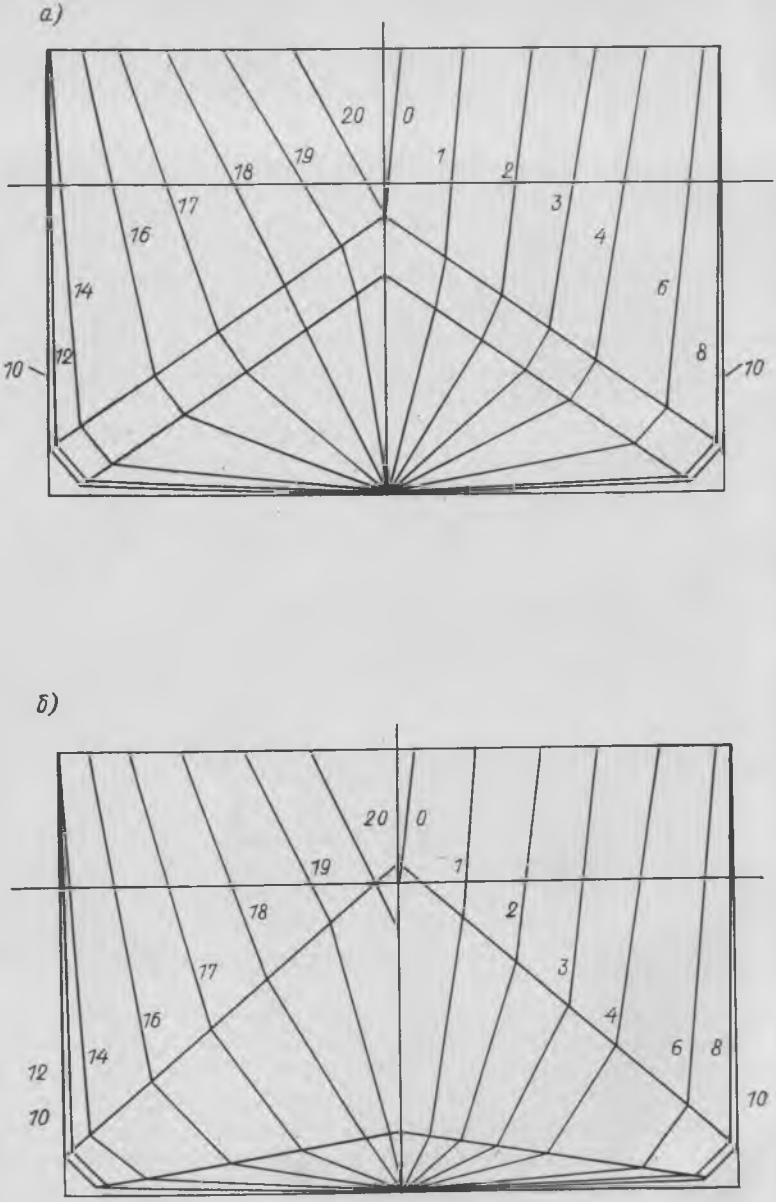

Рис. 1. Обводы судов с прямолинейными шпангоутами: *а* — линии слома расположены в параллельных плоскостях; *б* — одна из двух линий слома приближена к днищу.

криволинейными. Технологический выигрыш при этом тоже небольшой.

Получить максимальные упрощения при постройке корпуса можно только при плоскостных обводах. Видимо, эти соображения и привели к постройке в ФРГ судов модульной конструкции типа «Пионер». Обводы этого типа судов получают в результате аппроксимации обычных обводов плоскими участками, причем пытаются доказать, что пора отказаться от плавных линий и искать хорошие формы среди плоскостных комбинаций. С этим трудно согласиться.

Большое внимание упрощенным формам обводов было уделено акад. Г. Е. Павленко, подробно рассмотревшим различные виды упрощений формы шпангоутов [46]. Основная идея Г. Е. Павленко заключается в том, что продольные сломы, расположенные по линии тока, не вредят обтеканию и не увеличивают сопротивления. Путем теоретических и экспериментальных исследований его последователи искали пути определения линий тока. Результаты этих исследований применимы только для тихоходных судов.

Понятие «упрощенные обводы» все расширяется. Раньше к упрощенным относили только обводы с прямолинейными шпангоутами (рис. 2). Если вводились некоторые скругления сломов, то обводы называли «комбинированными». За последние два-три десятилетия появились «упрощенные обводы» конические, гидроконические, обводы из развертывающихся поверхностей с ребром возврата.

Накоплен не только опыт проектирования, но и опыт постройки судов, имеющих обводы только из плоскостей, только из конических, только из цилиндрических и только из поверхностей с ребром возврата. Однако все эти обводы отличаются от обычных наличием либо острых, либо скругленных продольных сломов. При проектировании упрощенных обводов независимо от того, что подвергается упрощениям (шпангоуты или обшивка), форма обязательно искажается введением острой скулы. Важным является вопрос о форме и протяженности этой скулы (рис. 3). Как уже отмечалось, наиболее полные исследования формы скулы, близкой к линии тока, проводил Г. Е. Павленко. Для доволновых режимов указан очень простой и убедительный принцип: форму нужно делать осесимметричной, причем ось выбирается как пересечение диаметральной плоскости с конструктивной ватерлинией (рис. 4). Этот вывод получен в результате анализа двух крайних форм «утюг» и «сани» (рис. 5), обладающих повышенным сопротивлением. Промежуточные формы получены в виде обводов с двумя или четырьмя острыми продольными кромками. Они имеют наименьшее сопротивление среди упрощенных форм.

При проектировании упрощенных обводов судов с развертывающейся наружной обшивкой форма корпуса получается

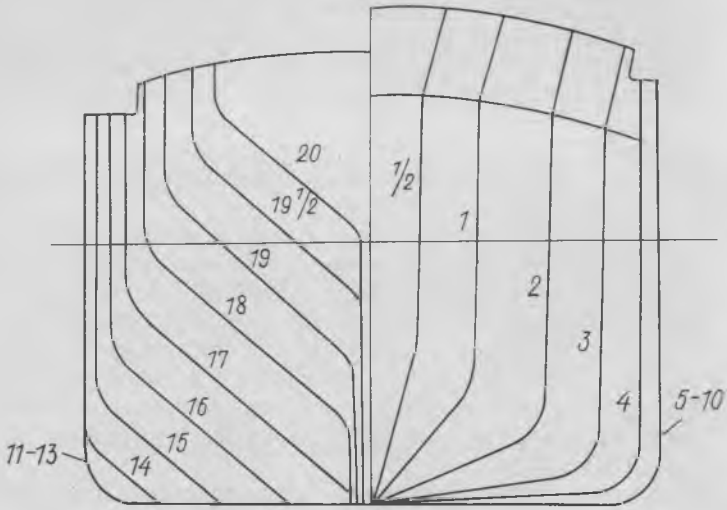

Рис. 2. Упрощенные обводы с частично развертывающейся наружной обшивкой.

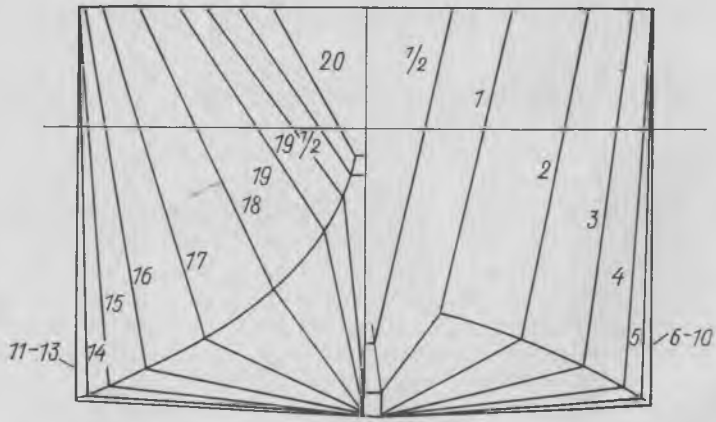

Рис. 3. Упрощенные обводы судна с острой скулой.

с острой кромкой в том случае, когда добиваются, чтобы наружная обшивка была полностью развертывающейся. Это можно сделать у любого глиссирующего или полуглиссирующего катера,

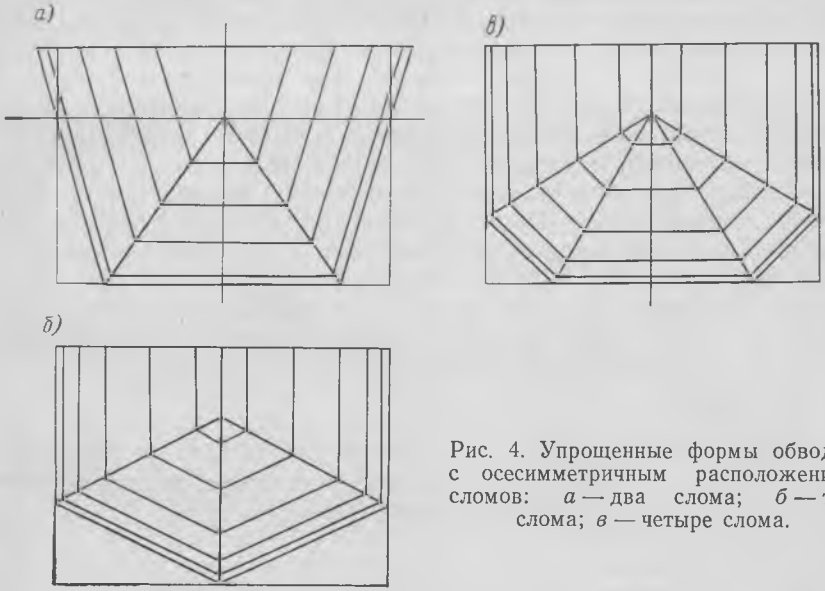

Рис. 4. Упрощенные формы обводов с осесимметричным расположением сломов: *а* — два слома; *б* — три слома; *в* — четыре слома.

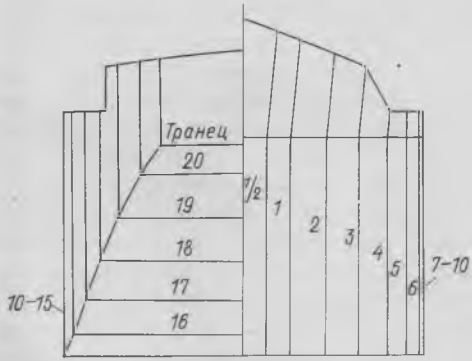

Рис. 5. Упрощенные обводы с носовой оконечностью в виде утюга и с санной кормой.

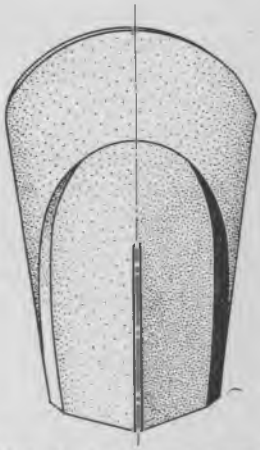

Рис. 6. Гидроконические обводы.

так как они и в обычном варианте имеют острую скулу. Проектирование обводов катеров из развертывающихся поверхностей получило широкое распространение давно.

Остроскуловые обводы небольших морских судов из развертывающихся конических поверхностей проектировали в Англии в начале 1960-х гг. [81]. В Германии в это же время были спроектированы гидроконические обводы (рис. 6) из сочетания цилиндрических и плоских поверхностей с двумя острыми сломами по всей длине корпуса [70, 83].

Поверхности с ребром возврата для проектирования обводов применил В. А. Вопилкин. Острая продольная кромка была оставлена им только в миделевой части. Оконечности остались плавными, хотя и развертывающимися.

Наибольшая протяженность острых кромок допущена у плоскостных судов типа «Пионер». Кроме двух продольных кромок, одна из которых расположена в горизонтальной плоскости, а вторая в вертикальной, имеются еще поперечные сломы на кормовых шпангоутах. Исследования показали, что наличие сломов может не привести к увеличению сопротивления в том случае, когда углы сломов больше 150° [14].

§ 2

Методы проектирования остроскуловых обводов судов с РО

Все существующие методы проектирования обводов судов из развертывающихся поверхностей зависят от вида выбранной для этой цели поверхности и от графического метода ее построения на теоретическом чертеже. Самые простые развертывающиеся поверхности — это плоскость и цилиндрические поверхности. Они образуются путем поступательного перемещения прямолинейной образующей по прямой или криволинейной направляющей. На теоретическом чертеже плоские участки выглядят очень просто: шпангоуты, батоксы и ватерлинии представляют собой параллельные прямые, расположенные на равных расстояниях.

В 50-е годы тщательно исследовались гидроконические обводы (рис. 6), состоящие из плоскостей, конических и цилиндрических поверхностей. Вершина конической поверхности, образующей носовую часть корпуса, расположена на линии киля. На корпусе имеются два продольных скуловых слома.

Вычерчивание гидроконических обводов на теоретическом чертеже не представляет трудностей, так как расположение прямолинейных образующих известно. Изменяя форму скулы в носовой и кормовой оконечностях, можно изменять форму действующей ватерлинии и наклон поверхности в районе подтока воды к винтам. Гидроконические обводы резко отличаются от обычных хорошо обтекаемых и даже остроскуловых обводов. Однако это их отличие, по данным модельных и натурных испытаний, не ухудшило мореходные качества судна. Полный нос

при конической форме обводов оказался хорошо обтекаемым и обладающим хорошей всхожестью на волну. Подток воды к винтам при широкой корме и соответствующей килеватости также оказался достаточным. Кроме того, у гидроконических обводов при качке винты почти не выходят из воды.

Большой обзор всех построенных и эксплуатируемых в разных странах судов с гидроконической формой корпуса приводится в работах [83, 86]. Морские буксиры мощностью 160 л. с. строили в 1954 г., а после их успешной эксплуатации строили буксиры мощностью 300 л. с. для американской нефтяной компании. Тщательное обследование обводов этих судов показало, что они имеют такое же буксировочное сопротивление, как и буксиры с обычными обводами, но при этом коэффициент общей полноты у них $\delta = 0{,}59$ вместо 0,492 для обычных.

Конические обводы применяют при проектировании небольших катеров, морских буксиров, траулеров, яхт и других судов. Для проектирования обводов из конических поверхностей требуются специальные методы построения. В отечественной литературе [19, 53] приведено описание метода вычерчивания теоретического чертежа с наружной обшивкой из конических поверхностей.

На рис. 7 показано положение образующих на днище моторной лодки. Из рисунка видно, что форма поверхности днища определяется положением вершины A и формой скуловой линии. Положение вершины рекомендуется брать в точке, расположенной на 20% длины корпуса от носового перпендикуляра. На полушироте расстояние вершины от ДП примерно равно ширине лодки на скуле, а на боку под скулой — на расстоянии от нее, равном 10—15% длины корпуса. Перемещением вершины вниз, вбок и немного вперед можно менять полноту обводов.

После определения главных размерений судна теоретический чертеж разрабатывают в следующей последовательности: 1) наносят линию скулы на проекциях «бок» и «полуширота»; 2) выбирают положение вершины конуса A на перпендикуляре к основной плоскости и к *ДП*.

На рис. 7 на примере определения точек P и N можно проследить последовательность построения искомой линии диаметрального батокса. К любой точке Q (или M), взятой на скуле в виде проекций Q, $Q'(M, M')$, проводим прямолинейную образующую с проекциями AQ, $A'Q'$ (или AM, $A'M'$). Там, где проекция AQ пересекается с ДП на «полушироте», находится проекция точки P, принадлежащей ДП. Определяя ее проекцию P' на $A'Q'$, получаем точку, принадлежащую ДП, на проекции «бок». Аналогично определяем точку N, а также другие точки диаметрального батокса.

Построение борта показано на рис. 8. Линия скулы считается заданной еще при проектировании днища. Линию борта наносят на проекции «бок». Вершину конуса выбирают на

небольшом расстоянии впереди носового перпендикуляра. Если необходимо получить завал борта в корме, проекция вершины на «полуширотe» должна быть расположена на линии, проведенной параллельно ДП из точки пересечения скулы с транцем. На чертеже показано построение бортовой поверхности, состоящей из двух конических. Для плавности перехода необходимо

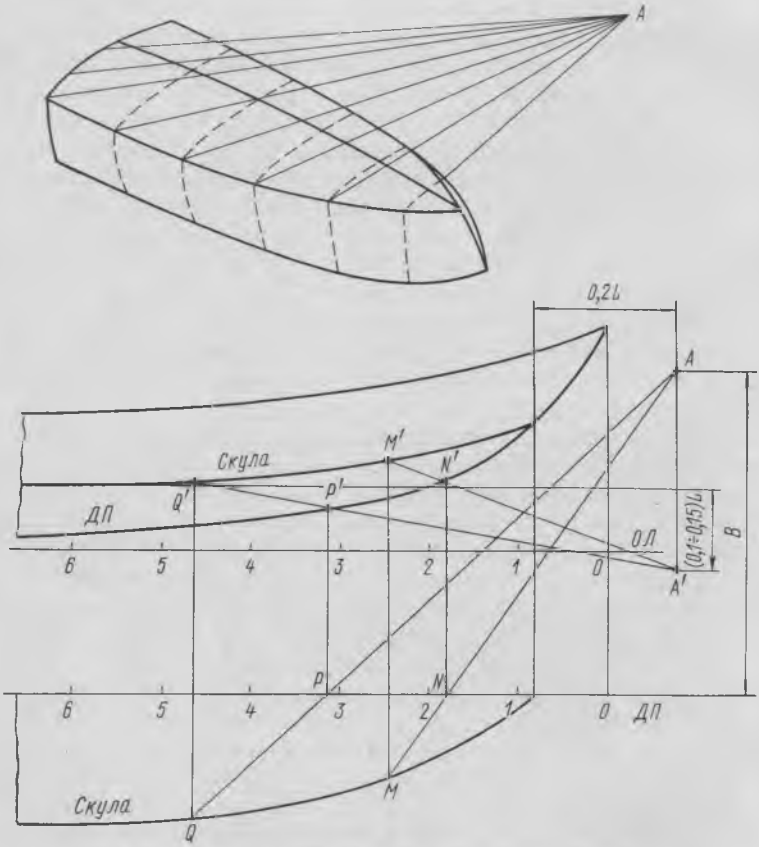

Рис. 7. Конические обводы. Построение днища.

выбирать положение вершины второй конической поверхности *K* на крайней образующей первой поверхности. Расстояние между вершинами *K* и *M* следует выбирать таким, чтобы получить желаемую форму закругления бортовой линии на проекции «полуширота».

Для определения горизонтальной проекции точек линии борта через точку *B'* на проекции «бок» проводят из вершины образующую до пересечения со скулой в точке *A'*. Определяют горизонтальную проекцию точки *A* на линии скулы на «полу-

широте» и строят горизонтальную проекцию прямолинейной образующей *AM*. Опуская перпендикуляр из точки *B′* до пересечения с *AM*, получают горизонтальную проекцию точки *B*. Точно таким же путем находят остальные точки бортовой линии. Проекцию «корпус» получают после построения «бока» и «полушироты».

Аналогичный способ построения использован английскими кораблестроителями [81] для проектирования так называемых

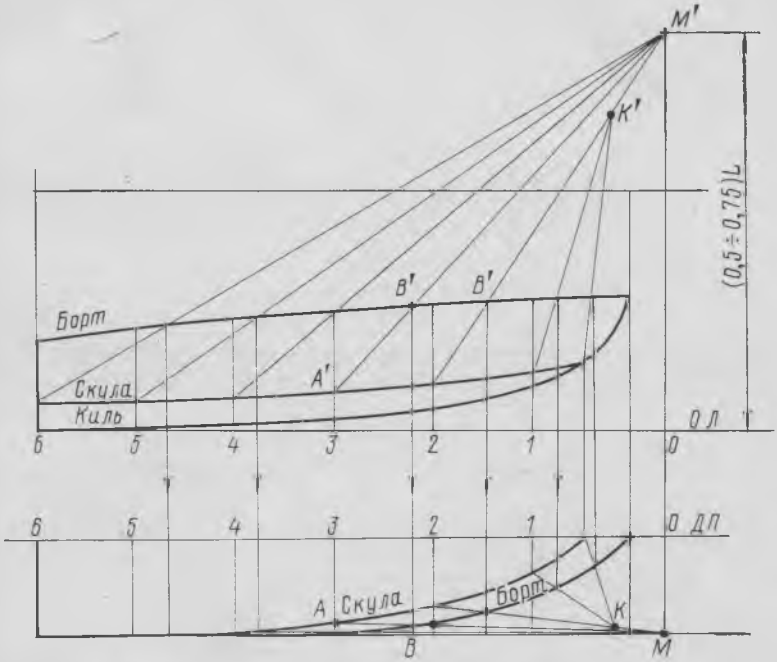

Рис. 8. Конические обводы. Построение борта.

конических обводов. Особенность английского метода заключается в том, что проектирование выполняют из сочетания нескольких конических поверхностей. Как показано на рис. 9, участок, ограниченный линией *ABCDD′C′B′A′* представляет собой сочетание четырех конических поверхностей. Корабельные инженеры Бьюнесс и Корлет спроектировали более 200 судов с коническими обводами.

Оригинальный метод проектирования обводов из поверхностей с ребром возврата был предложен Г. Е. Павленко [45].

Прежде чем приступить к ознакомлению с методом Г. Е. Павленко, необходимо представить себе развертывающиеся поверхности с ребром возврата. На рис. 10 видно, как можно из двух бумажных «воротничков» получить двухполостную

поверхность с ребром возврата. Это линейчатая поверхность, все прямолинейные образующие которой являются касательными к пространственной кривой MN, называемой ребром возврата.

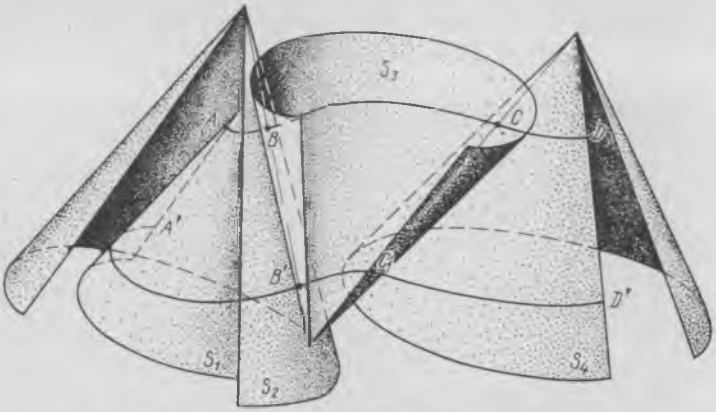

Рис. 9. Сочетание конических поверхностей.

В неразвернутом состоянии ребро возврата — это плоская кривая (левая часть рисунка), если же «воротнички» раздвинуть

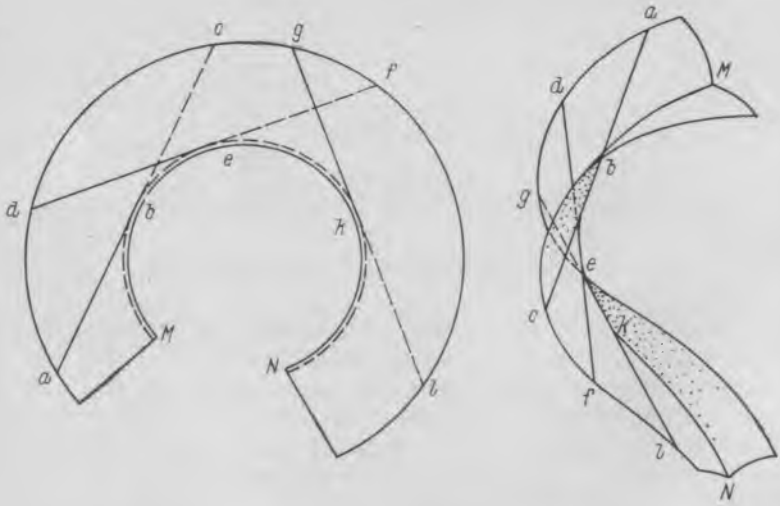

Рис. 10. Образование поверхностей с ребром возврата.

и деформировать, то получаются две полости (правая часть рисунка). В процессе изгибания ребро возврата меняет форму, а прямолинейные образующие перемещаются по поверхности.

В работе [45] дано построение развертывающейся поверхности, натягиваемой на две пространственные кривые. Это построение показано на рис. 11. Оно значительно сложнее предыдущих способов и выполняется в следующей последовательности.

1. На профильной плоскости проекций находят следы касательных, проведенных к кривой AB. Эти следы соединяют плавной кривой mn. Повторяют это же построение для кривой CD и находят вторую кривую kl. Касательные, проведенные из точки пересечения mn и kl, дают на кривых соответствующие

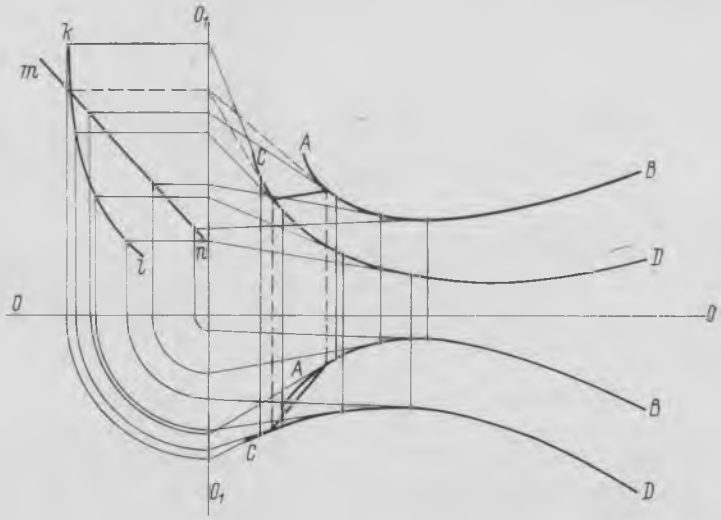

Рис. 11. Построение прямолинейных образующих развертывающейся поверхности по двум заданным пространственным кривым.

точки, через которые проходит характеристика. Для получения следующей характеристики следует отодвинуть или придвинуть профильную плоскость.

2. В тех местах, где такое построение перестает быть возможным, развертывающаяся поверхность вырождается в плоскость.

3. Прямолинейным участкам заданных кривых соответствуют плоские площадки в форме треугольников или трапеций.

Сравнение данного метода построения с теми, которые будут изложены далее, покажет, что это самый трудоемкий и громоздкий из всех методов построения обводов судов из развертывающихся поверхностей. Связано это обстоятельство с тем, что из всех развертывающихся поверхностей здесь используются преимущественно поверхности с ребром возврата.

Характерная форма судовых обводов из поверхностей с ребром возврата приведена на рис. 12. При создании этой формы

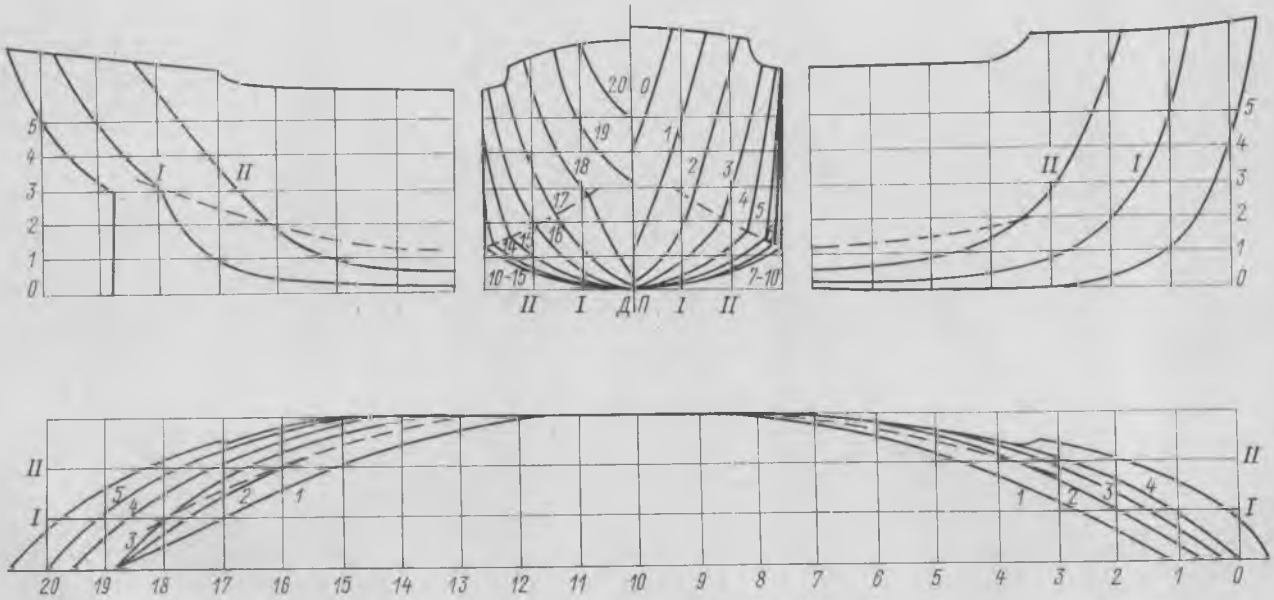

Рис. 12. Обводы судна из поверхностей с ребром возврата.

обводов в основу положено предположение о том, что обтекание происходит в продольном направлении и поперечные составляющие относительных скоростей воды сравнительно невелики. В работе [45] приведены данные, полученные в результате систематических испытаний барж с различными формами продольных сломов. Совпадение слома с линией тока — необходимое условие при проектировании упрощенных форм обводов. Предполагается, что угловые кромки судов упрощенных форм способствуют уменьшению качки на волнении, действуя подобно скуловым килям. Но несмотря на то, что существуют экспериментальные и теоретические методы определения направлений линий тока в зависимости от скорости хода, широкого распространения упрощенные обводы такого типа не получили.

Основой для проектирования обводов из поверхностей с ребром возврата являются теоретический метод определения линий тока, который приведен в работе В. А. Кронберга, и результаты экспериментального исследования на установке ЭГДА, выполненного в последующие годы В. Е. Пятецким [49, 50]. Для экспериментального исследования были использованы упрощенные формы, разработанные для обводов речных судов типа «Чайка», СТ-601, «Запорожье» и теплохода «Байкал».

Обычные и упрощенные обводы теплохода «Байкал» показаны на рис. 13, а графики буксировочного сопротивления для моделей этого судна показаны на рис. 14. На основании результатов многочисленных буксировочных испытаний моделей упрощенных обводов В. Е. Пятецким сделан вывод о том, что спроектированные упрощенные формы обводов корпуса судов при движении их в условиях ограниченного фарватера в гидродинамическом отношении практически не уступают обычным. В. Е. Пятецкий отмечает, что при одной и той же скорости хода и при прочих равных условиях даже есть выигрыш в сопротивлении воды упрощенных форм по сравнению с однотипными судами с обычной формой обводов при движении в условиях ограниченного фарватера. Этот выигрыш он оценивает в пределах от 5% до 12% на доволновых режимах движения. Естественно, что в волновом режиме появляется дифферент, который приводит к резкому увеличению сопротивления воды. Если продольная острая кромка вызывает отрыв пограничного слоя, то работа, затраченная на преодоление сопротивления формы такого тела, переходит в кинетическую энергию вихревых следов. Отсюда следует, что в пределах малых и средних скоростей ($Fr = 0{,}1 \div 0{,}2$) упрощенные формы корпуса судна оказывают наибольшее влияние на сопротивление, а следовательно, при неудачном проектировании ходовые качества могут ухудшиться.

На рис. 15 показаны скуловые линии тока для модели судна типа «Байкал» в зависимости от разных ограничений фарватера по глубине и ширине.

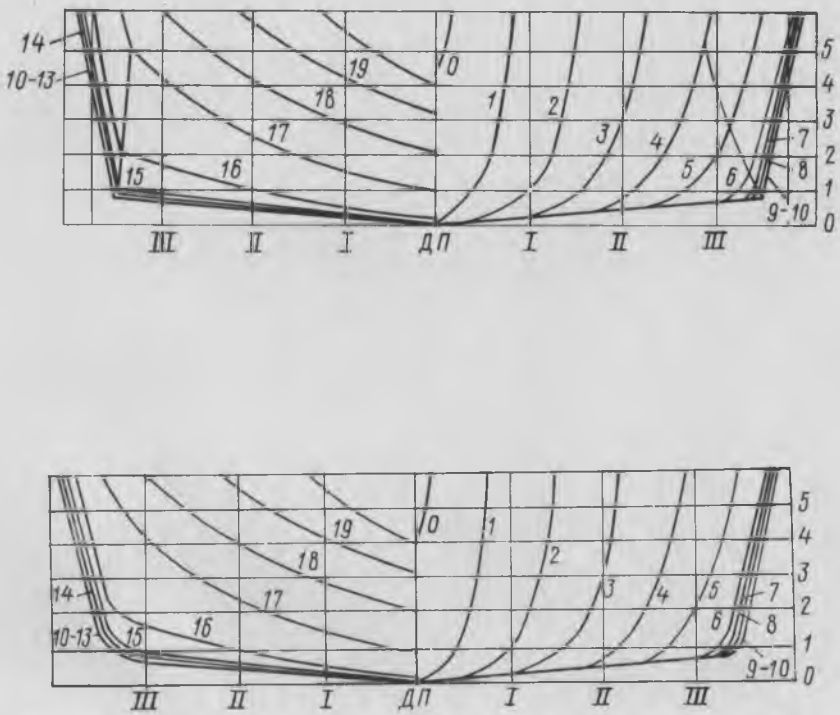

Рис. 13. Хорошо обтекаемые и упрощенные обводы судна типа «Байкал».

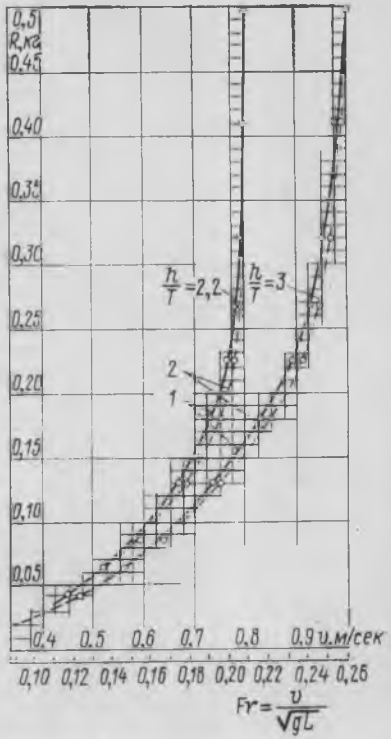

Рис. 14. Кривые сопротивления моделей судна типа «Байкал».

1 —— с обычными обводами, *2* – – – с упрощенными обводами.

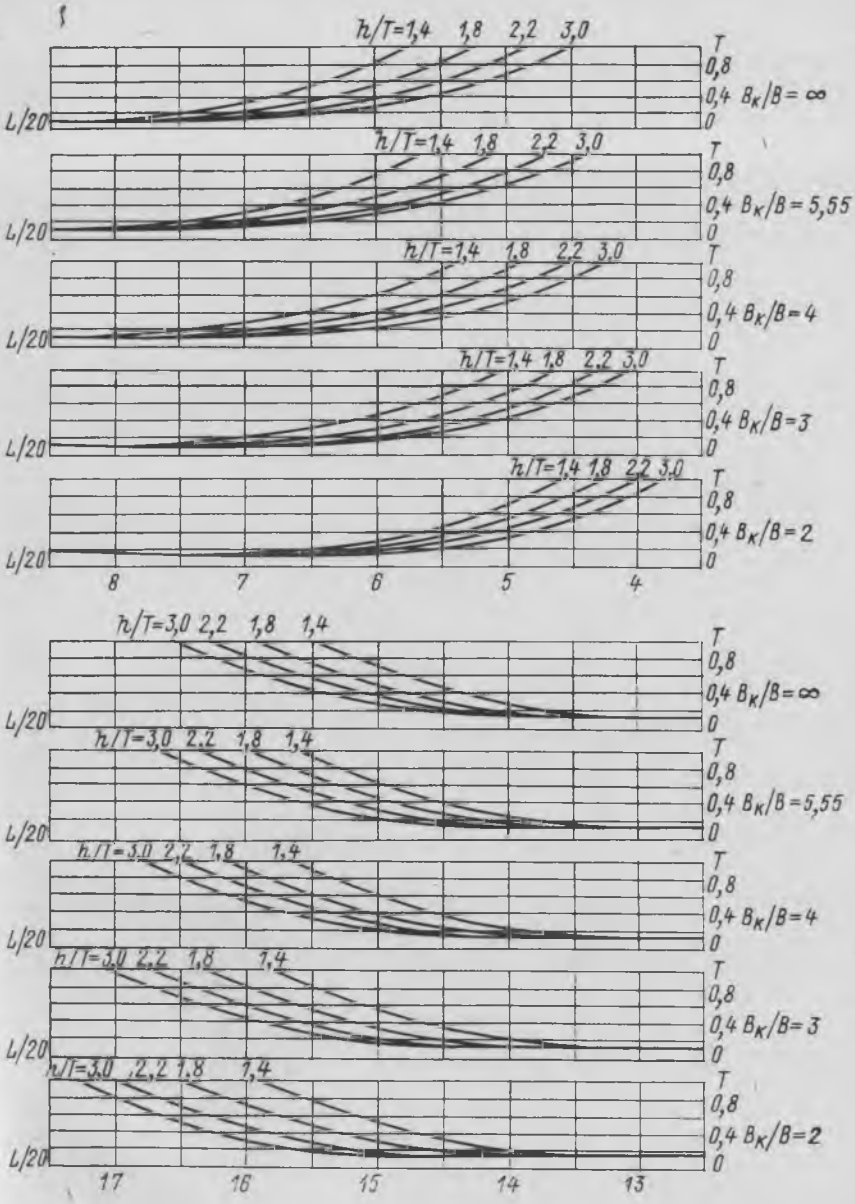

Рис. 15. Направление скуловых линий тока для обводов судна типа «Байкал».

Необходимо отметить, что при проектировании обводов из развертывающихся поверхностей от исполнителя требуется высокая точность построения, поскольку допущение даже небольшой погрешности приводит к негодности всего чертежа. В отличие от судов с обычными обводами, для судов с развертывающейся наружной обшивкой невозможно вносить какие-либо местные изменения на поверхности без того, чтобы не нарушить ее развертываемость.

Инженер А. С. Горшков [16] значительно упростил описанный выше метод построения теоретического чертежа. На рис. 16

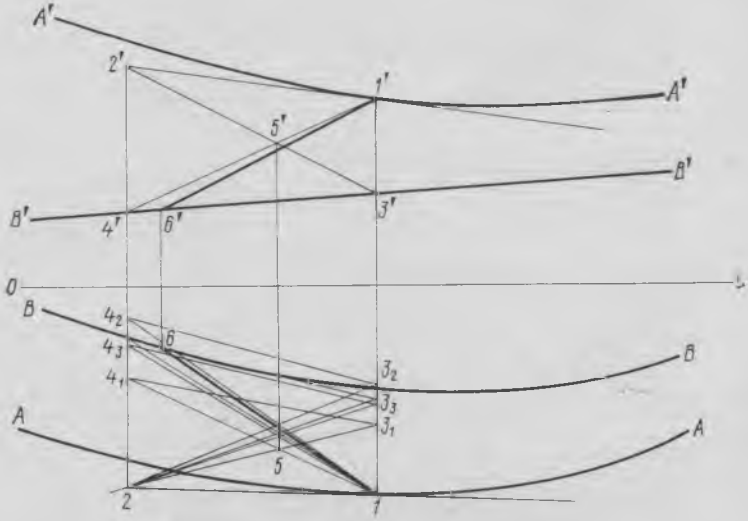

Рис. 16. Построение прямолинейных образующих развертывающихся поверхностей по методу А. С. Горшкова.

показано, как найти образующие на развертывающейся поверхности, натягиваемой на две пространственные кривые. Пусть даны две кривые: *BB* — плоская и *AA* — пространственная. На касательной к кривой *AA* в точке *1* выбирается произвольная точка *2* и проводятся на вертикальной проекции линии *1'—4'* и *2'—3'*. В зависимости от выбора точки *5* на горизонтальной проекции след плоскости, проходящей через линию *1—2*, на плоскости кривой *BB* пройдет по линиям 3_1—4_1, 3_2—4_2, 3_3—4_3. Точка *5* выбирается так, чтобы этот след прошел по касательной к кривой *BB*. Точка касания *6* принадлежит искомому лучу *1—6*. По горизонтальной проекции луча *1—6* строится вертикальная проекция *1'—6'*.

Для обеспечения продольной плавности поверхности кромочные линии должны быть всюду плавными и выпуклыми без перегиба по двум причинам: 1) в случае сопряжения двух раз-

вертывающихся поверхностей по прямолинейной образующей для плавности перехода одной поверхности в другую необходимо и достаточно, чтобы любая направляющая, пересекающая образующую сопряжения, не имела на ней точки слома, а была плавной; 2) если через две кривые проведены две прямолинейные образующие, то для плавности и единственности ограниченной ими поверхности достаточно, чтобы эти кривые лежали по одну сторону от любой из плоскостей, касающихся обеих кривых. В соответствии с первым замечанием плавность перехода обеспечивается плавностью линий скулы, киля и палубы.

Метод А. С. Горшкова значительно проще метода Г. Е. Павленко, так как построения, необходимые для определения положения прямолинейных образующих, выполняются в пределах сетки теоретического чертежа.

За последние десять лет появились работы, посвященные проектированию обводов из развертывающихся поверхностей, в США. Наиболее интересны работы Ульмана Килгора [85]. Сообщения о результатах использования этого метода можно найти в статье Нолана [92]. Исходные данные для чертежа получают по эскизу, а расчет ординат поверхности выполняют на ЭВМ. Применяют метод только для проектирования судов с острой скулой.

Килгор разработал теорию по вопросу натягивания развертывающихся поверхностей на различные кривые, которая нашла свое выражение в двух теоремах.

Теорема 1. Если две пространственные кривые лежат на какой-либо развертывающейся поверхности, то они лежат в одной и только в одной такой поверхности.

Теорема 2. Если две или более плоские кривые расположены на развертывающейся поверхности и определены как сечения двумя или более параллельными плоскостями, которые расположены в определенном порядке, то касательные ко всем этим плоским кривым в соответствующих сечениях на прямолинейной образующей параллельны между собой.

Первая из этих теорем легко опровергается. Далее при рассмотрении свойств развертывающихся поверхностей будет показано, что на две кривые можно натянуть много различных развертывающихся поверхностей. Вторая теорема справедлива, но еще ранее описанные в ней свойства были изучены и использованы для разработки метода построения теоретического чертежа судна из развертывающихся поверхностей [17].

Метод построения теоретического чертежа, предложенный У. Килгором, показан на рис. 17. Этот метод значительно проще, чем описанные выше. Килгор приводит к этому чертежу следующее описание.

1. Выбирается точка P на скуловой линии (на проекциях «бок» и «полуширота»), через точку P проводятся касательные к проекциям скуловой линии.

2. Через касательную проводится какая-нибудь прямая AB, пересекающая бортовую линию в точке B таким образом, чтобы угол PAB получился приемлемым.

3. На достаточно малых интервалах от этой прямой, т. е. через C и E, строятся прямые, параллельные AB на обеих проекциях.

4. На прямых, которые проходят через C и E, на «полушироте» определяются точки D и F пересечения с бортовой линией.

5. Проекции точек D и F на боковой проекции соединяются с точкой B и получается кривая BDF.

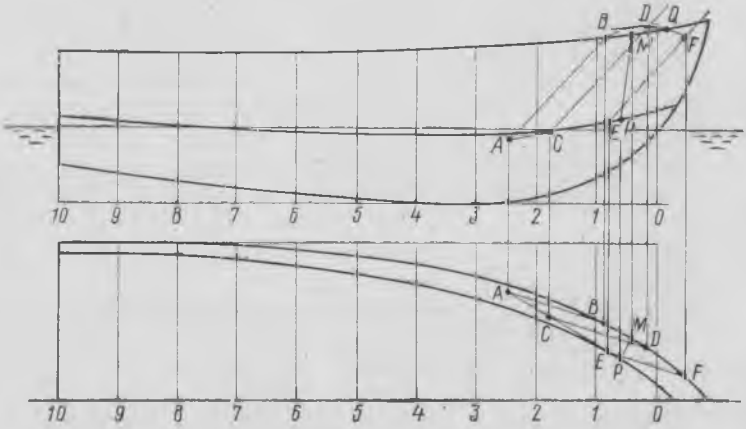

Рис. 17. Построение прямолинейных образующих развертывающихся поверхностей по методу У. Килгора.

6. Определяется точка Q, в которой кривая BDF пересекает бортовую линию.

7. Определяется точка M, расположенная посередине дуги BQ. (Точка M расположена на перпендикуляре, проходящем через точку кривой BDF, в которой касательная параллельна AP.— Прим. авт.)

8. Точки M и P дают линию касания плоскости PAB с бортовой поверхностью судна.

Следует отметить, что задание на чертеже касательной плоскости не следами, а параллельными и пересекающимися прямыми позволяет сократить площадь, занятую построениями, хотя и затемняет чертеж.

В настоящее время на верфи «Бурмейстер и Вайн» [18] в Дании применяют способ проектирования обводов транспортных судов из развертывающихся поверхностей с помощью ЭВМ. На рис. 18 показан вариант обводов транспортного судна со сломом в районе действующей ватерлинии. На рис. 19 показан

вариант тех же обводов, но со скруглениями в местах сломов, образующими неразвертывающуюся часть поверхности.

Опыт верфи «Бурмейстер и Вайн» представляет большой интерес, так как на верфи впервые реализуются возможности,

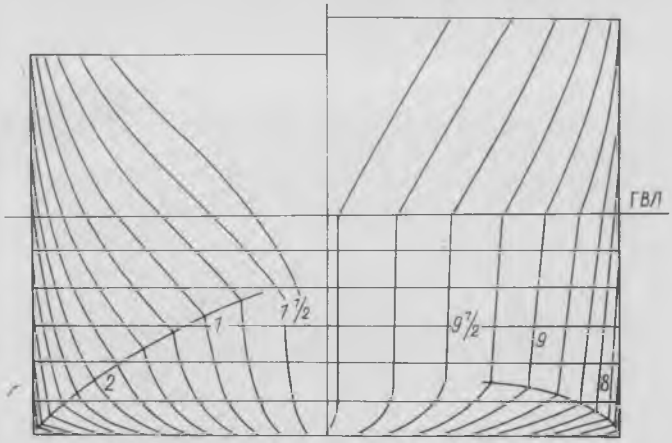

Рис. 18. Обводы транспортного судна из развертывающихся поверхностей (с острой скулой).

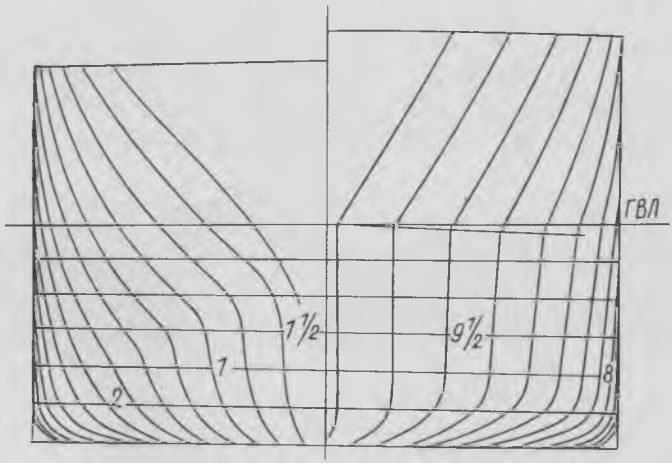

Рис. 19. Обводы транспортного судна из развертывающихся поверхностей (со скругленной скулой).

которые дают развертывающиеся поверхности при проектировании не упрощенных, а хорошо обтекаемых судов. Разработанная на верфи форма обводов не является единственно возможной, но как вариант очень интересна.

§ 3

Методы аппроксимации обычных обводов развертывающимися поверхностями

Для использования ЭВМ при выполнении расчетов по теоретическому чертежу можно аппроксимировать судовую поверхность по частям кусками развертывающихся поверхностей. При этом заменяется около 60% всей поверхности корпуса. Наиболее распространены методы аппроксимации Н. Н. Рыжова [54], В. И. Малиновской [37], Ферриса [74].

Н. Н. Рыжовым предложены разные графические способы построения развертывающихся поверхностей в зависимости от их вида и положения в пространстве. Развертывающиеся поверхности при разработке методов построения он рассматривает как огибающую однопараметрического семейства плоскостей.

Для проектирования судовых обводов Н. Н. Рыжов предложил построение, показанное на рис. 20. Некоторая часть поверхности корпуса задана на чертеже проекциями ряда линий, лежащих на ней. Линии K^1, K^2 и K^3 получены в результате сечения данной поверхности горизонтальными плоскостями α^1, α^2, α^3, а линия l — фронтальной плоскостью β. Для аппроксимации этого участка развертывающейся поверхностью за пары направляющих следует брать K^1 и K^2, K^2 и K^3, K^3 и l. В том случае, когда за пары направляющих принимают линии K^1 и K^2, K^2 и K^3, образующие строят по точкам с параллельными касательными t^1_1 и t^2_1. В случае натягивания развертывающейся поверхности на кривые K^3 и l для построения образующих в некоторой точке k^3 кривой K^3 строят касательную прямую и определяют точку C пересечения ее с плоскостью α^3. Из этой точки C проводят прямую, касательную к кривой K^3. Точки касания k^3 и L соответственны, и прямая, их соединяющая, является искомой образующей. Если некоторая касательная t^2 к кривой имеет соответствующую касательную t^1 в точке k^1 кривой K^1, то оставшийся кусок $k^1 — k^2 — A$ данной поверхности аппроксимируется конической поверхностью с вершиной в точке k^2 и направляющей AK^1. Подобный метод использован Ноланом [92]. Разница только в том, что Н. Н. Рыжов использует это построение для аппроксимации участков поверхности, а Нолан — для построения всей поверхности судна.

Метод, разработанный В. И. Малиновской, используют также для замены неразвертывающихся участков судовой поверхности развертывающимися. Замену делают по частям. Части развертывающихся поверхностей соединяются между собой либо под углом, либо с помощью полос двоякой кривизны. Сущность метода заключается в том, что каждый заменяемый участок подвергается специальному анализу. Для анализа на поверхности

задаются две опорные линии, которые заменяют так называемыми коробовыми кривыми. Замена действительной плоской кривой сечения коробовой является в этом методе основной предпосылкой, обязательной при решении задачи замены неразвертывающегося участка развертывающимся.

Для замены данной кривой коробовой кривую разбивают на участки, каждый из которых затем заменяют дугой окружности. Из центров окружностей проводят лучи к концам дан-

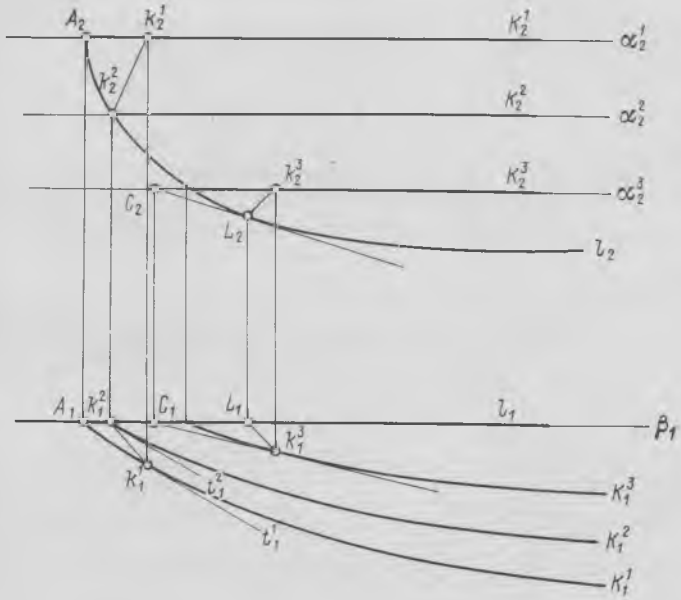

Рис. 20. Построение прямолинейных образующих развертывающихся поверхностей по методу Н. Н. Рыжова.

ного участка. Когда обе опорные кривые заменены коробовыми, то точки с параллельными лучами соединяют прямыми линиями. Затем поверхность, получившуюся из этих прямых, подвергают анализу. Если все прямолинейные образующие на данном участке пересекаются в одной точке, то поверхность может быть заменена конической; если все образующие параллельны между собой — цилиндрической, а в случае их последовательного пересечения попарно — поверхностью с ребром возврата. Когда образующие пересекаются за пределами чертежа, может быть использован второй признак конической поверхности: на всем протяжении конической поверхности хорды, соединяющие точки кривой конического сечения, и соответственные им хорды параллельного сечения той же поверхности

обладают тем свойством, что отношение их длин есть величина постоянная. Этот метод отличается от остальных тем, что нахождение прямолинейных образующих делается по нормали к кривым сечения, а не по касательным. Как и описанные выше, метод коробовых кривых требует много дополнительных построений. Подробное описание метода можно найти в работе [37].

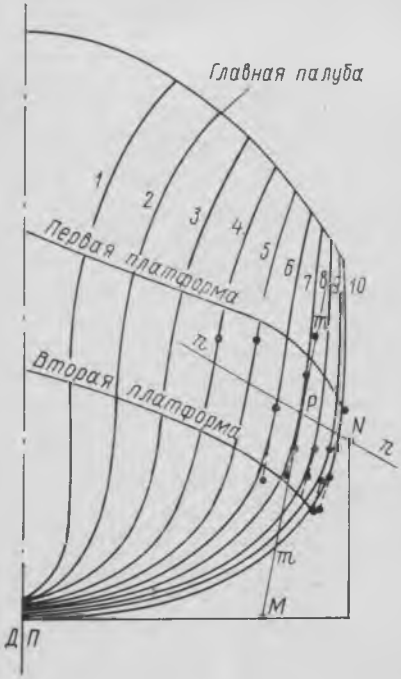

Рис. 21. Расположение исходных точек в графоаналитическом методе Ферриса.

Применяя графоаналитический метод Ферриса [74], всю судовую поверхность разбивают на ряд участков, каждый из которых заменяют развертывающейся поверхностью. Замена производится с помощью аналитических методов. На рис. 21 показано, как в этом случае выбирают участок для замены (в данном случае — это лист между двумя платформами). На участке произвольно выбирают шесть точек. Одной из шести на рисунке является точка P. Для задания на ЭВМ снимают координаты точек M и N. Точка M образована пересечением касательной к шпангоуту в точке P с основной плоскостью; точка N — пересечением касательной к ватерлинии $n—n$ с плоскостью мидель-шпангоута. По этим данным можно получить значения коэффициентов в уравнении текущей касательной плоскости

$$Ax+By+Cz+D=0. \quad (I.1)$$

Поскольку касательная плоскость должна проходить через точки $P(x_1, y_1, z_1)$, $M(x_2, y_2, z_2)$ и $N(x_3, y_3, z_3)$, то нужно решить систему уравнений

$$\left.\begin{aligned} Ax_1+By_1+Cz_1+D=0;\\ Ax_2+By_2+Cz_2+D=0;\\ Ax_3+By_3+Cz_3+D=0. \end{aligned}\right\} \quad (I.2)$$

Если принять какой-либо из коэффициентов A, B, C или D за единицу, то можно остальные коэффициенты получить из написанной выше системы уравнений (I.2). Подобным же образом определяют коэффициенты в уравнениях касательных пло-

скостей, проведенных в остальных пяти точках. Получается шесть уравнений

$$\left.\begin{aligned}
A_1x+B_1y+C_1z+D_1=0;\\
A_2x+B_2y+C_2z+D_2=0;\\
A_3x+B_3y+C_3z+D_3=0;\\
A_4x+B_4y+C_4z+D_4=0;\\
A_5x+B_5y+C_5z+D_5=0;\\
A_6x+B_6y+C_6z+D_6=0,
\end{aligned}\right\} \qquad (I.3)$$

где A_i, B_i, C_i и D_i — коэффициенты уравнения касательной плоскости для i-й точки из взятых шести точек P_i. Затем на графике строится зависимость коэффициентов от расстояния точек от плоскости мидель-шпангоута. Для того чтобы все шесть касательных плоскостей имели огибающей развертывающуюся поверхность, необходимо, чтобы они все зависели от одного параметра c. Для этого графическая зависимость коэффициентов уравнений выражается аналитически через параметр c. При этом получается, что эта зависимость имеет вид

$$A=f(c); \quad B=\text{const}; \quad C=f(c^3); \quad D=f(c^2). \qquad (I.4)$$

Путем подстановки этих выражений в качестве коэффициентов в уравнения системы получают зависимость

$$f(c)\,x+\text{const}\,y+f(c^3)\,z+f(c^2)=0. \qquad (I.5)$$

Затем берется производная по c:

$$\frac{\partial F}{\partial c}=f'(c)\,x+f'(c^3)+f'(c^2)=0. \qquad (I.6)$$

Из уравнений (1.5) и (1.6) путем исключения параметра получают уравнение развертывающейся поверхности, проходящей через заданные шесть точек. Преимущество метода Ферриса в том, что вместо громоздких графических построений предложен способ аналитического задания развертывающейся поверхности.

§ 4

Оценка гидродинамических потерь и экономических преимуществ корпусов с упрощенными обводами

При разработке обводов проектировщика в первую очередь интересуют требования ходкости и мореходности. Эксплуатация судов с упрощенными обводами, у которых скуловой слом даже и совпадает с линией тока, показала, что без потери гидродинамического качества такие обводы можно применять только на очень малых скоростях. Другой принцип, примененный при

проектировании упрощенных обводов,— это использование гидроконических форм. Судя по опубликованным результатам буксировочных испытаний, есть тип судов (буксиры и траулеры), у которых такие обводы не только не ухудшают мореходные качества, но, наоборот, являются одной из оптимальных форм.

По имеющимся результатам трудно сделать окончательные выводы о том, как нужно проектировать упрощенные обводы, чтобы потеря гидродинамического качества была минимальной, но, судя по успешной эксплуатации судов с гидроконическими обводами, можно отметить, что при введении продольного слома нужно вносить такие изменения в форму оконечностей, чтобы было обеспечено обтекание без отрыва пограничного слоя.

В начале 50-х годов под руководством Я. И. Войткунского и Б. В. Плисова проводилось тщательное обследование различных типов упрощенных обводов с целью выявления их влияния на гидродинамическое качество [55]. Одновременно для сравнения были использованы результаты испытаний плоскостных барж. Испытывались баржи, построенные в Ленинграде для «Дороги жизни». Эксперименты показали, что применение обводов, состоящих из одних плоскостей без всяких скруглений, нельзя рекомендовать из-за резкого увеличения сопротивления. Испытаниям подвергались обводы с ломаными шпангоутами, состоящими из прямых ветвей. Технологические преимущества такого набора корпуса проявляются только при наличии одного слома, но сопротивление воды при этом возрастает на несколько процентов.

Для оценки обводов такого типа (см. рис. 12) были спроектированы обводы небольшого ($L = 66{,}8$ м; $B = 11$ м) грузового судна с относительной скоростью $\mathrm{Fr} \approx 0{,}28$. Было испытано два варианта обводов. Первый вариант был спроектирован с развертывающейся наружной обшивкой, а второй — с прямыми шпангоутами вместо лекальных. В первом варианте линия скулы была выбрана по данным Тейлора для определения линий тока. Теоретический чертеж выполнялся по методу А. С. Горшкова. Длина цилиндрической вставки, палубная линия, объемное водоизмещение и положение центра величины были оставлены такими же, как у исходных обводов.

Результаты сравнительных буксировочных испытаний показали, что упрощенные обводы имеют на тихой воде скорость меньше, чем обычные обводы на 0,2 уз ($\sim 1{,}4\%$).

На основании буксировочных испытаний, а также эксплуатации судов с коническими обводами [81] известно, что правильный выбор направления скулы позволяет свести к минимуму потери гидродинамического качества (1,5—2%). Если слом вводится не по линии тока, а в районе действующей ватерлинии и сглажен (см. рис. 19), то, очевидно, можно избежать потери гидродинамического качества.

Сравнительные испытания, выполненные А. Т. Ильичевым [24] по обводам с прямолинейными шпангоутами, показали, что изменение конструкции шпангоутов (рис. 22) может привести к незначительному увеличению сопротивления. На рис. 23 показаны кривые буксировочного сопротивления моделей.

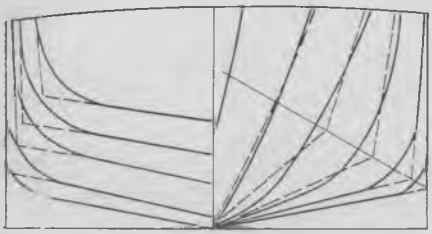

Рис. 22. Замена обычных шпангоутов прямолинейными.

—— обычные обводы, – – – обводы с прямолинейными шпангоутами.

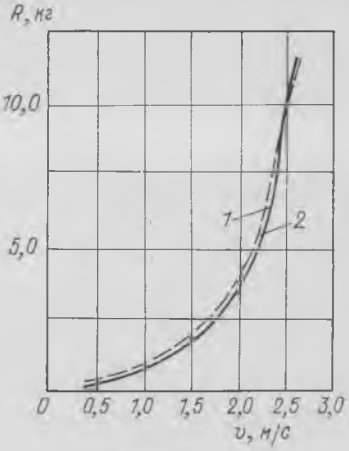

Рис. 23. Кривые сопротивления моделей с обычными и прямолинейными шпангоутами:

1 —— обычные обводы, *2* – – – обводы с прямолинейными шпангоутами.

На рис. 24 показан корпус, а на рис. 25 линии тока судна типа «Пионер». По данным, приведенным в работе [14], потеря скорости у этого типа судов равна 3%.

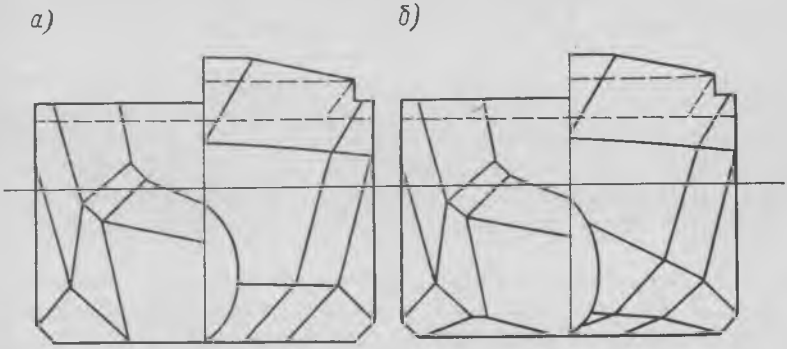

Рис. 24. Обводы судна типа «Пионер»: *а* — обводы с одной скулой, *б* — обводы с двумя скулами.

Все приведенные здесь сведения показывают, что прибегать к упрощенным обводам имеет смысл только в том случае, когда это приводит к достаточно ощутимому эффекту при проектировании и постройке корпуса. Наиболее тщательный анализ

экономических преимуществ упрощенных обводов из развертывающихся поверхностей и обводов с прямолинейными шпангоутами проведен в работе [55].

По оценкам, сделанным в работах [50, 55, 81], в 1950—1960-е гг. снижение трудоемкости судокорпусных работ при постройке судов с упрощенными обводами по сравнению со снижением ее при постройке судов обычных форм составляло 15—20%. В иностранной литературе [85, 92, 86] технологичность судов упрощенных форм оценивают достаточно высоко. В 1960-е гг. внедрение конических обводов для корпусов рыболовных судов давало до 40% снижения трудоемкости постройки корпуса [81].

За последние 20 лет технология постройки корпуса существенно усовершенствована [51, 52]. Применяют универсальные

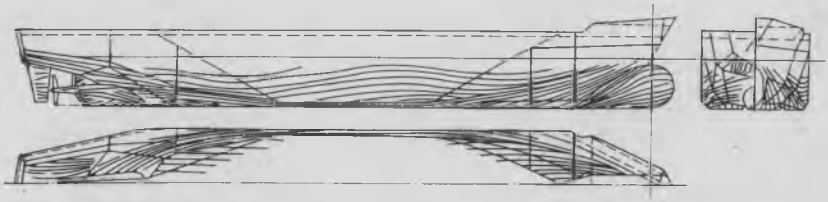

Рис. 25. Линии тока судна типа «Пионер».

постели, вместо ручной выбойки и горячей гибки применяют гибку на вальцах и на прессах, широко внедряют ЭВМ на всех стадиях постройки корпуса, поэтому экономический эффект от упрощения обводов не может быть таким большим, как раньше. При оценке экономической целесообразности применения упрощенных обводов следует учитывать размеры судов. Большие суда имеют малую кривизну обшивки, поэтому листы ложатся без предварительной выбойки, и применение развертывающихся поверхностей для их проектирования дает малый эффект. Значительно большего можно достичь за счет прямолинейных шпангоутов. Для судов с длиной корпуса менее 80 м применять обводы с развертывающейся наружной обшивкой имеет смысл. Особенно это целесообразно для судов с малой цилиндрической вставкой.

Технологические преимущества упрощенных обводов при постройке новых судов складываются из перечисленных ниже особенностей проектирования и постройки:

1. Сокращается время и трудоемкость разбивки плаза, изготовления плазовых шаблонов листов наружной обшивки и набора корпуса.

2. Уменьшается объем работ по разметке набора, так как контуры шпангоутов прямые.

3. Уменьшается трудоемкость при обработке металла, поскольку при упрощенных обводах форма шпангоутов, скуловых

книц и флоров вместо криволинейной становится прямолинейной, а гнутье профилей набора и выбойка листов обшивки совсем отсутствует.

4. Упрощаются сборочные работы на участках секционной и стапельной сборки за счет более легкой подгонки шпангоутов и листов обшивки.

5. Сокращается количество постелей корпуса, так как большая часть секций судов с упрощенными обводами может свариваться на обычных сборочных площадках. Кроме того, для секций носа и кормы, когда они имеют однопараметрическую кривизну, постели имеют менее сложную конфигурацию.

6. Расширяется возможность использования автоматической и полуавтоматической сварки.

Следует отметить, что при постройке судов упрощенных форм значительно легче применять вычислительную технику и при проектировании, и при постройке корпуса. Если наружная обшивка состоит из развертывающихся поверхностей, то нет необходимости задавать все сечения теоретического чертежа, а достаточно вычертить только кромочные линии.

И еще одно преимущество, которым обладают только обводы их развертывающихся поверхностей, должно быть принято во внимание. Для того чтобы обрезка листов наружной обшивки по кривым линиям осуществлялась только у борта и на диаметральном батоксе, а на остальной части корпуса листы имели прямолинейные кромки, нужно, чтобы обшивка была развертывающейся.

ГЛАВА II

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБВОДОВ СУДОВ С РАЗВЕРТЫВАЮЩЕЙСЯ ОБШИВКОЙ БЕЗ ПОТЕРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА

§ 5

Аналитическое исследование класса развертывающихся поверхностей

Форма обводов судна из развертывающихся поверхностей зависит от того, какая из поверхностей взята для проектирования: коническая, цилиндрическая или поверхность с ребром возврата. Поэтому свойства развертывающихся поверхностей, а также их внешние формы представляют большой интерес.

Развертывающиеся поверхности, как особый класс линейчатых поверхностей, начали изучать около 150 лет тому назад. Первые систематические исследования развертывающихся поверхностей выполнил французский математик Гаспар Монж и изложил их в своем знаменитом труде «Приложение анализа к геометрии» [38]. В дальнейшем наука о развертывающихся поверхностях развивалась вместе с развитием математики.

В настоящее время развертывающиеся поверхности представлены в различных курсах дифференциальной геометрии в совершенно различных аспектах. Это связано с тем, что в основу анализа берутся разные определения. Необходимость приведенного ниже исследования продиктована тем, что традиционные курсы дифференциальной геометрии изучают свойства поверхностей в бесконечно малом, а для использования развертывающихся поверхностей при проектировании обводов необходимо знать их формы при конечных размерах. Легко убедиться в том, что цилиндрические, конические и поверхности с ребром возврата не исчерпывают всех видов развертывающихся поверхностей. Это видно при изгибании плоского листа (рис. 26).

Проектируя судовую поверхность, приходится исходить из границ этой поверхности. Как правило, проектирование выполняют путем натягивания поверхности на две опорные кривые. Для того чтобы найти зависимость между формой заданных опорных кривых и натянутой поверхности, необходимо знать, во-первых, сколько различных развертывающихся поверхностей можно натянуть на заданный контур, во-вторых, как зависит форма развертывающейся поверхности от внутренних свойств.

По первому вопросу в работе Г. Е. Павленко [45, с. 14] сказано следующее: «Развертывающаяся поверхность может быть проведена через две любые заранее заданные кромочные линии и в большинстве случаев — однозначным способом». У. Килгор формулирует теорему [85]: «Если две пространственные кривые лежат в какой-нибудь развертывающейся поверхности, то они лежат в одной и только в одной такой поверхности». В теореме, сформулированной Н. Н. Рыжовым, говорится: «*Огибающая однопараметрического семейства плоскостей является развертывающейся поверхностью.* Всякую огибающую однопараметрического семейства плоскостей можно рассматривать как поверхность, образованную касательными к соответствующей кривой линии. Пара направляющих будет определять развертывающуюся поверхность единственным образом, если при движении соответствующих точек касания по кривым линиям будет выполняться следующее условие: *при непрерывном перемещении точки касания на одной направляющей соответственная точка касания на другой направляющей перемещается непрерывно*» [54, с. 7, 8].

Итак, основным вопросом, который занимает всех исследователей, является вопрос о единственности решения задачи

о натягивании развертывающейся поверхности на две направляющие кривые. На рис. 27 показано пересечение двух развертывающихся поверхностей по замкнутому контуру. Одна из поверхностей — коническая с вершиной на той части поверхности, которая натянута на контур. Таких конических поверхностей

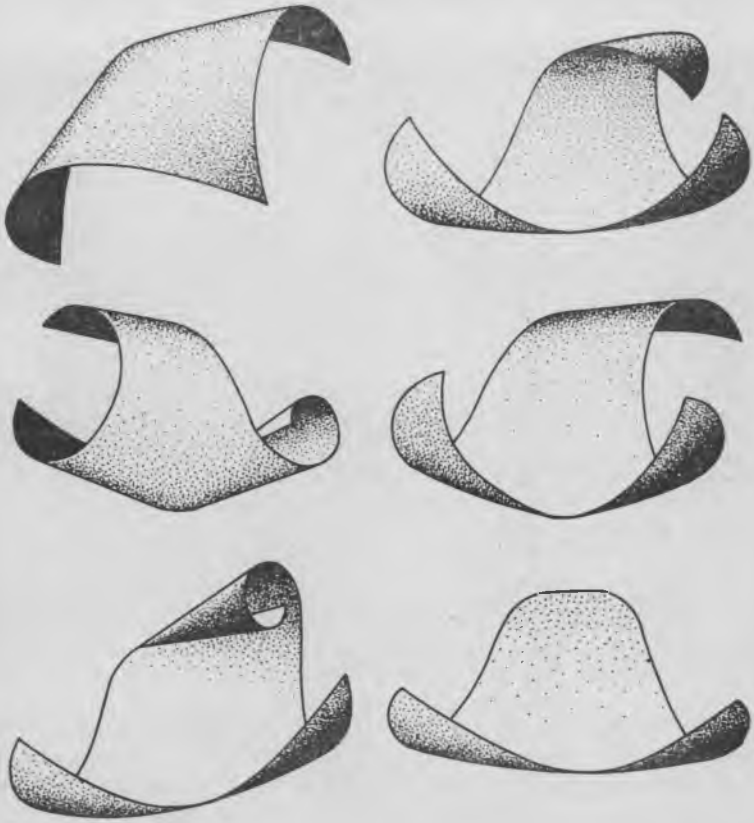

Рис. 26. Поверхности, получаемые путем изгибания плоских листов.

можно натянуть на этот же контур множество. Можно рассматривать линию пересечения поверхностей как линию, состоящую из двух стыкующихся пространственных кривых, тогда этот рисунок будет несомненным опровержением теоремы У. Килгора. Если предположить, что в теореме Килгора подразумевается непрерывность поверхности в пределах контура, т. е. отсутствие особых точек, то и тогда она опровергается. На рис. 28 показано, что две пространственные кривые могут принадлежать линии пересечения двух развертывающихся поверхностей.

Еще убедительнее опровергается утверждение о единственности с помощью такого простого рассуждения. Пусть одна из точек замкнутого контура принята за вершину конической поверхности. Соединяя эту вершину со всеми остальными точками контура прямыми линиями, получим коническую поверхность, на которой лежит данный контур. Принимая за вершины другие точки контура, получим новые конические поверхности, которым данный контур также принадлежит.

Условие непрерывности перемещения точек касания, введенное Н. Н. Рыжовым, исключает из рассмотрения поверхности с особыми точками внутри контура, но не решает вопроса об

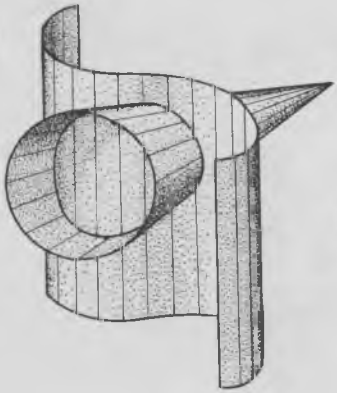

Рис. 27. Пересечение конической и цилиндрической поверхностей по замкнутому контуру.

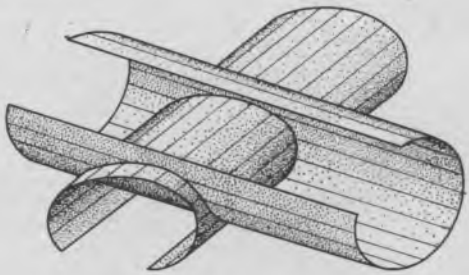

Рис. 28. Пересечение двух цилиндрических поверхностей по замкнутому контуру.

единственности. Все эти теоремы справедливы при двух условиях. Во-первых, для однозначности решения кривые, на которые натягивается развертывающаяся поверхность, должны иметь только по одной паре точек с касательными, лежащими в общей плоскости. Если кривые лежат в параллельных плоскостях, то их порядок не должен быть выше второго, потому что только в этом случае у каждой из них будет по одной точке с равными первыми производными. Во-вторых, нужно, чтобы особые точки были расположены вне рассматриваемой части поверхности, т. е. вне контура.

Существование противоречий в сведениях о развертывающихся поверхностях привело к необходимости выполнения приведенного ниже анализа.

Анализ приведен на основе определения, данного Г. Монжем: «Развертывающейся поверхностью называется поверхность, обладающая тем свойством, что, считая ее гибкой и нерастяжимой, мы можем, изогнув такую поверхность, наложить

ее на плоскость, с которой она будет соприкасаться тогда всеми ее точками, не образуя ни разрывов, ни складок» [38, с. 178]. Из этого определения могут быть сделаны два вывода. Во-первых, к развертывающимся поверхностям относятся только такие поверхности, которые могут быть совмещены с плоскостью. Во-вторых, изгибание не должно нарушать целостность поверхности.

Известно, что инвариантом изгибания является полная (гауссова) кривизна поверхности. Если исходить из того, что все развертывающиеся поверхности получаются изгибанием плоского листа, то их гауссова кривизна должна быть равна нулю, как у плоскости:

$$K=0. \tag{II.1}$$

По определению гауссова кривизна равна произведению главных кривизн. Для удобства дальнейших рассуждений запишем

$$K=\frac{1}{R_1R_2}, \tag{II.2}$$

где R_1 — радиус минимальной кривизны; R_2 — радиус максимальной кривизны.

Отсюда видно, что гауссова кривизна определяет связь между кривизной поверхности по главным направлениям. Гауссова кривизна может быть равна нулю, когда одна из кривизн равна нулю. Случай неопределенности K, когда $R_1=0$, исключается из рассмотрения, потому что это возможно только в точках возврата или в других особых точках, а для судовой обшивки представляют интерес только гладкие части поверхности.

Гауссова кривизна выражается через коэффициенты первой и второй гауссовой квадратичной формы в виде

$$K=\frac{LN-M^2}{EG-F^2}, \tag{II.3}$$

где E, F и G — коэффициенты первой квадратичной формы, а L, M, N — коэффициенты второй квадратичной формы.

Они равны

$$\left.\begin{aligned} &E=\mathbf{r}_u^2; \quad F=\mathbf{r}_u\mathbf{r}_v; \quad G=\mathbf{r}_v^2; \\ &L=\mathbf{r}_{uu}\mathbf{m}; \quad M=\mathbf{r}_{uv}\mathbf{m}; \quad N=\mathbf{r}_{uv}\mathbf{m}, \end{aligned}\right| \tag{II.4}$$

где

$$\mathbf{m}=\frac{\mathbf{r}_u\times\mathbf{r}_v}{\mathbf{r}_u\mathbf{r}_v};$$

$\mathbf{r}$ — радиус-вектор кривой на поверхности; $\mathbf{m}$ — орт нормали, который зависит только от первых производных радиуса-вектора $\mathbf{r}$.

Гауссова кривизна полностью определяется первыми и вторыми производными от радиуса-вектора данной точки поверхности. Знаменатель выражения (II.3) представляет собой дискриминант первой квадратичной формы, который отличен от нуля во всякой неособой точке поверхности. Сами же коэффициенты E, F и G зависят от значений первых производных, которые не могут на гладкой поверхности принимать бесконечно большие значения. Следовательно, знаменатель не равен ни бесконечно большому значению, ни нулю, и равенство нулю гауссовой кривизны может быть достигнуто только за счет равенства нулю числителя. Числитель состоит из коэффициентов второй квадратичной формы.

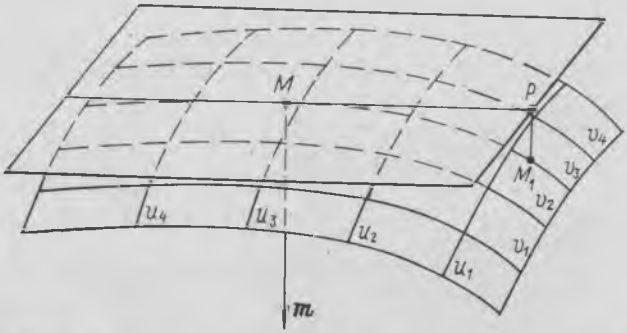

Рис. 29. Отклонение касательной плоскости от криволинейной поверхности в окрестности точки касания.

Вторая квадратичная форма выражает отклонение касательной плоскости, построенной в данной точке поверхности, от точек поверхности, расположенных бесконечно близко к данной точке. На рис. 29 видно, что отклонение точки M_1, расположенной достаточно близко к точке M, от касательной плоскости равно расстоянию PM_1. Это расстояние может быть выражено как проекция бесконечно малой дуги MM_1 на нормаль к касательной плоскости

$$PM_1 = \mathbf{MM_1m} = \Delta\mathbf{rm},$$

где

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_u\,du + \mathbf{r}_v\,dv + \boldsymbol{\varepsilon}.$$

Учитывая, что вектор $\mathbf{m}$ перпендикулярен $\mathbf{r}_u$ и $\mathbf{r}_v$, получим

$$PM_1 = \Delta\mathbf{rm} = \boldsymbol{\varepsilon}\mathbf{m}.$$

Разложим $\Delta\mathbf{r}$ в ряд Тейлора:

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_u\,du + \mathbf{r}_v\,dv + \frac{1}{2}\left(\mathbf{r}_{uu}\,du^2 + 2\mathbf{r}_{uv}\,du\,dv + \mathbf{r}_{vv}\,dv^2\right) + \boldsymbol{\eta},$$

где $\boldsymbol{\eta}$ — имеет порядок выше второго относительно du и dv.

Тогда PM_1 равно

$$PM_1=\frac{1}{2}(L\,du^2+2M\,du\,dv+N\,dv^2).$$

Считая в пределах рассматриваемого элемента кривизну кривой постоянной и равной отношению удвоенного отклонения к квадрату длины дуги, легко получить зависимость

$$K=\frac{1}{R}=\frac{PM_1}{MM_1^2}=\frac{L\,du^2+2M\,du\,dv+N\,dv^2}{E\,du^2+2F\,du\,dv+G\,dv^2}. \qquad \text{(II.5)}$$

Для определения главных направлений необходимо первые производные от этого выражения по du и dv приравнять нулю. В результате получается условие для определения направлений главных кривизн в виде

$$\begin{vmatrix} E\,du+F\,dv & F\,du+G\,dv \\ L\,du+M\,dv & M\,du+N\,dv \end{vmatrix}=0. \qquad \text{(II.6)}$$

Исключая из (II.5) и (II.6) отношение $\frac{du}{dv}$, получим

$$\begin{vmatrix} L-\frac{1}{R}E & M-\frac{1}{R}F \\ M-\frac{1}{R}F & N-\frac{1}{R}G \end{vmatrix}=0. \qquad \text{(II.7)}$$

Это выражение является квадратным уравнением, в котором свободный член равен произведению главных кривизн, такому же, как в выражении (II.3):

$$K=\frac{1}{R_1R_2}=\frac{LN-M^2}{EG-F^2}.$$

Для перехода от аналитических зависимостей к форме поверхности с нулевой гауссовой кривизной необходимо выявить особенности главных направлений. При изучении поведения нормалей к разным линиям поверхности Монж обнаружил, что на поверхности существуют такие линии, вдоль которых нормали образуют развертывающуюся поверхность. Монж назвал их линиями кривизны. Кроме того, доказана следующая теорема: «Для того, чтобы линия, проведенная на поверхности, была линией кривизны этой поверхности, необходимо и достаточно, чтобы ее направление всюду совпадало с главным направлением». На основании этой теоремы аналитически выводятся уравнения линий кривизны для данной поверхности. На рис. 30 показана поверхность S, на которой предполагается известной некоторая линия кривизны L. По определению линий кривизны нормали к поверхности в точках линии L образуют развертывающуюся поверхность N. Для примера взята поверхность с ребром возврата как одна из известных развертывающихся поверхностей. Тогда каждая точка M на линии кривизны

имеет соответствующую точку Q на ребре возврата. Обе точки лежат на одной прямолинейной образующей и поэтому радиусы-векторы этих точек могут быть связаны зависимостью

$$\mathbf{r}^1 = \mathbf{r} + x\mathbf{m},$$

где x — это расстояние между точками M и Q. После дифференцирования этого выражения получается зависимость

$$d\mathbf{r}^1 = d\mathbf{r} + x\,d\mathbf{m} + \mathbf{m}\,dx,$$

где $d\mathbf{r}^1$ и $\mathbf{m}$ направлены по одной прямолинейной образующей.

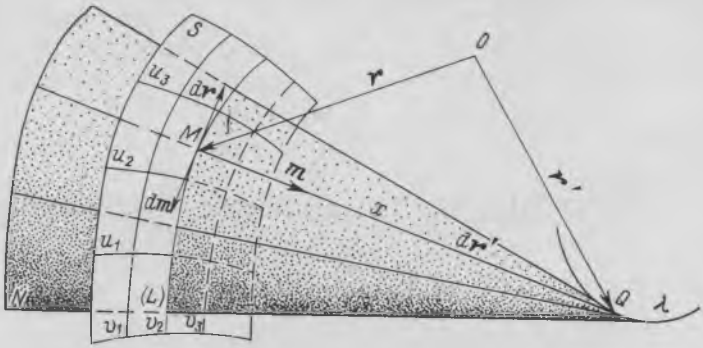

Рис. 30. Линии кривизны поверхности и нормали к ним.

Отсюда условие для определения величины x получается в виде

$$d\mathbf{r} + x\,d\mathbf{m} = 0.$$

$d\mathbf{r}$ и $d\mathbf{m}$ выражаются в частных производных по криволинейным координатам

$$d\mathbf{r} = \mathbf{r}_u\,du + \mathbf{r}_v\,dv;\ d\mathbf{m} = \mathbf{m}_u\,du + \mathbf{m}_v\,dv.$$

Тогда

$$(\mathbf{r}_u + x\mathbf{m}_u)\,du + (\mathbf{r}_v + x\mathbf{m}_v)\,dv = 0.$$

Путем несложных преобразований можно выразить x через коэффициенты первой и второй квадратичной формы

$$\begin{vmatrix} E - xL & F - xM \\ F - xM & G - xN \end{vmatrix} = 0. \qquad (\text{II}.8)$$

Сравнивая (II.8) и (II.7), можно видеть, что расстояние MQ равно радиусу главной кривизны: $x = R$. Этот вывод позволяет рассмотреть свойства развертывающихся поверхностей как поверхностей с нулевой гауссовой кривизной.

Принятое ранее условие $\frac{1}{R_2}=0$ означает, что для линий минимальной кривизны расстояние до центров кривизны бесконечно велико. Отсюда следует, что все нормали этой линии касаются ребра возврата на бесконечности, а следовательно, в пределах рассматриваемого участка остаются параллельными друг к другу и образуют цилиндрическую поверхность. Если теперь в каждой точке линии кривизны построить касательные плоскости, то они все окажутся перпендикулярными одному и тому же направлению. Следовательно, на развертывающейся поверхности обязательно существуют линии кривизны, вдоль которых касательные плоскости неизменны. Пусть неплоская поверхность S образована непрерывным семейством линий L_u и пусть вдоль каждой неизменной касательной из линий L_u касательная плоскость P_u к S остается неизменной. Тогда S есть линейчатая поверхность и L_u — ее прямолинейные образующие. Отсюда следует, что поверхность с нулевой гауссовой кривизной обязательно линейчатая, а касательная плоскость вдоль каждой прямолинейной образующей остается неизменной.

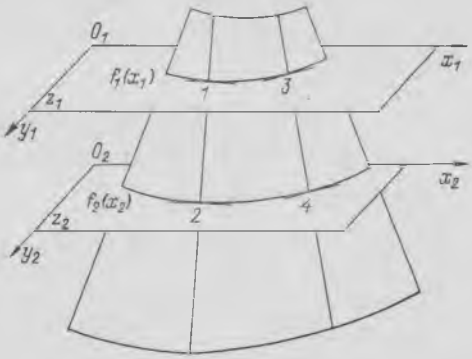

Рис. 31. Сечения поверхности с нулевой гауссовой кривизной параллельными плоскостями.

Для определения форм поверхностей с нулевой гауссовой кривизной не в бесконечно малом, а на конечных участках, необходимо найти связь между двумя прямолинейными образующими, проходящими через две бесконечно близко расположенные точки поверхности. Пусть поверхность нулевой гауссовой кривизны пересекается двумя параллельными плоскостями z_1 и z_2 (рис. 31). Уравнения полученных сечений удобно записать в виде

$$f_1(x_1)=0; \quad f_2(x_2)=0. \tag{II.9}$$

В тех точках, которые лежат на одной прямолинейной образующей, выполняется условие

$$f_1'(x_1)=f_2'(x_2). \tag{II.10}$$

Уравнение образующей, проходящей через точки *1* и *2*, записывается в виде

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1}=\frac{y-y_1}{y_2-y_1}=\frac{z-z_1}{z_2-z_1}, \tag{II.11}$$

где x_1, y_1, z_1 — координаты точки *1*, а x_2, y_2, z_2 — координаты точки *2*. Точки *3* и *4* расположены бесконечно близко к точкам *1* и *2* соответственно. Через них проходит образующая, уравнение которой имеет вид

$$\frac{x-x_1-dx_1}{x_2+dx_2-x_1-dx_1}=\frac{y-y_1-dy_1}{y_2+dy_2-y_1-dy_1}=\frac{z-z_1}{z_2-z_1}.$$

Связь между dx_1 и dx_2

$$dx_2=A\,dx_1.$$

Для определения A функции $f_1'(x+dx_1)$ и $f_2'(x_2+dx_2)$ раскладываются в ряд Тейлора, и берутся только два первых члена разложения:

$$f_1'(x_1+dx_1)=f_1'(x_1)+f_1''(x_1)\,dx_1;$$
$$f_2'(x_2+dx_2)=f_2'(x_2)+f_2''(x_2)\,dx_2.$$

Учитывая (II.10), получим

$$Af_2''(x_2)=f_1''(x_1).$$

Тогда

$$A=\frac{f_1''(x_1)}{f_2''(x_2)}.$$

Связь между dx_2 и dx_1 имеет вид

$$dx_2=\frac{f_1''(x_1)}{f_2''(x_2)}\,dx_1. \qquad \text{(II.12)}$$

Для того чтобы заданные прямолинейные образующие лежали в одной плоскости, нужно, чтобы

$$\begin{vmatrix} (x_1+dx_1)-x_1 & (y_1+dy_1)-y_1 & (z-z_1)-(z-z_1) \\ x_2-x_1 & y_2-y_1 & z_2-z_1 \\ (x_2+dx_2)-(x_1+dx_1) & (y_2+dy_2)-(y_1+dy_1) & z_2-z_1 \end{vmatrix}=0.$$

После преобразования определителя получим

$$\begin{vmatrix} dx_1 & dy_1 & 0 \\ x_2-x_1 & y_2-y_1 & z_2-z_1 \\ (A-1)\,dx_1 & y_1'(A-1)\,dx_1 & 0 \end{vmatrix}=0. \qquad \text{(II.13)}$$

Отсюда получаем тождество

$$dy_1=y_1'\,dx_1. \qquad \text{(II.14)}$$

Это тождество является условием непрерывности линии сечения в плоскости z_1.

Для определения положения особых точек поверхности нужно рассмотреть образующие, расположенные бесконечно близко справа и слева от некоторой выбранной. На рис. 32 показана проекция сечений $f_1(x_1)$, $f_2(x_2)$ и трех выбранных образующих.

Пусть уравнение проекции i-й образующей имеет вид

$$A_i x + B_i y + D_i = 0. \qquad \text{(II.15)}$$

Для прямой, проходящей через точки $M(x_1, y_1)$ и $N(x_2, y_2)$, коэффициенты определяются по формулам

$$A_1 = y_2 - y_1; \qquad B_1 = x_2 - x_1;$$

$$D_1 = y_1 x_2 - x_1 y_2.$$

Для образующей II, расположенной справа:

$$A_2 = A_1 + y_1'(A-1)dx + y_1''(A-1)\frac{dx^2}{2};$$

$$B_2 = B_1 + (A-1)\,dx;$$

$$D_2 = D_1 + (x_2 - x_1 A)\,dx\left(y_1' + y_1''\frac{dx}{2}\right).$$

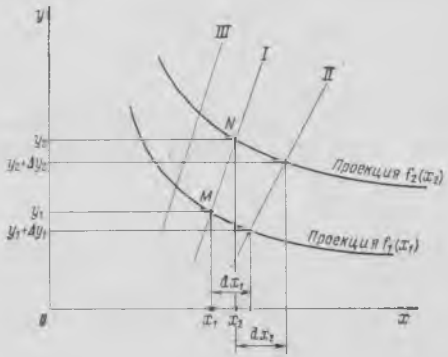

Рис. 32. Проекции трех бесконечно близко расположенных прямолинейных образующих.

Решая совместно уравнения:

$$\left.\begin{aligned} A_1 x + B_1 y + D_1 &= 0; \\ A_2 x + B_2 y + D_2 &= 0 \end{aligned}\right\}$$

и отбрасывая бесконечно малые высших порядков, получим координаты точки пересечения образующих в виде

$$x = \frac{(y_1 x_2 - x_1 y_2)(A-1) - (x_2 - x_1)(x_2 - A x_1)\,y_1'}{(A-1)(y_2 - y_1) - y_1'(x_2 - x_1)};$$

$$y = \frac{(x_2 - x_1)(y_2 - A y_1)\,y_1'}{(A-1)(y_2 - y_1) - y_1'(x_2 - x_1)}. \qquad \text{(II.16)}$$

Считая, что влево от исходной образующей

$$A_0 = \frac{f_1''(x_1)}{f_2''(x_2)}, \qquad \text{(II.17)}$$

получим расстояние между двумя точками пересечения трех

бесконечно близко расположенных прямолинейных образующих в виде

$$x-x_0=\frac{(A-A_0)(x_2-x_1)^2 y_1'}{(A_0-1)(A-1)\left[(y_2-y_1)-y_1'(x_2-x_1)\right]};$$

$$y-y_0=\frac{(A-A_0)(x_2-x_1)(y_2-y_1)y_1'}{(A_0-1)(A-1)\left[(y_2-y_1)-y_1'(x_2-x_1)\right]}. \qquad \text{(II.18)}$$

Для существования пересечения трех прямолинейных образующих в двух точках, расположенных бесконечно близко на расстоянии $\sqrt{dx^2+dy^2}$, где $dx=x-x_0$, $dy=y-y_0$, необходимо, чтобы A и A_0 отвечали определенным условиям.

Случай 1. $A\to 1$, $A_0\to 1$, но $A\neq A_0$, тогда $(x-x_0)\to\infty$, $(y-y_0)\to\infty$, т. е. ребро возврата терпит разрыв. Этот случай при построении теоретического чертежа встречается достаточно часто, так как $A=\frac{f_1''(x_1)}{f_2''(x_2)}$ — отношение, близкое к единице, но, естественно, разное вдоль линий поверхности.

Случай 2. Если $A=A_0=1$, то это значит, что кривизна сечений $f_1(x_1)$ и $f_2(x_2)$ одинакова, а следовательно, поверхность цилиндрическая.

Случай 3. Если $A=A_0\neq 1$, то $dx=0$ и $dy=0$, тогда все три прямолинейные образующие пересекаются в одной точке и участок поверхности конический.

Проведенный анализ подтверждает все выводы, относящиеся к форме развертывающихся поверхностей в малом. При исследовании конечных участков развертывающихся поверхностей следует проследить изменение величины второй производной на двух параллельных сечениях. Легко заметить, что при непрерывном изменении вторых производных их отношение может значительно меняться вдоль кривых в точках, принадлежащих одной общей образующей. Только на отдельных участках может соблюдаться условие, когда $A\to A_0$ при $A\neq A_0\neq 1$. Следовательно, существование ребра возврата у поверхности, натягиваемой на две произвольные кривые, на всем их протяжении возможно только при дополнительных условиях, наложенных на отношение вторых производных $f_1''(x_1)/f_2''(x_2)$. Если же никакие дополнительные условия не накладываются, то расположение прямолинейных образующих на развертывающейся поверхности может быть достаточно произвольным.

На кусочно-гладких участках единственным условием, которое предъявляется к положению прямолинейных образующих, является требование, чтобы их пересечение происходило вне взятого участка поверхности. Две бесконечно близкие образующие поверхности с нулевой гауссовой кривизной могут либо пе-

ресекаться, либо быть параллельными. Такие развертывающиеся поверхности нельзя отнести ни к коническим, ни к цилиндрическим, ни к поверхностям с ребром возврата, так как чередование параллельных и пересекающихся образующих носит произвольный характер. На такой поверхности две любые прямолинейные образующие, расположенные на конечном расстоянии, могут быть скрещивающимися. Это хорошо видно на рис. 33.

Для анализа формы линейчатых поверхностей вводится понятие параметра распределения прямолинейных образующих. Если δ — кратчайшее расстояние между двумя прямыми, а ω — угол между ними, то предел отношения

$$p = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\delta(\Delta x)}{\omega(\Delta x)} \qquad (II.19)$$

называется параметром распределения линейчатой поверхности. У конической поверхности этот параметр равен нулю, а у цилиндрической — стремится к бесконечности. У поверхности с произвольным расположением особых точек невозможно указать, чему равен параметр распределения, так как при перемещении по кривой, пересекающей прямолинейные образующие, параметр распределения непрерывно меняется.

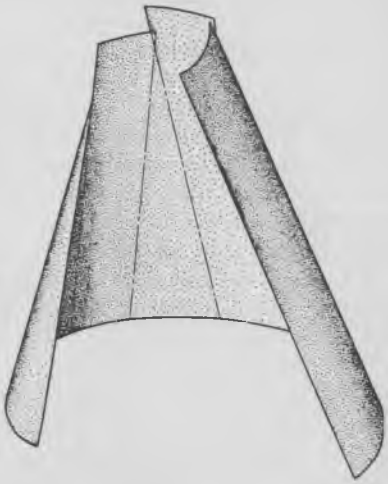

Рис. 33. Полипараметрическая развертывающаяся поверхность.

Поверхности нулевой гауссовой кривизны с произвольным расположением особых точек названы *полипараметрическими* развертывающимися поверхностями, в отличие от известных конических, цилиндрических и поверхностей с ребром возврата, у которых положение особых точек упорядочено.

Условия, при которых на заданные кривые или контур может быть натянута только одна развертывающаяся поверхность, могут быть получены на основании свойства о неизменности касательной плоскости вдоль прямолинейной образующей поверхности. С другой стороны, взаимное положение прямолинейных образующих определяет форму поверхности. У любой развертывающейся поверхности, за исключением плоскости, через каждую точку проходит только одна прямолинейная образующая. Следовательно, говорить о единственности поверхности — это значит говорить о единственно возможном расположении прямолинейных образующих.

Для определения положения прямолинейных образующих при натягивании развертывающейся поверхности на две заранее

заданные кривые необходимо на этих кривых найти такие точки, у которых касательные расположены в одной плоскости. Если каждой точке одной кривой соответствует только одна такая точка на другой кривой, то положение прямолинейной образующей определяется однозначно. Если же таких точек на второй кривой больше одной, то говорить о единственности поверхности нельзя. В зависимости от вида кривых, на которые натягивается развертывающаяся поверхность, условия о ее единственности формулируются следующим образом.

Если заданы две непрерывные кривые, расположенные в параллельных плоскостях, и если каждой точке одной кривой соответствует только одна точка на другой кривой с равной производной (условие параллельности касательных), то на такие две кривые может быть натянута только одна развертывающаяся поверхность, особые точки которой расположены вне области, ограниченной заданными кривыми, и вне самих кривых.

Если заданы две пространственные кривые и каждой взятой точке одной кривой соответствует только одна точка на другой кривой, касательная в которой лежит в одной плоскости с касательной взятой точки, то на эти кривые может быть натянута только одна развертывающаяся поверхность, особые точки которой расположены вне ограниченной кривыми области и вне этих кривых.

Если на заданном пространственном контуре существуют две такие точки, которые делят его на кривые, отвечающие предыдущим условиям единственности, то на такой замкнутый контур может быть натянута только одна развертывающаяся поверхность с особыми точками вне контура.

Если допустить возможность расположения особых точек на заданных кривых или на контуре, то можно натянуть много различных развертывающихся поверхностей, принимая разные точки заданных кривых за вершины конических поверхностей.

Вывод о возможности натянуть на две кривые множество развертывающихся поверхностей имеет очень большое практическое значение для проектирования судов с РО. Это обстоятельство позволяет делать разные варианты обводов, среди которых можно найти подходящие по гидродинамическим, конструктивным и другим качествам.

§ 6

Метод построения теоретического чертежа судна с РО

Для построения полипараметрических развертывающихся поверхностей нецелесообразно применять описанные выше методы построения теоретического чертежа, так как, проектируя обводы, невозможно создать нужную форму при зависимости от килевой, скуловой и бортовой линий. Значительно сокращает

возможности проектирования необходимость выносить построения за пределы сетки теоретического чертежа. Именно последнее обстоятельство не позволяет проектировать большие суда с коническими обводами, так как нанесение вершины конуса при построении требует дополнительной площади плаза.

Разработать такой метод построения обводов из развертывающихся поверхностей, который не отличался бы большой сложностью и давал возможность проектировать форму корпуса с хорошо обтекаемыми обводами, удалось на основании следующих выводов.

На рис. 34 показаны поверхность с ребром возврата и полипараметрическая развертывающаяся поверхность, рассеченные рядом параллельных плоскостей. Секущие плоскости P_1, P_2, P_3 расположены на равных расстояниях (это сделано для дальнейших выводов, но не является обязательным условием). На одной из прямолинейных образующих построена касательная плоскость Q.

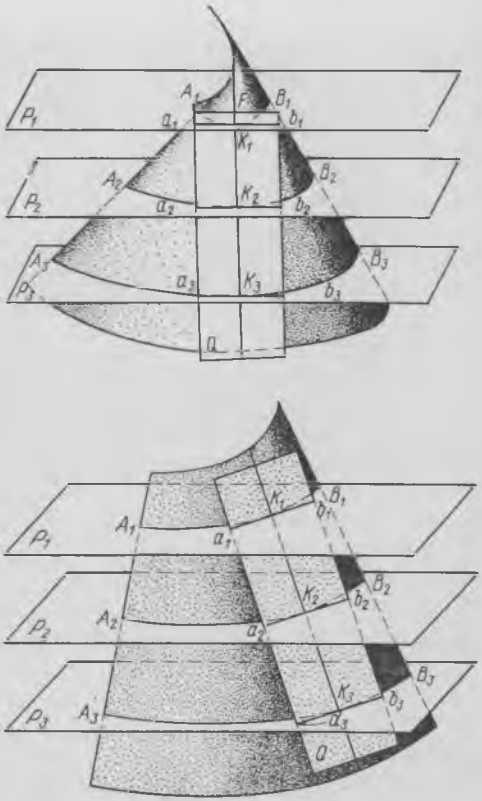

Рис. 34. Сечения развертывающихся поверхностей параллельными плоскостями: вверху — поверхность с ребром возврата, внизу — полипараметрическая развертывающаяся поверхность.

Секущие плоскости P_1, P_2, P_3 пересекаются с поверхностью по кривым A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3 и одновременно пересекают касательную плоскость Q по прямым a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3. Прямые a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3 являются касательными к соответствующим кривым A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3 и лежат в одной плоскости Q, так как являются линиями пересечения плоскости Q параллельными плоскостями P_1, P_2, P_3. Следовательно, прямые a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3 параллельны между собой и касаются поверхности в точках, принадлежащих одной прямолинейной образующей.

На этом свойстве и основан метод построения обводов из развертывающихся поверхностей. Если поверхность задана в виде ряда кривых, лежащих в параллельных плоскостях, то для того, чтобы поверхность была развертывающейся, необходимо и достаточно, чтобы в точках пересечения кривых с прямолинейными образующими касательные к кривым на каждой образующей были параллельны между собой.

При построении обводов судов используется каркасный метод задания поверхности. На теоретический чертеж наносят сечения корпуса тремя семействами взаимно перпендикулярных

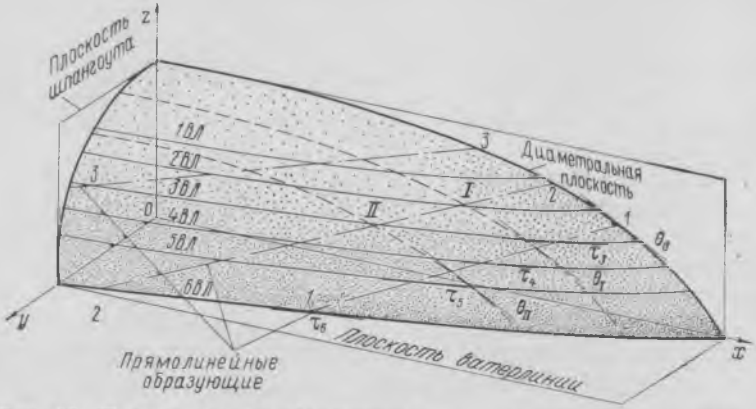

Рис. 35. Прямолинейные образующие поверхности судна с развертывающейся обшивкой.

плоскостей. Задавая батоксы, ватерлинии и шпангоуты, практически полностью определяют форму судовой поверхности. Если же судно проектируется из развертывающихся поверхностей, то сечения, показанные на теоретическом чертеже, должны удовлетворять следующему геометрическому условию: через каждую точку поверхности должна проходить прямолинейная образующая, а в точках пересечения батоксов, ватерлиний и шпангоутов с любой прямолинейной образующей касательные к ним должны быть параллельны между собой.

Следует отметить еще одно важное обстоятельство, которое можно использовать при построении обводов из развертывающихся поверхностей: сечения, как правило, расположены на равных расстояниях, поэтому прямолинейная образующая делится ими на равные отрезки.

На рис. 35 показаны три батокса, семь ватерлиний и три прямолинейные образующие, принадлежащие судовой поверхности. В точках пересечения батоксов с образующей *1—1* касательные к батоксам θ_0, θ_I и θ_{II} параллельны между собой. В точках пересечения образующей *1—1* с ватерлиниями *3*, *4*, *5* и *6* касательные к ватерлиниям τ_3, τ_4, τ_5, τ_6 также параллельны ме-

жду собой. Следовательно, на проекциях теоретического чертежа на одной и той же образующей касательные должны быть параллельны между собой и тогда, когда они проведены к батоксам на проекции «бок», и тогда, когда они проведены к ватерлиниям на проекции «полуширота», и тогда, когда они проведены к шпангоутам на проекции «корпус».

Выполнение всех перечисленных условий дает способ построения прямолинейных образующих поверхности судна с развертывающейся обшивкой в общепринятой сетке теоретического чертежа. Пример построения обводов из развертывающихся поверхностей показан на рис. 36. Для простоты выбран вариант с острой скулой.

На проекциях «бок» и «полуширота» тонкими линиями наносят проекции борта, скулы и диаметрального батокса. На проекции «полуширота» намечается главная ватерлиния, а на проекции «корпус» — миделевый шпангоут. Затем на проекции «бок» наносится какой-нибудь батокс (например, *I*) с учетом имеющихся точек этого батокса на главной ватерлинии и на шпангоуте, а также на скуловой и бортовой линиях. На боковой проекции диаметрального батокса выбирается какая-нибудь точка *д′*, в которой строится касательная к диаметральному батоксу. Параллельным перемещением угольника на батоксе I находят точку *г′*, в которой касательная параллельна касательной к диаметральному батоксу в точке *д′*. Точки *г′* и *д′* соединяют прямой линией, которая и должна быть прямолинейной образующей поверхности. Чтобы проверить это условие, необходимо выполнить следующее построение: продолжить прямую и найти точку *е′* ее пересечения со скуловой линией; найти проекции *д*, *г* и *е* на «полуширотe». Если точки *д*, *г* и *е* лежат на одной прямой, то это значит, что заданные кривые — диаметральный батокс, батокс *I* и скуловая линия принадлежат одной развертывающейся поверхности. Если точки *д*, *г* и *е* не лежат на одной прямой, то нужно изменить какую-нибудь из заданных линий корпуса. Таким же путем строят остальные образующие поверхности.

Когда прямолинейные образующие найдены на обеих проекциях, можно по точкам пересечения этих образующих с линиями сетки построить недостающие батоксы и ватерлинии. Шпангоуты получаются плавными без дополнительных согласований.

На рис. 37 показана носовая оконечность судна с хорошо обтекаемой формой обводов с развертывающейся наружной обшивкой. Для ее построения на проекции «бок» наносятся линии диаметрального, батоксов I и II, на проекции «полуширота» намечается главная ватерлиния, а на проекции «корпус» — характерный шпангоут. Все линии выполняются тонкими и согласуются по сетке теоретического чертежа. Перемещением угольника по линейке определяют точки с параллельными касательными на имеющихся батоксах. Батоксы корректируют таким

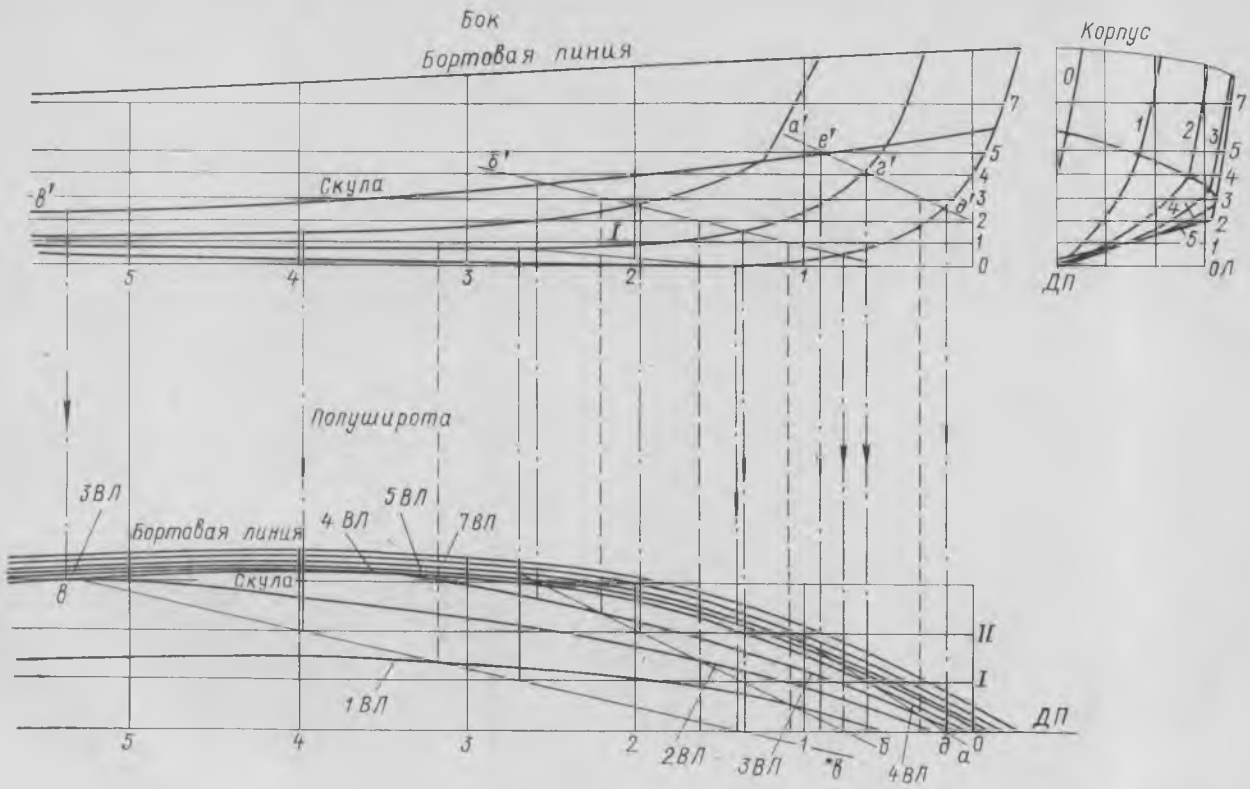

Рис. 36. Построение остроскуловых обводов судна с развертывающейся обшивкой.

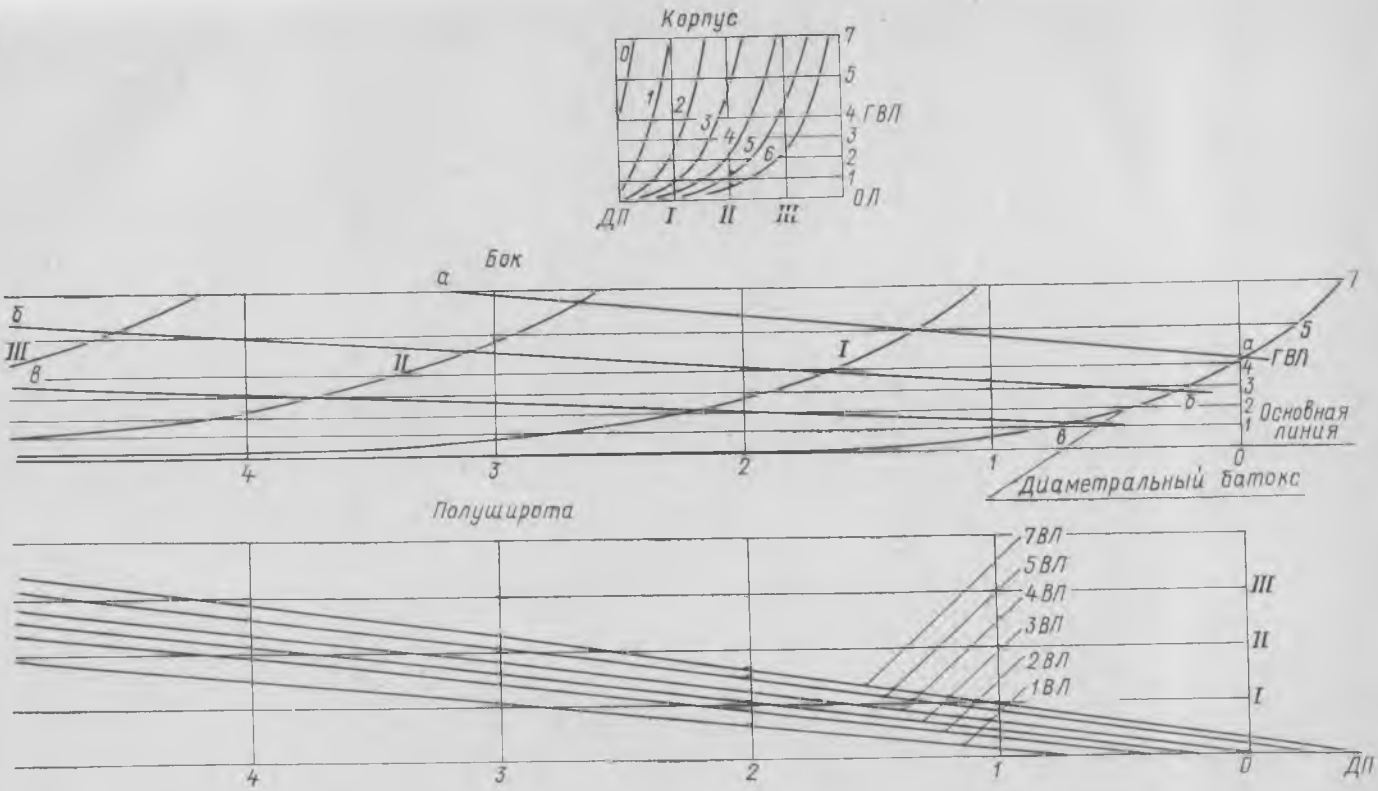

Рис. 37. Построение носовой оконечности хорошо обтекаемых обводов из развертывающихся поверхностей.

образом, чтобы через точки с параллельными касательными проходила прямая. После нанесения нескольких прямолинейных образующих на проекции «бок» (*а*, *б*, *в*) все они проектируются на «полушироту» по линиям сетки теоретического чертежа. По точкам пересечения ватерлиний с батоксами и полученными прямолинейными образующими строятся все ватерлинии. В точках пересечения ватерлиний с прямолинейными образующими касательные должны быть параллельны между собой.

После того как все ватерлинии и батоксы согласованы между собой, по сетке теоретического чертежа и по прямолинейным образующим строятся все шпангоуты. Если форма шпангоутов не соответствует желаемой, то нужно изменить форму батоксов и снова выполнить все согласование по прямолинейным образующим. Для того, чтобы избежать такого повторного согласования, можно батоксы построить по намеченным заранее шпангоутам.

Построение можно выполнять по проекции «корпус». Для этого нужно нарисовать тонкими линиями желаемую форму шпангоутов и по ним найти положение прямолинейных образующих с помощью параллельного перемещения угольника. Для того чтобы не пользоваться при этом другими проекциями, нужно использовать условие равноотстояния всех шпангоутов. Точки пересечения прямолинейной образующей с равноотстоящими сечениями шпангоутов, ватерлиний и батоксов находятся на равных расстояниях друг от друга.

При построении следует помнить, что чем больше сечений пересекается каждой прямолинейной образующей, тем точнее удовлетворяется условие развертываемости поверхности.

По затратам времени согласование такого теоретического чертежа не отличается от обычного. Точность согласования, как всегда, зависит от точности выполнения сетки теоретического чертежа. Из примеров видно, что согласование теоретического чертежа по прямолинейным образующим развертывающейся поверхности проще, чем все описанные раньше методы.

Предлагаемый метод обладает следующими преимуществами. Во-первых, все построение выполняется в общепринятой сетке теоретического чертежа без громоздких построений. Касательные и прямолинейные образующие не затемняют теоретических линий. При некотором навыке касательные можно не проводить, отмечая только необходимые точки. Во-вторых, построение осуществляется по линиям общепринятых сечений: батоксам, ватерлиниям и шпангоутам. Характер этих линий может быть выдержан в процессе построения таким, как нужно. Линии борта и скулы, хотя и определяются заранее, но получаются как линии персечения палубы, бортовой поверхности и днищевой поверхности.

С помощью этого метода можно не только строить новые обводы, но проверять существующие с точки зрения развертывае-

мости обшивки. Соединение точек сечений с параллельными касательными плавной линией покажет степень их отклонения от прямолинейной образующей. По этим отклонениям легко судить о том, как следует скорректировать сечения, чтобы поверхность стала развертывающейся.

§ 7

Метод проектирования хорошо обтекаемых обводов судов с РО

У хорошо обтекаемых обводов изломы судовой поверхности находятся только у киля, у борта и у транца, если корма транцевая. Если проектировать такие обводы из развертывающихся поверхностей, то простейшая судовая форма, которая получается из плоского листа соответствующим раскроем и изгибом, имеет вид, показанный на рис. 38, *а*. На рис. 38, *б* представлена форма из двух таких листов, похожая на форму шлюпки. На рис. 38, *в* видно, как можно из таких листов получить шлюпку с транцем. Легко заметить, что прямолинейные образующие расходятся от носа к корме. Для судов с хорошо обтекаемыми обводами характерно расположение самого широкого шпангоута не в корме, а в средней части. Совершенно очевидно, что из одного куска поверхности, даже выгнутого самым искусным образом, невозможно получить полностью всю судовую поверхность корпуса с хорошо обтекаемыми обводами. Однако, если оставить какие-нибудь участки наружной обшивки с двоякой кривизной, то можно получить бо́льшую часть поверхности развертывающейся без заметных изменений формы корпуса по сравнению с обычной. Если судовую поверхность разделить на две или на три части (рис. 39, *а* и 39, *б*), то можно получить судовую обшивку развертывающейся на 90—95%, не нарушая необходимой плавности обводов.

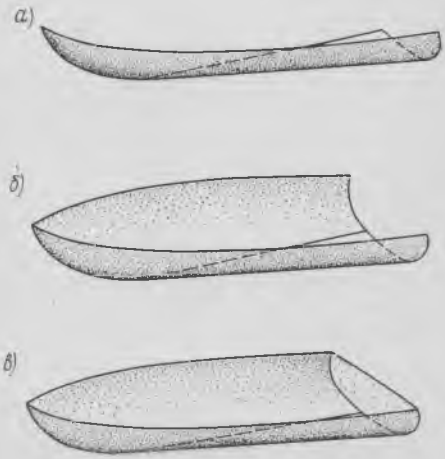

Рис. 38. Получение судовой формы путем изгибания криволинейного плоского треугольника.

При разработке хорошо обтекаемых обводов выполняется натягивание развертывающейся поверхности на замкнутый контур. На рис. 39 видно, что контуры представляют собой

пространственные криволинейные треугольники ABC, $A'B'C'$, $K'L'M'$ и пространственные криволинейные четырехугольники $DEFG$ и $D'E'F'G'$. В отличие от случая, когда опорными являются две пространственные кривые, при натягивании развертывающейся поверхности на замкнутый пространственный треугольник добавляются ограничения со стороны третьей замыкающей линии. На такой контур может быть натянуто много разных поверхностей. Если выбрать вершины конуса на гранич-

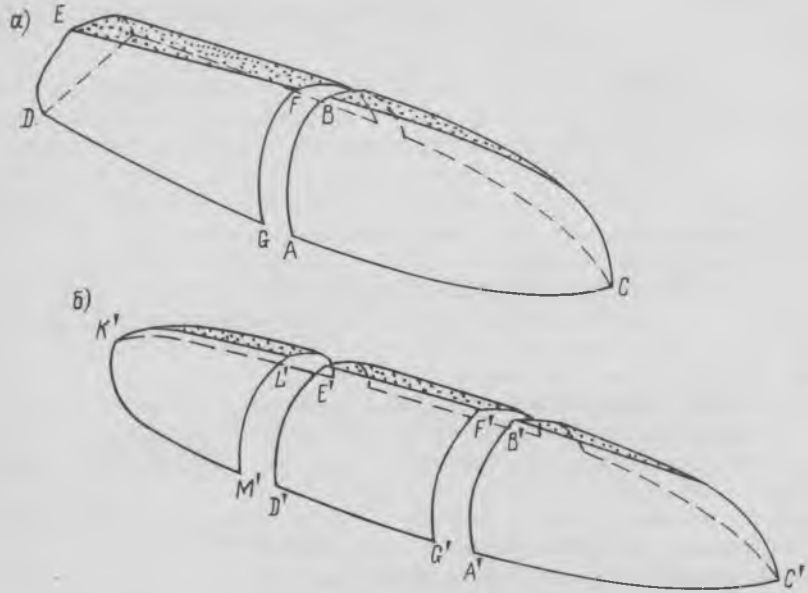

Рис. 39. Образование судовых обводов из развертывающихся поверхностей: *а* — обводы без цилиндрической вставки; *б* — обводы с цилиндрической вставкой.

ной кривой и соединить ее прямыми с остальными точками контура, то получается поверхность со сломом, который пройдет по прямой, соединяющей вершину конуса с какой-нибудь вершиной углов треугольника. Это легко себе представить. Если направляющая конической поверхности — плавная линия, то поверхность получается гладкой, если же на направляющей есть слом, то на поверхности также получится слом. Это обстоятельство необходимо при проектировании учитывать.

Применяя метод согласования теоретического чертежа по прямолинейным образующим, можно проектировать обводы различной формы, изменяя направления образующих. В § 6 при описании метода построения чертежа показаны две разные формы обводов. На каждом из этих примеров главная ватерлиния задается в качестве исходной информации. Однако при дальнейшем проектировании форма этой ватерлинии очень

сильно влияет на форму остальных ватерлиний. Это связано с тем, что поверхность должна иметь заданную гауссову кривизну.

Для оценки степени влияния нулевой гауссовой кривизны на форму обводов пришлось выполнить исследование распределения кривизны по линиям сечений теоретического чертежа. Значение аналитической плавности сечений было в свое время проанализировано и проверено экспериментально Тидеманом. Он изготовил и испытал две модели. У одной модели ватерлинии были выполнены в виде математически правильных кривых синверсов, а у второй — подобными же линиями, но вычерченными на глаз. Затем длина корпуса была уменьшена на 27% путем сжатия при прежнем согласовании обводов. Испытания показали, что от этого сжатия правильная модель потеряла в скорости 3%, а вторая — 39%. Это обстоятельство пришлось учесть при выборе форм корабельных кривых для анализа влияния кривизны на качество обводов.

Анализ показал, что изменение кривизны по длине сечений у поверхностей, заданных аналитически, менее резко, чем у поверхностей, заданных сечениями. В целом же распределение кривизны у разных обводов оказалось настолько различным, что общую закономерность установить не удалось. Гораздо большее значение имеет изменение вдоль сечений первой производной, определяющей положение касательных к ним. Это позволяет надеяться, что те ограничения, которые накладываются на кривизну обводов при проектировании их из поверхностей нулевой гауссовой кривизны, никак не повлияют на гидродинамическое качество, если форма ватерлиний будет отвечать требованиям ходкости.

Для использования всего накопленного опыта проектирования хорошо обтекаемых обводов, рекомендаций по выбору оптимальных коэффициентов формы, углов входа ватерлиний, углов наклона батоксов, положения центра величины, длины оконечностей и т. д. необходимо сохранить принцип деления корпуса на носовую и кормовую оконечности и цилиндрическую вставку. Кроме того, необходимо сохранить ту степень плавности обводов, которая требуется для безотрывного обтекания.

При проектировании обводов из развертывающихся поверхностей обеспечить плавность в подводной части носовой оконечности несложно. Цилиндрическая вставка сама по себе является развертывающейся. Достаточно просто спроектировать из развертывающихся поверхностей надводную часть кормовой оконечности. Самыми трудоемкими и требующими большого опыта проектирования судов с РО являются кормовые тоннели, бульбовые наделки и развалы в надводной части носовой оконечности.

Для обеспечения развала носовых шлангоутов при проектировании судов с РО в качестве опорных сечений нужно

выбирать не ватерлинии, а шпангоуты. На проекции «корпус» нужно наметить несколько носовых шпангоутов, начиная с нулевого. Нулевой шпангоут, как правило, служит первым опорным. В качестве второго опорного выбирается тот, который имеет ширину у борта несколько меньшую, чем ширина цилиндрической вставки или на миделе, но расположен к ним ближе других. Определение направления прямолинейных образующих следует начинать с подводной части. При этом, как правило, шпангоуты в подводной части получаются U-образными. При переходе от подводной части к развалу шпангоутов над действующей ватерлинией приходится менять направление образующих. Их шаг по нулевому шпангоуту увеличивается, а по второму опорному резко уменьшается. При этом в месте перехода появляется конический или плоский участок поверхности (рис. 40).

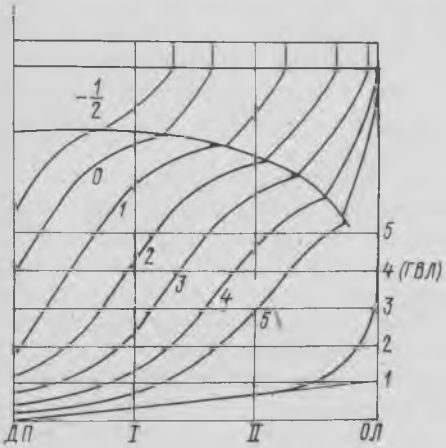

Рис. 40. Проектирование из развертывающихся поверхностей обводов с развалом носовых шпангоутов.

Принципиальное отличие обводов, имеющих развал носовых шпангоутов, от обводов без развала проявляется при выделении участков с двоякой кривизной. Если носовые шпангоуты с развалом, то появляются два неразвертывающихся участка поверхности. Один неразвертывающийся участок приходится делать возле верхней части форштевня, а второй — при переходе на цилиндрическую вставку в надводной части. Если носовые шпангоуты не имеют развала, то переход от носовой оконечности к цилиндрической вставке в надводной части получается практически развертывающимся. В отдельных случаях, когда длина носовой оконечности большая, можно обеспечить развал носовых шпангоутов, сохраняя развертываемость обшивки на форштевне.

Проектирование из развертывающихся поверхностей обводов с бульбом в носовой или кормовой оконечности требует особого подхода. Бульб представляет собой поверхность с ярко выраженной двоякой кривизной, но если рассматривать отдельные его сечения, то можно выбрать те участки, которые нужно оставить неразвертывающимися, чтобы большую часть бульбы выполнить из развертывающихся поверхностей без ущерба для формы (рис. 41).

Особые трудности появляются при проектировании из развертывающихся поверхностей тоннелей, обеспечивающих подток

воды и защиту полупогруженных винтов, винтов в направляющих или поворотных насадках. Эту задачу удается решить, если правильно выбрать граничные шпангоуты. В зависимости от формы тоннель разбивается на две или три части по длине. Первая часть представляет собой переход от цилиндрической вставки на ту часть днища, которая имеет хотя бы слабо выраженные признаки тоннеля. Эта часть поверхности остается неразвертывающейся. Первый же шпангоут с тоннельной кормой делается граничным. Второй граничный шпангоут выбирается либо в конце тоннеля, если тоннель плавно поднимается к корме, либо перед переходом на цилиндрическую часть тоннеля. Граничный шпангоут можно выбирать на входе в насадку. В этом месте можно допустить небольшой слом, так как натекающий поток все равно разбивается кромками насадки. Часть потока засасывается насадкой, а остальная часть обтекает корпус и насадку снаружи. Слом, который получается на поверхности, не может оказать существенного влияния на сопротивление, тем более, что угол слома может отличаться от 180° незначительно. В этом случае два участка имеют общий граничный шпангоут. Пример таких обводов показан дальше на рис. 71. Корма состоит из двух развертывающихся участков, состыкованных по 18,5 шпангоуту.

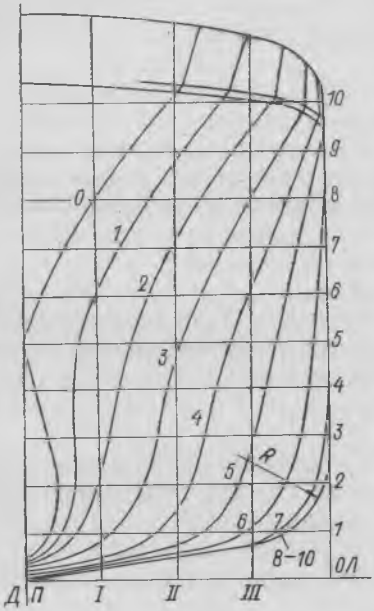

Рис. 41. Проектирование из развертывающихся поверхностей носовой оконечности с бульбом.

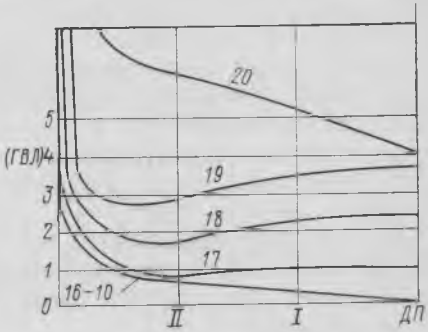

Рис. 42. Тоннельная корма одновинтового судна с развертывающейся обшивкой.

Тоннельная корма с винтом на ДП показана на рис. 42. Развертывающийся участок ограничен 17 и 19 шпангоутами. Неразвертывающимися остались части днища между 16 и 17 шпангоутами и между 19 шпангоутом и транцем. Бортовые участки поверхности корпуса обычно получаются развертывающимися.

Выбор наиболее удачного варианта обводов при проектировании судов с РО требует некоторого терпения, потому что не всегда сразу удается правильно наметить положение граничных шпангоутов и их форму. Но как только они выбраны, дальнейшее согласование затруднений не вызывает.

В особо трудных случаях можно спроектировать участок развертывающейся поверхности из сочетаний конусов, вершины которых расположены на граничных линиях. На рис. 71 такой район расположен на бортовой части тоннеля между 17-м и 18,5 шпангоутами. Такой вариант решения не вызывает графических затруднений, но аналитическое задание для ЭВМ получается громоздким.

Транцевая корма быстроходных судов получается полностью развертывающейся. Ее построение получается по батоксам. Если кормовые ветви батоксов прямые, то они и служат прямолинейными образующими. В качестве граничных линий выбирается транцевая кромка и ближайший к цилиндрической вставке шпангоут. На рис. 43 показаны обводы быстроходного судна с транцевой кормой. Кормовая оконечность этого судна не имеет неразвертывающихся участков.

На рис. 44 показана корма с дейдвудом. При ее проектировании поверхность корпуса делится на три продольные части. Неразвертывающийся участок оставлен между 17-м и 18-м теоретическими шпангоутами возле дейдвуда. В этом месте можно было бы даже оставить слом.

Принципиальной особенностью описанного метода проектирования обводов судов с РО является то, что неразвертывающиеся участки выделяются между шпангоутами, а не тянутся вдоль корпуса. Это дает возможность сделать их в виде отдельных секций. Кроме того, облегчается аналитическое задание поверхности.

Проектирование судна с РО можно выполнять по прототипу. Для этого по проекциям «корпус», «бок» и «полуширота» нужно проанализировать поверхность и выполнить те изменения, которые необходимы, чтобы поверхность стала развертывающейся. При работе с прототипом практически выполняется не проектирование, а аппроксимация обводов развертывающимися поверхностями. Отличие такого метода аппроксимации от описанных раньше только в том, что заменяемые части больше по площади.

При анализе поверхности прототипа не следует стремиться выделять конические и цилиндрические участки. Это не имеет значения. Если же почему-нибудь такой вопрос возникнет, то можно заранее рекомендовать часть носовой оконечности, примыкающую к форштевню, от ГВЛ до верхней палубы делать в виде конуса с вершиной на носовом перпендикуляре. Тогда на ГВЛ у форштевня может получится слом. К такой мере следует прибегать в том случае, когда носовые шпангоуты имеют

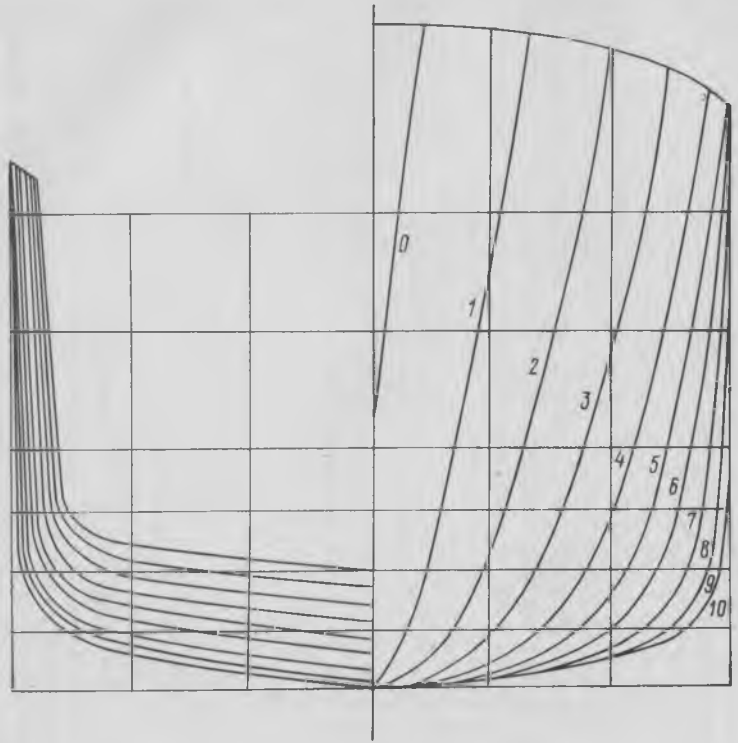

Рис. 43. Обводы из развертывающихся поверхностей быстроходного судна с транцевой кормой.

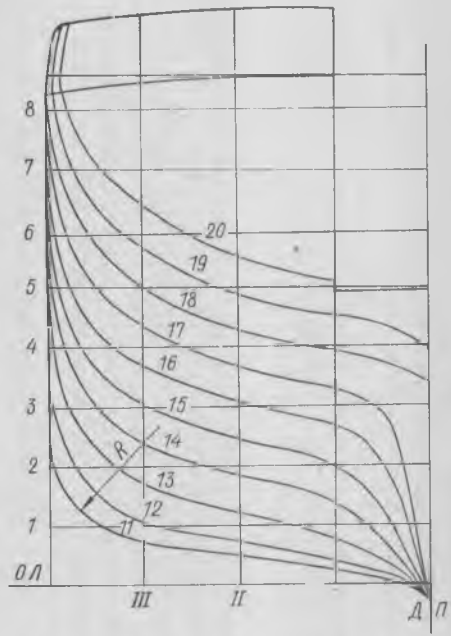

Рис. 44. Обводы из развертывающихся поверхностей кормы рыболовного траулера.

развал. Отгиб шпангоутов целесообразно начинать от прямолинейной образующей, проходящей через крайнюю палубную точку носового конуса до граничного шпангоута носовой оконечности, находящегося на кормовом конце.

Метод замены обычных обводов обводами из развертывающихся поверхностей был применен для речного судна с двумя винтами в насадках. При этом нельзя было вносить большие изменения, так как проект судна был закончен. Такая работа требует больших затрат времени. Первая попытка замены обводов была малообещающей. Однако путем многочисленных проб удалось получить форму, довольно близкую к исходной (см. рис. 70). Деление поверхности на развертывающиеся и неразвертывающиеся участки получилось таким: развертывающиеся участки расположены от форштевня до 2-го теоретического шпангоута, от 2,5 до 4,5 теоретического шпангоута, от 5,5 до 16,5 — цилиндрическая вставка, от 17-го до 19,5 теоретического шпангоута, на транцевом закруглении и на фальшборте; неразвертывающимися остались части поверхности от 2-го до 2,5 шпангоута, от 4,5 до 5,5, от 16,5 до 17-го теоретического шпангоута и в кормовой части днища от 19,5 до 20-го шпангоута.

На основании приведенных здесь и других многочисленных примеров следует отметить, что при разработке любого теоретического чертежа выполнять его согласование нужно не только по сетке, но и по прямолинейным образующим, конечно, в тех местах, где поверхность получается развертывающейся. Тогда сразу можно выделить развертывающиеся участки. В процессе создания теоретического чертежа гораздо легче внести в обводы те небольшие изменения, которые необходимы, чтобы большая часть обшивки была развертывающейся, чем разрабатывать развертывающийся вариант обводов по прототипу.

§ 8

Результаты сравнительных модельных испытаний судов с РО

Обводы, спроектированные из развертывающихся поверхностей, отличаются от обычных тем, что их гауссова кривизна равна нулю на большей части судовой поверхности. У обычных обводов гауссова кривизна отрицательна в тех местах, где одни сечения вогнутые, а перпендикулярные к ним — выпуклые. В тех местах, где сечения выпуклые по всем направлениям, гауссова кривизна положительна. При проектировании судов с РО практически по определенным направлениям выпуклые или вогнутые сечения заменяются близкими к ним прямыми линиями. При этом претерпевает изменения местная кривизна судовой поверхности.

Влияние местной кривизны на сопротивление очень сложно. С одной стороны, форма обводов влияет на потенциальный поток, изменяя распределение гидродинамических давлений, а с другой стороны, от давления в потенциальном потоке зависит характер движения частиц в пограничном слое. На основании решения задачи о сопротивлении трения цилиндрических тел и тел вращения сделаны выводы о том, что продольная кривизна влияет на сопротивление трения при двухмерном обтекании больше, чем при трехмерном. Влияние продольной кривизны на сопротивление трения зависит от отношения L/B судна. При изменении L/B от 6 до 12 надбавка на кривизну меняется соответственно от 4 до 1%. Поперечная кривизна влияет на сопротивление трения в тех случаях, когда она очень велика, т. е. радиус закругления соизмерим с толщиной пограничного слоя.

При проектировании обводов из развертывающихся поверхностей общая кривизна сохраняется такой же, как и у обычных обводов, потому что отношения L/B, B/T и коэффициенты полноты φ и δ сохраняются. Следовательно, влияние общей кривизны на сопротивление у судов с РО должно быть таким же, как у обычных обводов. Изменение местной кривизны, выражающееся в ее более равномерном распределении везде, кроме неразвертывающихся участков, не должно влиять на общее сопротивление воды движению судна.

Для проверки гидродинамического качества обводов судов с РО были выполнены сравнительные модельные испытания для разных типов судов. В качестве прототипов выбирались суда с высоким гидродинамическим качеством, обводы которых отрабатывались с помощью серийных испытаний. Для сравнения были выбраны грузовой катамаран грузоподъемностью 1000 т, пассажирский катамаран для местных линий, речные суда типа «Севан» и «Родина». Кроме этого, была разработана и испытана серия моделей с РО для судна со сверхкритической скоростью.

Первая серия моделей разработана для сравнения с моделью грузового катамарана. Причем в качестве эталона была выбрана лучшая модель из 17 вариантов с обычными обводами. Она показана на рис. 45, *а*. У обводов этой модели S-образные ватерлинии и V-образные шпангоуты, крейсерская корма плавно переходит к миделю. Цилиндрическая вставка отсутствует. Первый вариант обводов с РО спроектирован с сохранением формы главной ватерлинии настолько, насколько это возможно при отсутствии S-образности. Миделевый шпангоут сохранен таким же, как у исходной модели. Характер формы кормовой оконечности тоже сохранен. За счет замены поверхности развертывающейся произошло незначительное перераспределение водоизмещения по длине, x_0 и φ сохранены. Обводы с РО показаны на рис. 45, *б*.

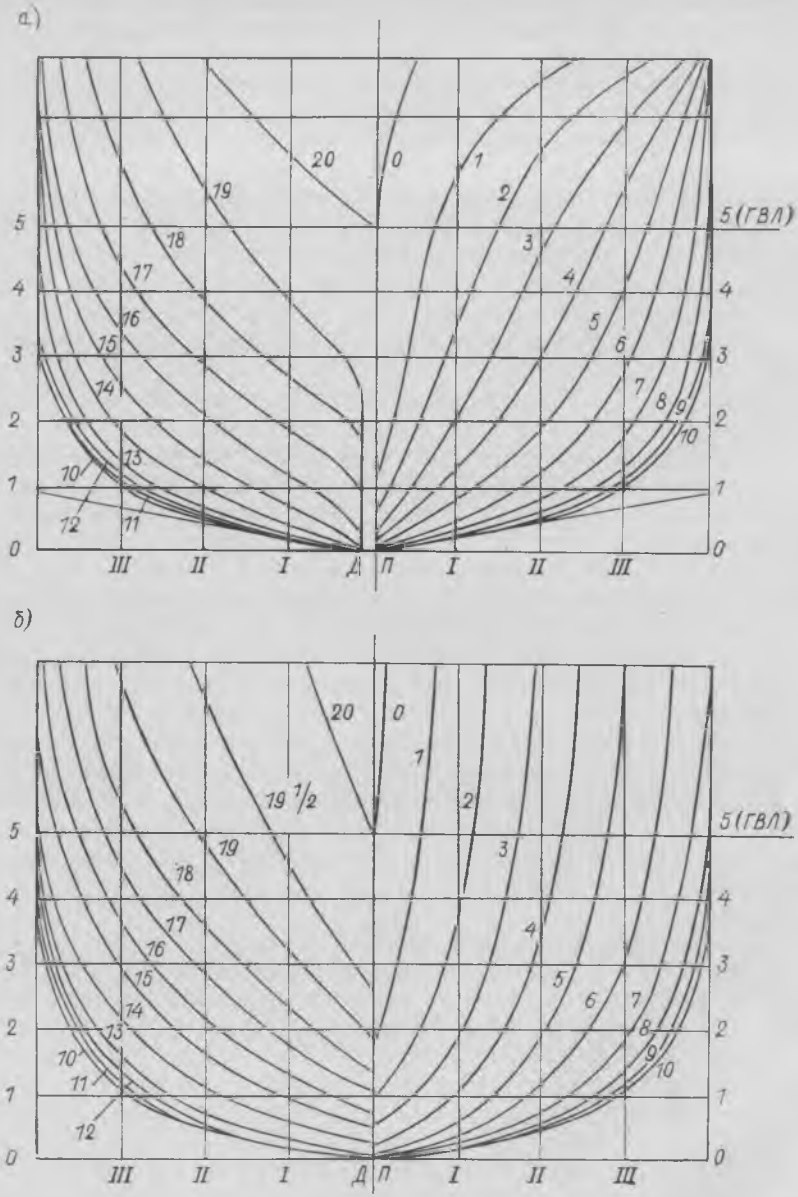

Рис. 45. Грузовой катамаран: *а* — обычные обводы; *б* — обводы из развертывающихся поверхностей.

Второй вариант обводов с РО спроектирован с помощью макетирования. В предположении, что упругие деформации бумаги соответствуют упругим деформациям тонких листов металлической обшивки, был изготовлен контур, состоящий из диаметрального батокса, линии палубы и 8 теоретического шпангоута. Технология такого метода определения формы обводов показана на рис. 46 и 47. С помощью контршаблонов шпангоутов, снятых с макета, строится «корпус». В отличие от первого варианта обводов с РО у второго варианта палуба сделана несколько полнее (рис. 48). Данные по всем трем моделям приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики корпуса	Грузовой катамаран		
	Обычные обводы	Обводы с РО, вариант I	Обводы с РО, вариант III
Длина расчетная L, м	93	93	93
Ширина корпуса $B_к$, м	6,02	6,02	6,02
Осадка T, м	2,9	2,9	2,9
Ширина судна B, м	15,64	15,64	15,64
Водоизмещение D, т	1720	1700	1710
Коэффициент:			
полноты α	0,759	0,745	0,799
полноты β	0,855	0,850	0,858
общей полноты δ	0,530	0,522	0,525
Абсцисса:			
центра величины x_c, м	—1,87	—1,87	—1,49
центра тяжести ГВЛ x_f, м	—3,04	—4,18	—0,94
Угол входа ГВЛ	6° 10′	5° 30′	12° 45′

Кривые буксировочного сопротивления грузового катамаранного теплохода с обычной и развертывающейся обшивкой показаны на рис. 49. Следует заметить, что достижение высокого гидродинамического качества катамаранных судов с РО значительно сложнее, чем однокорпусных. Объясняется это очень низким коэффициентом остаточного сопротивления катамаранных судов. Почти полное отсутствие волнообразования приводит к тому, что остаточное сопротивление зависит от формы обводов значительнее, чем у обычных судов. Даже небольшие изменения формы вызывают существенное изменение остаточного сопротивления. Тем не менее, как видно из рис. 49, сопротивление модели с I вариантом обводов на рабочей скорости $Fr = 0{,}26$ ($v = 27$ км/ч) имеет такое же значение, как у исходной. Сопротивление модели со II вариантом обводов больше, что можно объяснить резким увеличением угла входа ватерлиний.

Вторая серия состоит тоже из трех моделей. Цель проведения испытаний этой серии заключалась в том, чтобы сравнить предлагаемый метод проектирования с методом проектирования

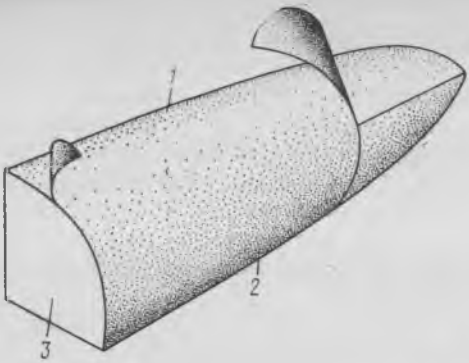

Рис. 46. Натягивание обшивки на макете носовой оконечности:

1 — диаметральный батокс; *2* — ватерлиния; *3* — шпангоут.

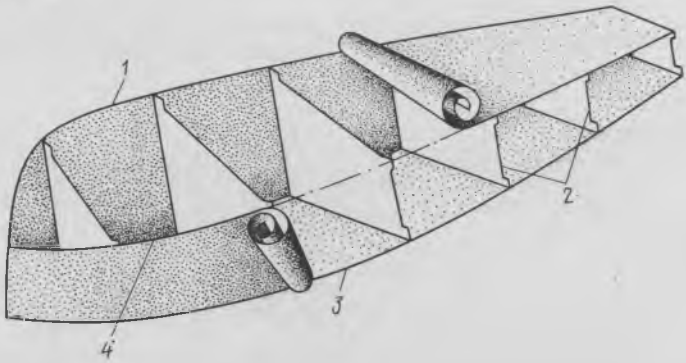

Рис. 47. Натягивание обшивки борта и днища на макете остроскулого судна:

1 — диаметральная плоскость; *2* — плоскости шпангоутов; *3* — ватерлиния; *4* — скула.

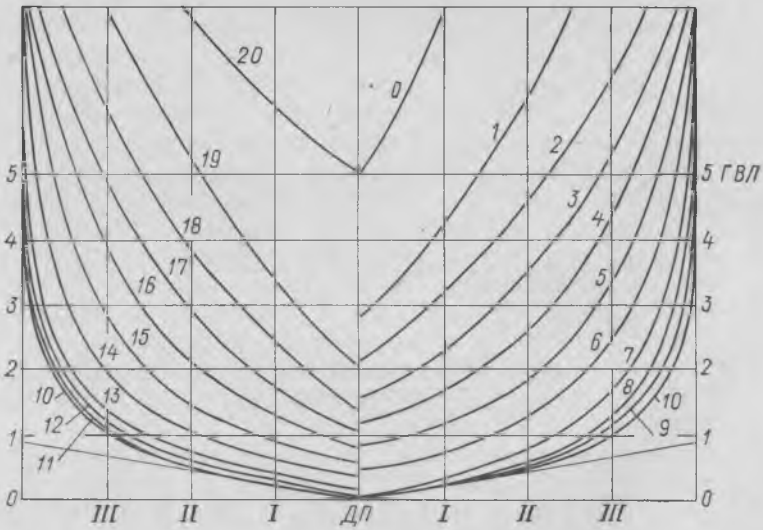

Рис. 48. Вариант II обводов грузового катамарана из развертывающихся поверхностей, полученный путем макетирования.

конических обводов. В качестве прототипа для сравнения был выбран речной теплоход типа «Родина». Для обводов этого судна характерна резко выраженная S-образность ватерлиний в подводной части. Корма крейсерского типа. Цилиндрическая вставка составляет 15% длины корпуса. Рабочая скорость соот-

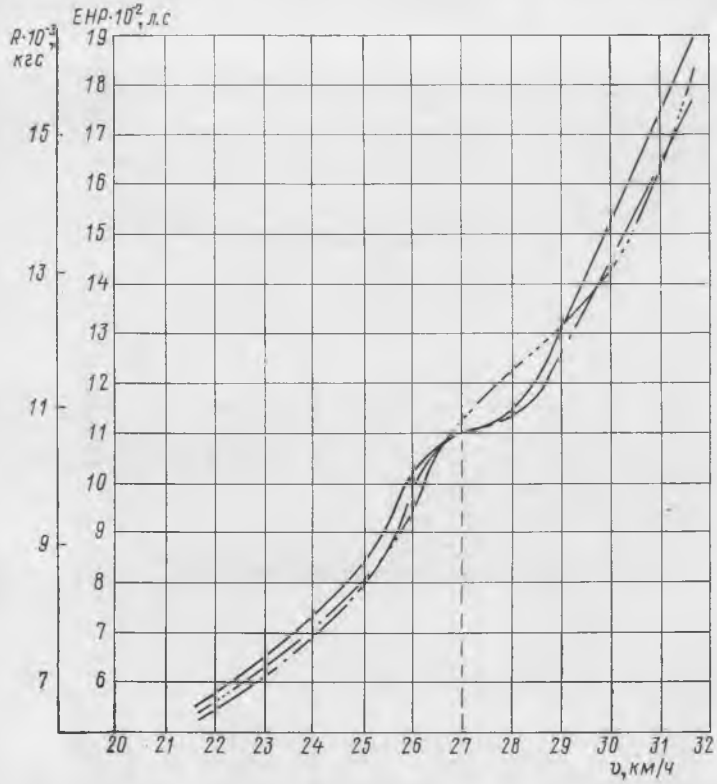

Рис. 49. Кривые буксировочного сопротивления трех моделей грузового катамарана.

—— обычные обводы, —·—·— I вариант обводов с РО, —···— II вариант обводов с РО.

ветствует числу Fr = 0,22. Это судно было выбрано как менее всего подходящее для замены обшивки развертывающейся.

Обводы самого судна «Родина» показаны на рис. 50, *а*. Первая модель с РО спроектирована по описанному выше методу. Длина цилиндрической вставки увеличена до 20% длины между перпендикулярами. Шпангоуты и ватерлинии носовой оконечности слегка выпуклые. Шпангоуты кормовой оконечности не имеют перегибов. Неразвертывающиеся участки остались в районе 6—7 теоретического шпангоута и возле 13 теоретического шпангоута. Вторая модель выполнена с коническими

обводами, получившими распространение за границей. Круглая скула заменена цилиндрической полосой, для чего введены два слома. Вся поверхность образована сочетанием конических участков. Обводы обеих моделей с РО показаны на рис. 50, *б*, *в*.

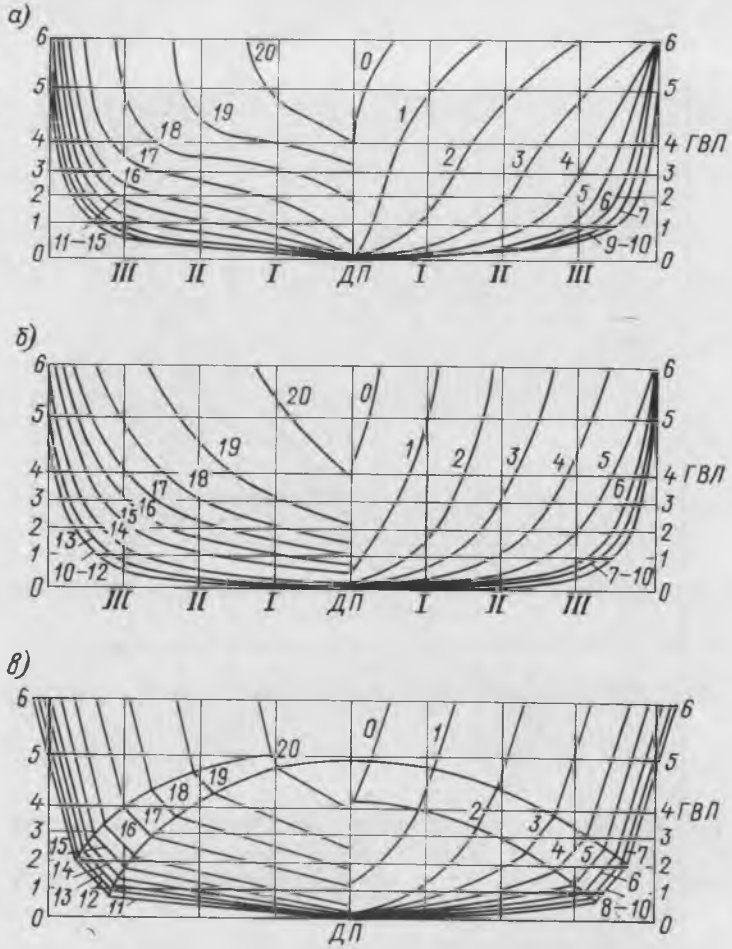

Рис. 50. Обводы речного судна типа «Родина»: *а* — исходный вариант с обычными обводами; *б* — обводы с РО; *в* — упрощенные обводы.

Данные по размерениям и характеристики моделей приведены в табл. 2.

Результаты буксировочных испытаний моделей показаны на рис. 51. Из сравнения кривых видно, что на эксплуатационной скорости $v = 23$ км/ч ($\mathrm{Fr} = 0{,}22$) исходные и обводы с РО

Таблица 2

Характеристики корпуса	Обводы речного теплохода типа „Родина"		
	обычные	с РО	упрощенные
Длина расчетная L, м	90	90	90
Ширина расчетная B, м	11,6	11,6	11,6
Осадка T, м	2,2	2,2	2,2
Водоизмещение D, т	1313	1313	1313
Коэффициент:			
полноты α	0,780	0,765	0,775
полноты β	0,870	0,865	0,865
общей полноты δ	0,572	0,572	0,572
Смоченная поверхность S, м²	967,5	960	970
Абсцисса:			
центра величины x_c, м	1,46	0,74	1,35
центра тяжести площади ГВЛ x_f, м	—1,66	—1,83	—0,84
Угол входа ГВЛ	12°	14°	17°

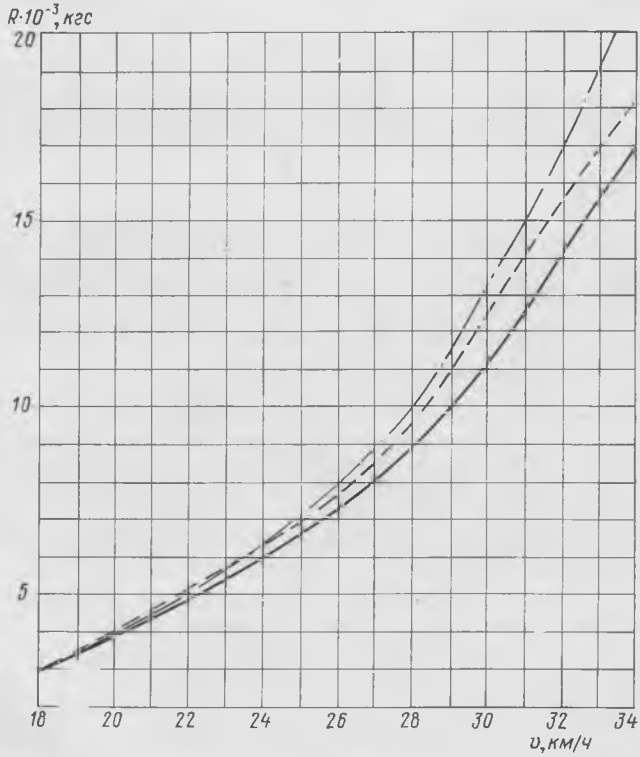

Рис. 51. Кривые буксировочного сопротивления судна типа «Родина»:

— — — исходные обводы, ——— обводы с РО, —·— упрощенные обводы.

имеют одинаковое сопротивление. У упрощенных обводов полное сопротивление на 4% больше.

Чтобы убедиться в закономерности полученных результатов, была спроектирована из развертывающихся поверхностей и испытана в опытовом бассейне модель речного судна типа «Севан». Обводы обычного варианта показаны на рис. 52, *а*, обводы с РО — на рис. 52, *б*. Для обводов судна типа «Севан»

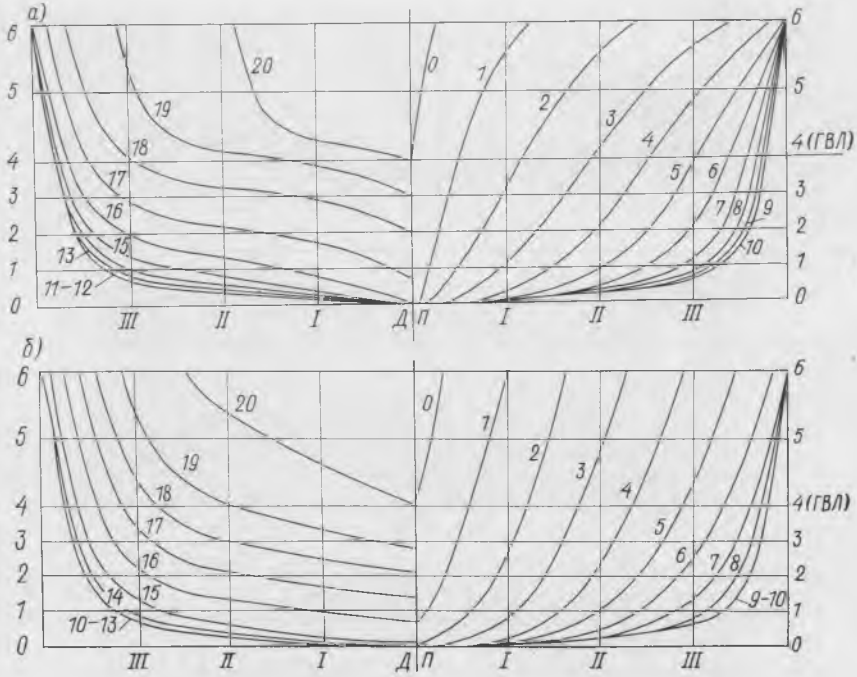

Рис. 52. Обводы речного судна типа «Севан»: *а* — исходные обычные обводы, *б* — обводы с РО.

характерны S-образные ватерлинии и шпангоуты с развалом. Рабочая скорость соответствует числу Fr = 0,22 (v = 22,5 км/ч). Эти обводы отличаются от обводов судна типа «Родина» более заостренной носовой оконечностью. У обводов с РО длина цилиндрической вставки составляет 25%. Неразвертывающиеся участки расположены между 7-м и 8-м теоретическими шпангоутами, а переход от цилиндрической вставки на кормовую оконечность — в районе 14 теоретического шпангоута. Данные по моделям приведены в табл. 3.

Результаты буксировочных испытаний показаны на рис. 53. На рабочей скорости обе модели имеют практически равное сопротивление.

Таблица 3

Характеристики корпуса	Обводы речного теплохода типа „Севан"	
	обычные	с РО
Длина расчетная L, м	62	62
Ширина расчетная B, м	9,4	9,4
Осадка T, м	1,9	1,9
Водоизмещение D, т	638	638
Коэффициент:		
полноты α	0,760	0,759
полноты β	0,882	0,875
общей полноты δ	0,576	0,576
Смоченная поверхность S, м²	545	545
Абсцисса:		
центра величины x_c, м	—0,735	—0,795
центра тяжести площади ГВЛ x_f, м	—2,46	—2,58
Угол входа ГВЛ	8°	14°

У быстроходного пассажирского катамарана для местных линий, взятого для разработки четвертой серии, величина остаточного сопротивления составляет всего 15—18% от полного. Следовательно, малейшее изменение формы может сильно по-

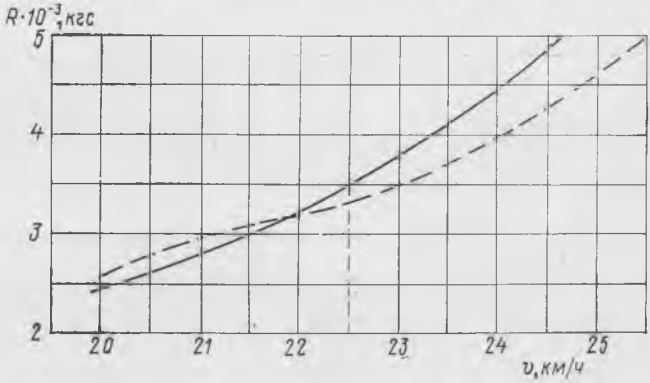

Рис. 53. Кривые буксировочного сопротивления речного судна типа «Севан»:

—— исходные обычные обводы, – – – обводы с РО.

влиять на его величину. При разработке обычного варианта обводов испытывалась серия из 23 моделей. Разница в сопротивлении между лучшей и худшей моделями серии составляла 12,5%. Вариант обводов с РО отличается по сопротивлению от лучшей модели серии (рис. 54, *а*) на 2,5%. Обводы корпуса с РО показаны на рис. 54, *б*. Характеристики корпусов приведены в табл. 4.

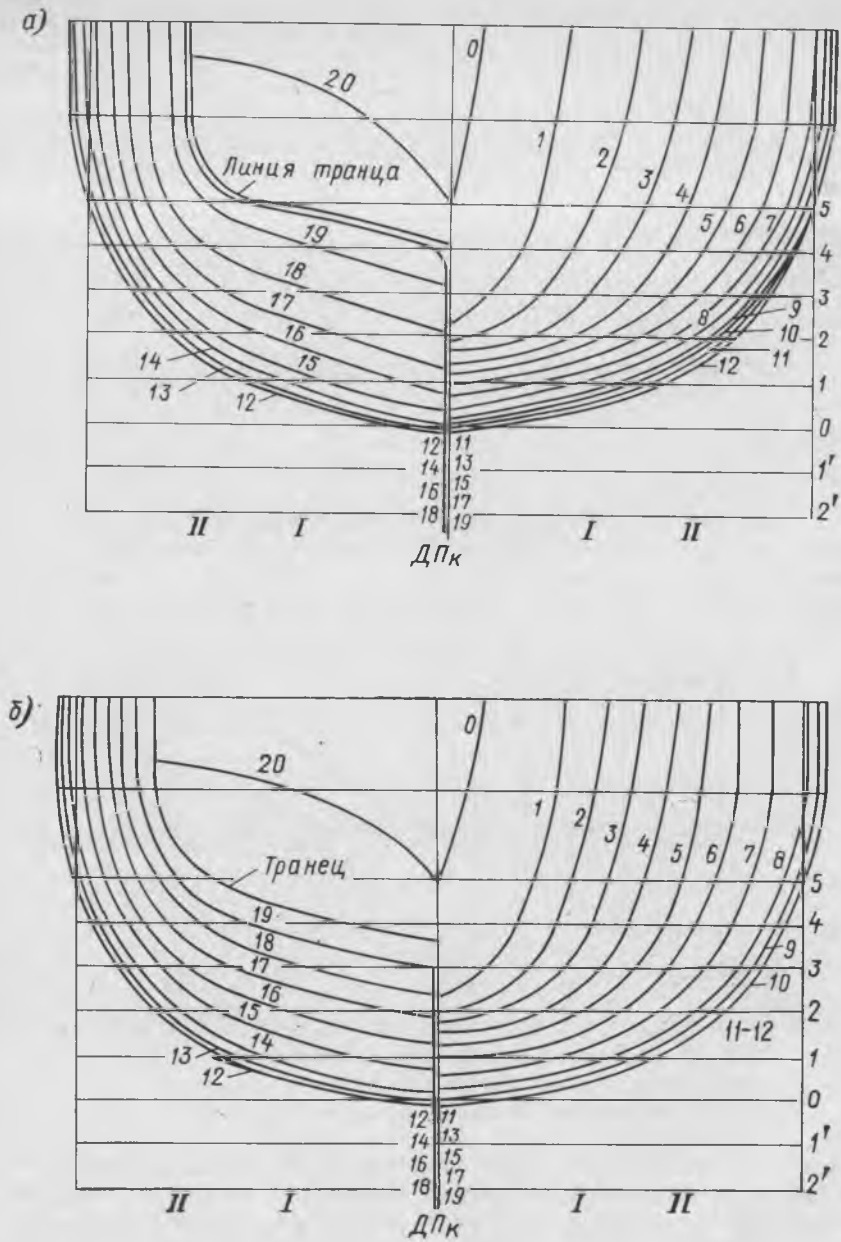

Рис. 54. Обводы пассажирского катамарана для местных линий: *а* — исходные обычные обводы; *б* — обводы с РО.

Таблица 4

Характеристики корпуса	Обводы пассажирского катамарана	
	обычные	с РО
Длина расчетная L, м	41	41
Ширина корпуса B, м	2,16	2,16
Осадка T, м	0,66	0,66
Водоизмещение D, т	54,8	54,8
Коэффициент:		
полноты α	0,774	0,762
полноты β	0,76	0,76
общей полноты δ	0,47	0,47
Смоченная поверхность S, м²	2×97,6	2×97,6
Абсцисса:		
центра величины x_c, м	—1,36	—1,56
центра тяжести ГВЛ x_f, м	—1,725	—2,17
Угол входа ГВЛ	7,45°	10°

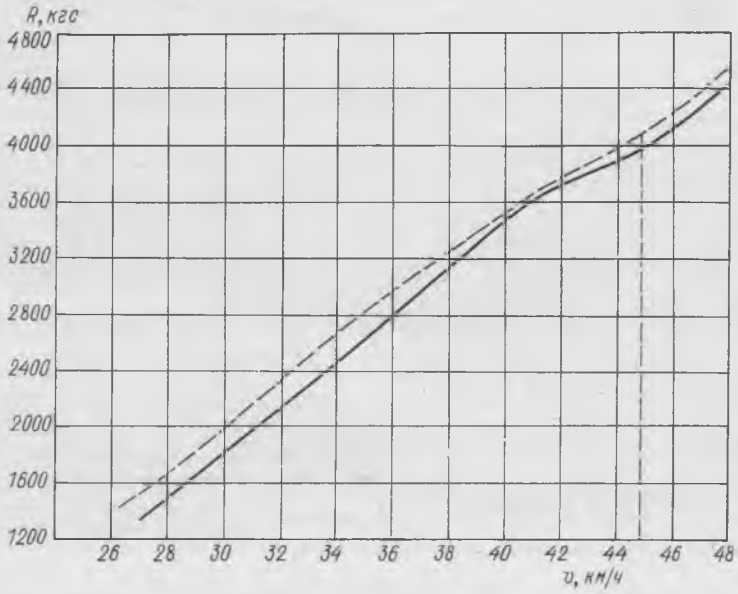

Рис. 55. Кривые буксировочного сопротивления пассажирского катамарана для местных линий:

—— исходные обычные обводы, – – – обводы с РО.

Результаты испытаний показаны на кривых рис. 55.

Все проведенные испытания подтвердили предположение о том, что можно проектировать обводы с РО судов с высоким гидродинамическим качеством.

Наиболее полное обследование ходовых и мореходных качеств судна с РО было выполнено в 1970 г. в опытовом бассейне. Выбранный для этой цели пассажирский теплоход для местных и пригородных линий предназначен для плавания на мелководье и в ограниченном фарватере. Скорость движения соответствует числу Fr = 0,6. Для сравнительных испытаний были

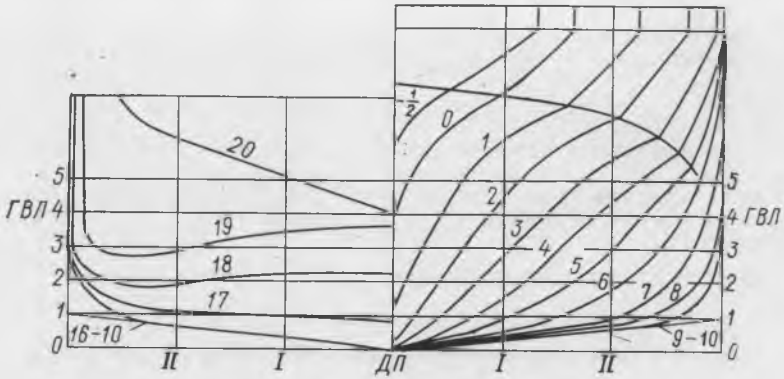

Рис. 56. Обводы быстроходного речного судна.

разработаны три варианта обводов этого судна с РО по теоретическому чертежу головного судна (рис. 56). Носовая оконечность судна имеет слом в надводной части, идущий от форштевня до 5 теоретического шпангоута, и тоннель от 17,5 теоретического шпангоута до транца. Цилиндрическая вставка тянется от 10 до 16 теоретического шпангоута.

При разработке вариантов обводов с РО все основные особенности формы были сохранены. Характеристики корпуса всех вариантов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Характеристики корпуса	Обводы скоростного речного судна			
	обычные	с РО вариант I	с РО вариант II	с РО вариант III
Длина расчетная L, м	30,4	30,4	30,4	30,4
Ширина B, м	3,65	3,65	3,65	3,65
Осадка T, м	0,75	0,75	0,75	0,75
Водоизмещение D, т	48,7	48,7	48,7	48,7
Абсцисса центра величины x_c, м	—1,76	—1,8	—1,81	—1,86
Смоченная поверхность S, м^2	111,9	111,9	111,7	112

Носовая оконечность I варианта отличается от исходного большим подрезом диаметрального батокса в носу и отсутст-

вием S-образности ватерлиний. В корме тоннель сделан несколько более протянутым в нос, поэтому 17 теоретический шпангоут получился по форме более похожим на 19, а не на 16 (рис. 57, *а*). II вариант обводов с РО имеет такую же форму кормы, как и I, но носовая оконечность сделана более заостренной. Носовые шпангоуты в подводной части сделаны U-образными, в отличие от V-образных у исходного и I варианта с РО. Подрез диаметрального батокса сохранен (рис. 57, *б*). III вариант обводов с РО имеет такую же корму, как у I и II варианта с РО, а носовая оконечность сделана без развала. Угол входа ГВЛ получился больше, чем у исходной модели, на 5°. Подрез диаметрального батокса в носу сделан больше, чем у всех остальных. Носовые шпангоуты V-образные. Значительное изменение носовых шпангоутов сделано для проверки необходимости такого перегиба шпангоутов, какой выполнен на исходной модели, и представляет сложность при изготовлении (рис. 57, *в*). У всех трех вариантов обводов с РО длина цилиндрической вставки увеличена на одну теоретическую шпацию, а переходы на оконечности оставлены неразвертывающимися.

Испытания проводились на глубокой воде, на мелководье и на волнении. Буксировочные испытания на встречном волнении проводились в диапазоне тех же скоростей, что и на глубокой воде. Высота волн во время всех испытаний соответствовала высоте волн для натуры 0,8 м.

Коэффициенты остаточного сопротивления всех моделей показаны на графиках рис. 58. Из графиков видно, что разница между коэффициентами остаточного сопротивления на глубокой воде даже при самых больших расхождениях находится в пределах 3,5%. На рис. 59 показано сравнение обводов исходного и варианта II.

При движении на встречном волнении все варианты обводов с РО при $Fr = 0{,}22 \div 0{,}24$ имеют меньшее сопротивление, чем исходный. На горбе сопротивления вариант II лучше, а варианты I и III хуже исходного. Испытания на мелководье проводились только для исходного и варианта II обводов с РО, как более близких. На мелководье обе модели вели себя одинаково.

Выполненное экспериментальное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Применение развертывающихся поверхностей при проектировании позволяет получать обводы с таким же гидродинамическим качеством, как и при обычном проектировании.

2. Увеличение сопротивления при движении на взволнованной поверхности практически одинаково у обводов с РО и у обычных.

3. Разница в сопротивлении практически сохраняется при движении сравниваемых моделей в условиях мелководья.

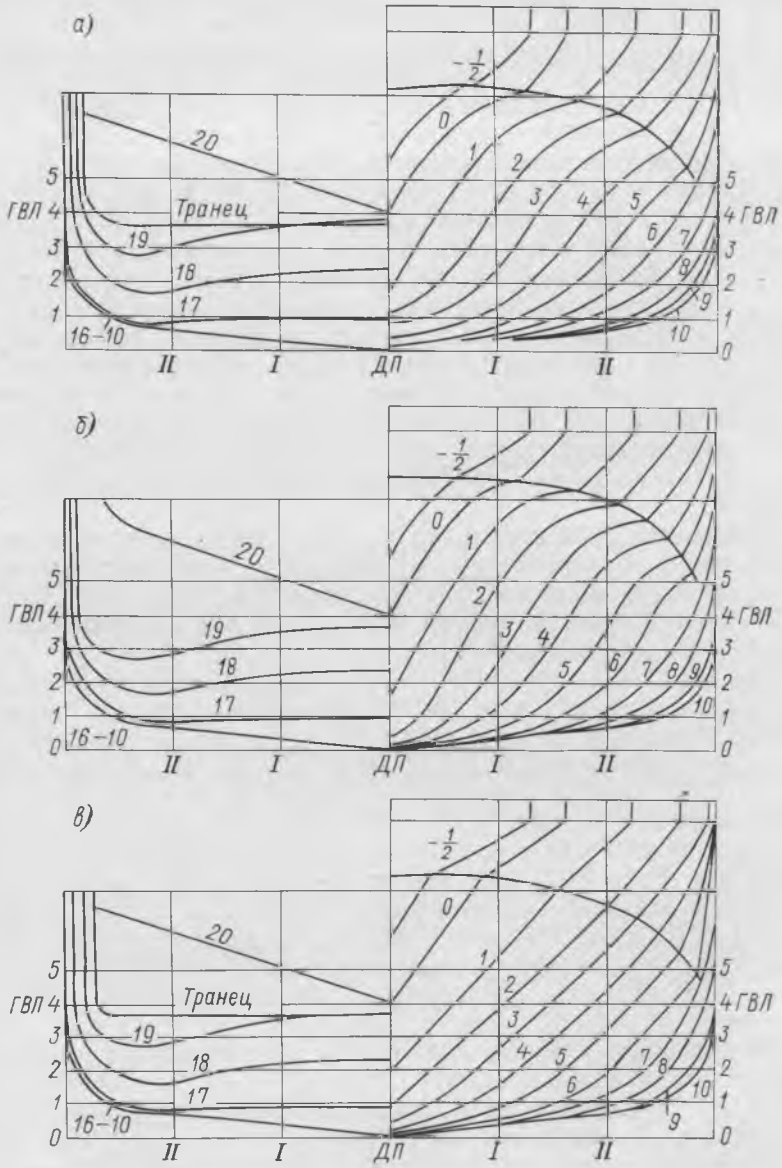

Рис. 57. Обводы быстроходного речного судна: *а* — I вариант обводов с РО, *б* — II вариант обводов с РО; *в* — III вариант обводов с РО.

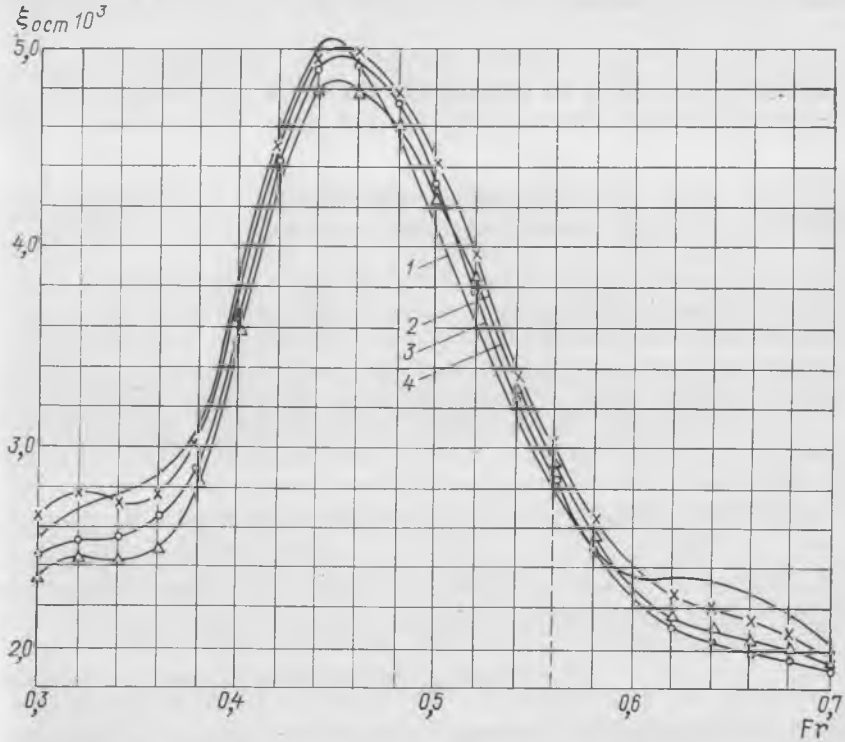

Рис. 58. Графики коэффициентов остаточного сопротивления моделей быстроходного речного судна:

—— обычные обводы, —×— I вариант обводов с РО, —○— II вариант обводов с РО, —△— III вариант обводов с РО.

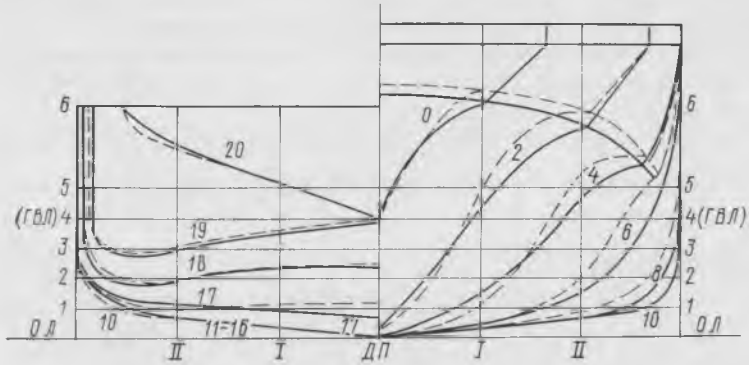

Рис. 59. Сравнение обводов быстроходного речного судна:

—— обычные обводы, – – – обводы с РО.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБВОДОВ СУДОВ С РО НА ЭВМ

§ 9

Аппроксимация линий теоретического чертежа

Для аналитического задания шпангоутов и ватерлиний издавна применяются параболы, прогрессики, логарифмики и другие так называемые «корабельные» кривые. Парабола в качестве исходной кривой для аппроксимации ватерлиний судов была впервые предложена адмиралом Ф. Г. Чапманом [3].

Ньютон выявил квадратичную зависимость гидродинамических сил от скорости движения, и поэтому парабола считалась кривой, присущей всякому движению в природе.

Параболу Чапмана можно представить в виде [9]

$$y^n = y_{\max}\left[1 - \left(\frac{x}{L_{\text{н (к)}}}\right)^n\right], \qquad \text{(III.1)}$$

где n — дробная величина, которая для ватерлинии равна

$$n = \frac{\alpha}{1-\alpha}, \qquad \text{(III.2)}$$

где α — коэффициент полноты ватерлинии; $L_{\text{н (к)}}$ — длина носовой (кормовой) ветви ватерлинии; $y_{\max}$ — максимальная ордината ватерлинии.

Если параболу трансформировать с помощью несложных геометрических построений, то можно получить кривые, еще более подходящие для описания судовых обводов. Такое геометрическое построение обосновал в 1758 г. Г. Дюгамель [3] для образования прогрессик, получивших в дальнейшем очень большое распространение в проектировании обводов. Трансформации параболы дают целый класс прогрессик, которые образуют и выпуклые кривые, и кривые с перегибом.

Аналитическое выражение прогрессики для ватерлинии имеет вид

$$y = \frac{1 - x^m}{1 + \frac{1-n}{n} x^m}, \qquad \text{(III.3)}$$

а для шпангоута

$$y = \frac{1 - z^m}{1 + \frac{1-n}{n} z^m}, \qquad \text{(III.4)}$$

где m — произвольный показатель степени; n — экспонент прогрессики, при $n = 1$ прогрессика вырождается в параболу.

В 1837 г. Попов [3] провел исследование прогрессики при $m=2$ и разработал графики для практического применения. В 1887 г. в «Морском сборнике» были опубликованы разработанные Дюшеном [3] таблицы, где приводились ординаты прогрессик для разных значений n при $m=3$. В 1874 г. Арцеулов [62] применил для проектирования прогрессики, у которых уравнение имеет вид

$$y=y_{\max}\frac{n\sqrt{1-\left(\frac{x}{L_{\text{н}}}\right)^2}}{1+(n-1)\sqrt{1-\left(\frac{x}{L_{\text{н}}}\right)^2}}. \qquad \text{(III.5)}$$

При $n<1$ получается бульбовый нос, а при $n>1$ — лебединый.

Стремясь добиться большей пластичности, В. Афанасьев в 1896 г. предложил вместо прогрессик линии, уравнение которых имеет вид [3]

$$y=y_{\max}\left[1-\left(\frac{x}{L_{\text{н (к)}}}\right)^m-m\left(1-\frac{x}{L_{\text{н (к)}}}\right)^{\frac{m}{2}}\ln\left(1-\frac{x}{L_{\text{н (к)}}}\right)\right]^n. \qquad \text{(III.6)}$$

Принимая в этом выражении один из показателей степени за постоянное число, а другой — за переменный параметр, можно получать разнообразные семейства линий, сходные по форме, но различные по распределению полноты по длине.

В 1930 г. В. И. Алымовым [42, 62] предложен способ проектирования судовой поверхности путем применения инверсии эллипса в виде

$$y=y_{\max}\frac{m}{\sqrt{\operatorname{tg}^2\theta+m^2}}, \qquad \text{(III.7)}$$

где $m=\frac{a}{y_{\max}}$ — отношение полуосей эллипса, а θ определяется из условия $x=\frac{2L\theta}{\pi}$. При различных значениях параметра m характер кривой варьируется от полных форм до острых. При некоторых значениях m кривые имеют точки перегиба.

Тейлор выразил уравнение ватерлинии в виде параболы 5-го порядка

$$y=a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3+a_4x^4+a_5x^5. \qquad \text{(III.8)}$$

Для определения коэффициентов используются шесть условий, полученных путем измерения первых и вторых производных.

Систематические вариации φ, L/B и B/T Тейлор превратил в серию математических кривых, которые были использованы

при проектировании серии моделей, известных как стандартная серия Тейлора.

Л. М. Ногид [42] предложил для ватерлиний полином 4-го порядка

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4. \qquad \text{(III.9)}$$

Для описания полного обвода сечения одним уравнением И. А. Яковлев [69] предложил выражение вида

$$y = k\left(\frac{x}{L}\right)^m \left[1 - \left(\frac{x}{L}\right)^n\right]^p, \qquad \text{(III.10)}$$

где m, n, p — постоянные положительные числа.

Для аналитического задания линий теоретического чертежа В. Г. Власов [11] разработал метод интегрального интерполирования, при котором все линии задаются уравнениями вида

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \ldots + a_n x^n. \qquad \text{(III.11)}$$

В качестве параметров, определяющих форму кривой, задаются моменты площади в виде кратных интегралов. Власовым разработаны формулы для случая, когда кроме моментов задаются начальная и конечная ординаты.

Интегро-интерполяционные формулы Власова были использованы для задания линий теоретического чертежа судна с РО. К сожалению, эти формулы оказались непригодными для задания шпангоутов, так как, несмотря на выполнение всех указанных условий для моментов и ординат, оказалось невыполненным совершенно необходимое условие, чтобы кривая проходила через заданные точки, имея направления касательных, типичные для плавных обводов. Начиная с кривых 3-го порядка, все кривые проходят через заданные точки волнообразно.

Большой интерес для судостроителей представляют уравнения, с помощью которых задаются не отдельные линии теоретического чертежа, а вся поверхность корпуса.

В 1895 г. И. Г. Бубнов [62] предложил для оконечностей судна следующее аналитическое выражение:

$$y = y_b + (1 - y_c)\left[\frac{1 - z^m}{1 + (\lambda_1 - 1) z^{m_1}} + \frac{y_c - y_b}{1 - y_c}\right] \frac{1 - x^m}{1 - (\lambda - 1) x^m}, \qquad \text{(III.12)}$$

где y_b — отношение ширины штевней к ширине судна; y_c — отношение ширины киля к ширине судна; m_1 и λ_1 — постоянные, определяющие форму миделевого шпангоута; m и λ — некоторые функции от z, различные для носовой и кормовой оконечностей.

Вейнблюм для задания линий теоретического чертежа использовал целый рациональный многочлен вида

$$y = (1 - x^n)(1 - c_0 z^m). \qquad \text{(III.13)}$$

Такой вид уравнения допускает возможность вариаций как полноты, так и формы обводов в произвольных границах.

А. А. Курдюмов [36] для описания непрерывных и плавных обводов предложил искать уравнение поверхности в виде

$$\bar{y}=f(\bar{x},\ z)+\varphi(\bar{x})\psi(\bar{z})K(\bar{z}_0,\ \bar{z}), \qquad \text{(III.14)}$$

где $y=f(\bar{x},\ \bar{z})$ — уравнение исходной поверхности, а функции $\varphi(\bar{x})$, $\psi(\bar{z})$, $K(\bar{z}_0,\ \bar{z})$ определяются по форме характерных сечений.

А. Б. Карпов [26, 27] разработал аналитический метод построения судовой поверхности в виде

$$y=\frac{B}{2}\eta_{\text{квл}}(\xi)\eta(\zeta), \qquad \text{(III.15)}$$

где $\eta_{\text{квл}}(\xi)=\sum_{i=0}^{4} b_i(\xi)^i$ — уравнение КВЛ; $\eta(\zeta)$ — выражение для описания обводов шпангоутов, получаемое из уравнения $\zeta=a\eta^n-(a-1)\eta^{2n}$, где a и n являются функциями коэффициента полноты шпангоута; ξ, ζ — безразмерные координаты.

В основу метода положен кинематический способ образования поверхности путем плавной трансформации.

Описанные аналитические выражения были разработаны еще тогда, когда все расчеты выполнялись вручную. Но многие из них могут быть реализованы для задания обводов на ЭВМ наряду с вновь разработанными специально для ЭВМ методами построения судовой поверхности.

Значительный интерес представляют исследования различных уравнений и методов аппроксимации, применявшихся в настоящее время для задания обводов на ЭВМ, выполненные в Англии и США. Наиболее подходящими признаны кривые третьего порядка. Например, в США [71] при разработке комплекса программ для судостроительных расчетов в качестве аппроксимирующей принята функция вида

$$y=A_0+A_1x+A_2x^2+A_3x^3+A_4(x-a_2)_+^3+\ldots+ \\ +A_{m+1}(x-a_{n+1})_+^3, \qquad \text{(III.16)}$$

где a_2, a_3, ..., a_{n+1} — абсциссы точек разрывности третьих производных, а $(x-a_i)_+^3$ имеют смысл только при $x>a_i$.

В Мичиганском университете разработан метод аппроксимации линий теоретического чертежа с помощью тригонометрических функций влияния. Цель метода в том, чтобы представить кривую аналитически путем суперпозиции отдельных полиномов, называемых функциями влияния, каждая из которых удовлетворяет одному из ограничений и не оказывает влияния на любые другие.

При описании поверхности корпуса судна с РО задача аналитического задания значительно упрощается. Для задания

поверхности нет необходимости пользоваться такими кривыми, которые путем вариации параметров описывали бы все сечения. У судов с РО аналитически нужно задавать только опорные сечения. В качестве опорных сечений могут быть использованы шпангоуты, ватерлинии, палубная линия. Но для этого нужна такая универсальная кривая, которая описывала бы аналитически любую линию на всем ее протяжении или на достаточно большом участке. В качестве таких аналитических кривых используются параболы произвольного порядка, квадратичные параболы и трансформированная верзиера.

При выборе аналитического выражения для аппроксимации приходится учитывать не только форму кривой, но и ее положение в пространстве.

Для носовой оконечности при аппроксимации ватерлиний может быть использована квадратичная парабола вида

$$y=a_0+a_1x+a_2x^2. \qquad \text{(III.17)}$$

Так как эта кривая всегда может быть приведена к виду

$$y-b_0=b_1(x-b_3)^2,$$

то ясно, что вершина такой параболы находится в точке $B(b_3, b_0)$, а ветви симметричны относительно оси, параллельной оси OY.

Применять квадратичную параболу вида

$$y=b_0+b_1z+b_2z^2 \qquad \text{(III.18)}$$

для описания шпангоутов можно только в том случае, если шпангоуты имеют завал к палубе. Это объясняется тем, что ось симметрии кривой параллельна оси OY, а вершина параболы находится не на ДП, а у борта.

При аналитическом задании обводов с РО на ЭВМ удобнее всего для сокращения машинного времени конические и цилиндрические участки задавать в явном виде. Для этого нужно аппроксимировать только направляющую, для чего можно использовать уравнения вида

$$y=a_3+a_2(x-x_0)^{a_1}, \qquad \text{(III.19)}$$

или

$$y=b_3+b_2(z-z_0)^{b_1}. \qquad \text{(III.20)}$$

Для определения a_1, a_2, a_3 и b_1, b_2, b_3 нужно задать координаты трех точек, принадлежащих кривой. Координаты вершин этих кривых определяются прямо из уравнений. Вершина кривой (III.19) в точке $A(x_0, a_3)$, а кривой (III.20) в точке $B(z_0, b_3)$. По координатам двух других точек, взятых на кривой, опреде-

ляются коэффициенты a_1, a_2 и b_1, b_2. Система уравнений для их определения имеет вид

$$\left.\begin{aligned} y_1 - y_0 &= a_2 (x_1 - x_0)^{a_1}; \\ y_2 - y_0 &= a_2 (x_2 - x_0)^{a_1}. \end{aligned}\right\}$$

Отсюда

$$\frac{y_1 - y_0}{y_2 - y_0} = \left(\frac{x_1 - x_0}{x_2 - x_0}\right)^{a_1},$$

и для a_1 получается выражение

$$a_1 = \frac{\ln\left(\frac{y_1 - y_0}{y_2 - y_0}\right)}{\ln\left(\frac{x_1 - x_0}{x_2 - x_0}\right)}. \qquad \text{(III.21)}$$

Следует заметить, что при определении коэффициента a_1 (или b_1) необходимо точки $A_1(x_1, y_1)$, $A_2(x_2, y_2)$ выбирать с одной стороны от вершины, чтобы под знаком логарифма не получить отрицательное число.

Для определения коэффициента a_2 может быть использована любая из формул (III.22)

$$a_2 = \frac{y_2 - y_0}{(x_2 - x_0)^{a_1}}, \qquad a_2 = \frac{y_1 - y_0}{(x_1 - x_0)^{a_1}}. \qquad \text{(III.22)}$$

Это же аналитическое выражение используют для аппроксимации ватерлиний в местах перехода от цилиндрической вставки на оконечности. В этом случае вершину A_0 выбирают в точке притыкания к цилиндрической вставке.

Если неразвертывающийся участок поверхности расположен между двумя разными развертывающимися участками носовой оконечности, то кривая должна подходить к соединяемым линиям по касательным. Тогда ее уравнение удобно задать в виде

$$y = a_3 + a_2 (x - x_2)^{a_1} + a_4 (x - x_2). \qquad \text{(III.23)}$$

Третье слагаемое обеспечивает наклон аппроксимирующей кривой. Для определения коэффициентов задаются координаты четырех точек $M_1(x_1, y_1)$, $M_2(x_2, y_2)$, $M_3(x_3, y_3)$ и $M_4(x_4, y_4)$. Показатель степени a_1 определяется по формуле

$$a_1 = \frac{\left(\frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)(x_3 - x_2)}{y_3 - y_2 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x_3 - x_2)}, \qquad \text{(III.24)}$$

а остальные коэффициенты имеют вид

$$a_2 = \frac{\left(\frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)(x_3 - x_2)}{a_1 (x_3 - x_2)^{a_1}}; \qquad \text{(III.25)}$$

$$a_3 = y_2; \quad a_4 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}. \qquad \text{(III.26)}$$

В этом случае вершиной кривой служит точка $M_2(x_2, y_2)$. Выбор точек $M_1(x_1, y_1)$ и $M_4(x_4, y_4)$ регулирует прохождение кривой через $M_2(x_2, y_2)$ и $M_3(x_3, y_3)$ в нужном направлении. Точки M_1 и M_4 нужно выбирать поближе к M_2 и M_3.

Для аппроксимации шпангоутов, имеющих перегиб, все описанные кривые не подходят. В качестве наиболее подходящей кривой для аппроксимации было разработано выражение трансформированной верзиеры [18] в виде

$$y = \frac{kl}{k + z^2}. \qquad \text{(III.27)}$$

Путем изменения параметров k и l можно получить довольно разнообразное семейство кривых, из которых всегда можно подобрать подходящую (рис. 60). Большим достоинством таких кривых является наличие перегиба, длину которого можно увеличивать и получать почти прямые участки, необходимые при описании днищевых ветвей шпангоутов. На рис. 61 показана связь системы, в которой верзиера записывается в своем каноническом виде (III.27), с общесудовой системой координат.

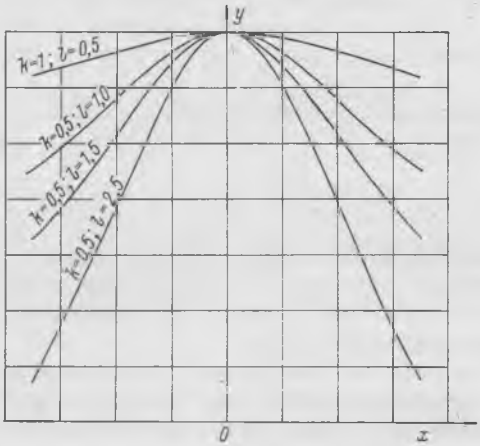

Рис. 60. Зависимость формы трансформированной верзиеры от параметров k и l.

После перевода уравнения аппроксимирующей кривой в систему координат судна оно принимает вид

$$a_1y^3 + y^2(a_2z + a_3) + y(a_4z^2 + a_5z + a_6) + \\ + a_7z^3 + a_8z^2 + a_9z + a_{10} = 0. \qquad \text{(III.28)}$$

Это кубическое уравнение, которое содержит 10 коэффициентов a_i $(i = 1, 2, 3, \ldots, 10)$. Для того чтобы из всех кривых третьего порядка, описываемых таким уравнением, выбрать трансформированную верзиеру, нужно задать зависимость между коэффициентами a_i. Эта зависимость устанавливается через пять параметров, в качестве которых используются следующие: φ — угол поворота системы координат верзиеры $O_1Y_1Z_1$ по отношению к общесудовой системе координат OYZ; $\varkappa$ и λ — координаты начала координат системы $O_1(\varkappa, \lambda)$; k и l — параметры, определяющие форму верзиеры.

Если учесть, что один из коэффициентов a_i может быть принят равным единице, то остальные девять коэффициентов зависят от пяти указанных параметров.

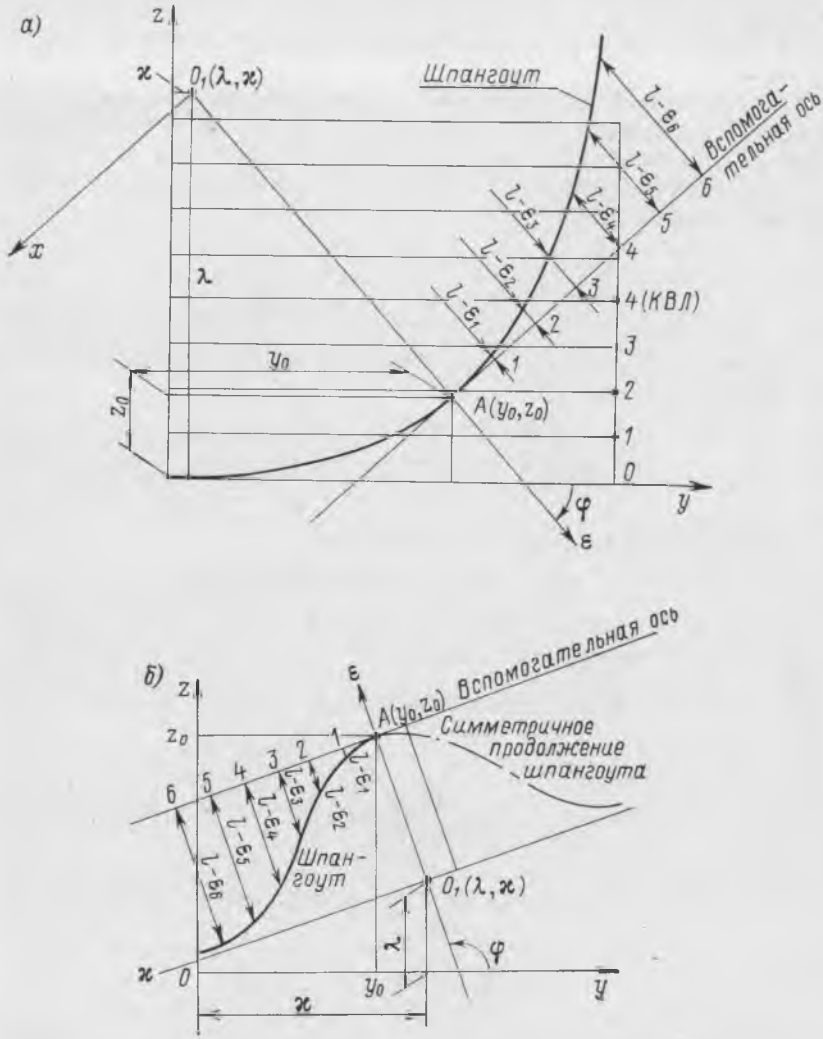

Рис. 61. Подготовка данных для аппроксимации с помощью верзиеры: *а* — круглого шпангоута; *б* — шпангоута с развалом.

Для того чтобы снять с чертежа угол φ и координаты вершины трансформированной верзиеры, нужно сначала найти направление ее осей. Определение вершины и направления осей выполняют на прозрачной бумаге. Для этого на ней вычерчивается шпангоут вместе с системой координат *OYZ*. Вершина

A определится после того, как одна часть ветви шпангоута совместится с другой. При этом совсем не обязательно, чтобы эти части имели одинаковую длину. Калька перегибается по линии оси $O_1\varepsilon$. После определения положения точки $A(y_0, z_0)$ и направления оси $O_1\varepsilon$ наносят вспомогательную ось, проходящую через точку $A(y_0, z_0)$ перпендикулярно линии перегиба бумаги.

Параметры k и l получают с помощью метода наименьших квадратов. Причем вместо ординат ε, которые неизвестны, так как не определено l, с чертежа снимают ординаты $(l-\varepsilon)$.

Для определения k и l составляют сумму квадратов погрешностей в виде

$$\sum_{i=1}^{n}\left[(l-\varepsilon_i)-\left(l-\frac{kl}{k+x_i^2}\right)\right]^2=\delta.$$

Путем несложных преобразований это выражение упрощается

$$\sum_{i=1}^{n}\left[(l-\varepsilon_i)-\frac{lx_i^2}{k+x_i^2}\right]^2=\delta.$$

Нормальные уравнения имеют вид

$$\nu_1 k+\nu_2-q_1 l=0;$$

$$\nu_2 k+\nu_3-q_2 l=0,$$

где

$$\nu_1=\sum_{i=1}^{n}(l-\varepsilon_i);$$

$$\nu_2=\sum_{i=1}^{n}(l-\varepsilon_i)\,x_i^2;$$

$$\nu_3=\sum_{i=1}^{n}(l-\varepsilon_i)\,x_i^4;$$

$$q_1=\sum_{i=1}^{n}x_i^2;\qquad q_2=\sum_{i=1}^{n}x_i^4.$$

Отсюда получены расчетные формулы для определения коэффициентов k и l:

$$k=\frac{\nu_3 q_1-\nu_2 q_2}{\nu_1 q_2-\nu_2 q_1};\qquad \text{(III.29)}$$

$$l=\frac{\nu_3\nu_1-\nu_2^2}{\nu_1 q_2-\nu_2 q_1}.\qquad \text{(III.30)}$$

Для определения параметров $\varkappa$ и λ необходимо знать значения углов α_1 и α_2 в формулах

$$\varkappa = y_0 + l \sin \alpha_1;$$

$$\lambda = z_0 + l \cos \alpha_2, \qquad \text{(III.31)}$$

где y_0, z_0 — координаты вершины.

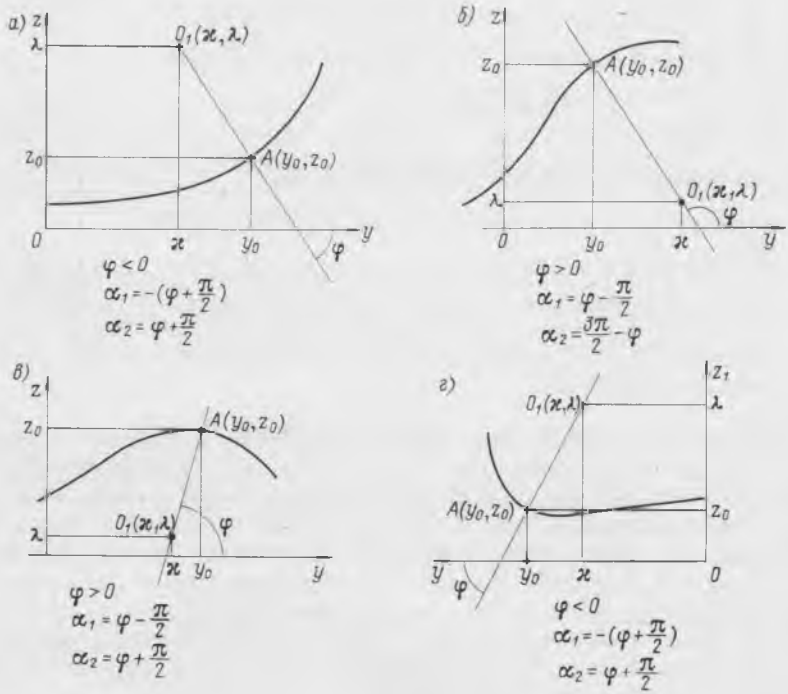

Рис. 62. Схема выбора углов при аппроксимации кривых с помощью верзиеры: *а* — $\varphi<0$, $\alpha_1=-\left(\varphi+\frac{\pi}{2}\right)$, $\alpha_2=\varphi+\frac{\pi}{2}$; *б* — $\varphi>0$, $\alpha_1=\varphi-\frac{\pi}{2}$, $\alpha_2=\frac{3\pi}{2}-\varphi$; *в* — $\varphi>0$, $\alpha_1=\varphi-\frac{\pi}{2}$, $\alpha_2=\varphi+\frac{\pi}{2}$; *г* — $\varphi<0$, $\alpha_1=-\left(\varphi+\frac{\pi}{2}\right)$, $\alpha_2=\varphi+\frac{\pi}{2}$.

Для различных положений шпангоутов эти углы определяются через угол φ по разным формулам. Схема определения углов α_1 и α_2 показана на рис. 62.

Коэффициенты a_i в неявном уравнении (III.28) определяются по формулам, полученным в результате поворота осей и переноса начала координат:

$$
\left.
\begin{aligned}
&a_1 = \cos\varphi \sin\varphi;\\
&a_2 = \sin^3\varphi - 2\cos^2\varphi \sin\varphi;\\
&a_3 = 2\lambda\cos^2\varphi \sin\varphi - \lambda\sin^3\varphi - 3\varkappa\sin\varphi\cos\varphi;\\
&a_4 = \cos^3\varphi - 2\cos\varphi\sin^2\varphi;\\
&a_5 = 4\varkappa\cos^2\varphi\sin\varphi - 2\lambda\cos^2\varphi - 2\varkappa\sin^3\varphi + 4\lambda\cos\varphi\sin^2\varphi;\\
&a_6 = k\cos\varphi + 3\varkappa^2\cos\varphi\sin^2\varphi + \lambda^2\cos^3\varphi - 4\varkappa\lambda\cos^2\varphi\sin\varphi +\\
&\quad + 2\varkappa\lambda\sin^3\varphi - 2\lambda^2\cos\varphi\sin^2\varphi;\\
&a_7 = \cos^2\varphi\sin\varphi;\\
&a_8 = 2\varkappa\cos\varphi\sin^2\varphi - 3\lambda\cos^2\varphi\sin\varphi - \varkappa\cos^3\varphi;\\
&a_9 = 2\varkappa\lambda\cos^3\varphi - 4\varkappa\lambda\cos\varphi\sin^2\varphi + \varkappa\sin^3\varphi + 3\lambda^2\cos^2\varphi\sin\varphi -\\
&\quad - 2\varkappa^2\cos^2\varphi\sin\varphi + k\sin\varphi;\\
&a_{10} = 2\varkappa\lambda^2\cos\varphi\sin^2\varphi - \varkappa^2\lambda\sin^3\varphi - \lambda k\sin\varphi - \varkappa k\cos\varphi -\\
&\quad - \varkappa^3\cos\varphi\sin^2\varphi - \varkappa\lambda^2\cos^3\varphi + 2\varkappa^2\lambda\cos^2\varphi\sin\varphi -\\
&\quad - \lambda^3\cos^2\varphi\sin\varphi - kl.
\end{aligned}
\right\} \quad \text{(III.32)}
$$

Следует отметить, что снятие с чертежа исходных данных для такой аппроксимации отличается от общепринятого, но обычно больших трудностей не вызывает. Если учесть, что при проектировании обводов с РО приходится задавать всего несколько опорных линий, то такой способ не вносит больших затруднений. Гораздо бо́льшим недостатком такого задания является то, что окончательное уравнение кривой получается в неявном виде. Такое уравнение (III.28) легко решается методом «невязок» или по формуле Кардана, но тем не менее всегда желательно иметь явный вид задания.

Основное достоинство аппроксимации с помощью трансформированной верзиеры в высокой точности, в единообразии задания всех кривых и в возможности задать кривую целиком.

§ 10

Аналитическое задание поверхности корпуса с РО

Одним из основных достоинств развертывающихся поверхностей является возможность их аналитического задания. Однако не всякий вид задания удобен для реализации на ЭВМ. Представляется целесообразным выбрать такой алгоритм, который позволял бы получать максимум информации при минимальном количестве вычислений.

Для составления уравнения развертывающейся поверхности естественно использовать предложенный графический метод ее построения. Тогда в процессе расчета сразу выявляется положение прямолинейных образующих на корпусе судна.

Если развертывающаяся поверхность рассматривается как геометрическое место прямых, касающихся ребра возврата, то, зная координаты особых точек или уравнение ребра возврата, можно составить уравнение поверхности.

Пусть уравнение ребра возврата задано параметрически:

$$\left.\begin{aligned} y_0 &= \varphi(z_0); \\ x_0 &= \psi(z_0), \end{aligned}\right\} \qquad \text{(III.33)}$$

где $M_0(x_0, y_0, z_0)$ — текущая точка ребра возврата.

Уравнения касательных к ребру возврата имеют вид

$$\left.\begin{aligned} y - y_0 &= \varphi'(z_0)(z - z_0); \\ x - x_0 &= \psi'(z_0)(z - z_0), \end{aligned}\right\} \qquad \text{(III.34)}$$

где $M(x, y, z)$ — текущая точка поверхности.

Тогда

$$\left.\begin{aligned} x &= \psi(z_0) + \frac{\psi'(z_0)}{\varphi'(z_0)}[y - \varphi(z_0)]; \\ y &= \varphi(z_0) + \frac{\varphi'(z_0)}{\psi'(z_0)}[x - \psi(z_0)]; \\ z &= z_0 + \frac{1}{\psi'(z_0)}[x - \psi(z_0)]. \end{aligned}\right| \qquad \text{(III.35)}$$

В уравнениях (III.35) y и z являются функциями двух переменных z_0 и x. Выражая y и z через независимые переменные x и z_0, можно получить уравнение поверхности в векторном виде

$$\mathbf{r} = \mathbf{i}x + \mathbf{j}\left[\varphi(z_0) + \frac{\varphi'(z_0)}{\psi'(z_0)}(x - \psi(z_0))\right] + \\ + \mathbf{k}\left[z_0 + \frac{1}{\psi'(z_0)}(x - \psi(z_0))\right]. \qquad \text{(III.36)}$$

Уравнение (III.36) можно использовать, если известно ребро возврата. Но у полипараметрических поверхностей, которые получаются при натягивании на заданные кривые, особые точки расположены произвольно, и их положение не может быть описано аналитически.

В основу составления уравнения развертывающейся поверхности, полученной по двум опорным кривым, расположенным в параллельных плоскостях, приняты линейчатость поверхности и параллельность касательных к кривым в точках пересечения с общей прямолинейной образующей.

Пусть уравнения опорных кривых заданы в виде

$$\left.\begin{aligned} y_1 &= f_1(x_1); \quad z_1 = p_1; \\ y_2 &= f_2(x_2); \quad z_2 = p_2. \end{aligned}\right\} \qquad \text{(III.37)}$$

Уравнения прямолинейной образующей, проходящей через точки $M_1(x_1, y_1, z_1)$ и $M_2(x_2, y_2, z_2)$, принадлежащие соответственно первой и второй кривой, имеют вид

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}, \qquad \text{(III.38)}$$

где $M(x, y, z)$ — текущая точка поверхности.

И, наконец, условие параллельности касательных в точках $M_1(x_1, y_1, z_1)$ и $M_2(x_2, y_2, z_2)$

$$y_1'(x_1) = y_2'(x_2). \qquad \text{(III.39)}$$

Эти пять условий и составляют систему уравнений, задающую поверхность, в виде

$$\left.\begin{aligned} &1)\ y_1 = f_1(x_1) \text{ при } z = z_1; \\ &2)\ y_2 = f_2(x_2) \text{ при } z = z_2; \\ &3)\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}; \\ &4)\ y_1'(x_1) = y_2'(x_2); \\ &5)\ y = y_1 + (y_2 - y_1)\frac{z - z_1}{z_2 - z_1}. \end{aligned}\right\} \qquad \text{(III.40)}$$

Первые четыре уравнения этой системы позволяют найти значения координат точек $M_1(x_1, y_1, z_1)$ и $M_2(x_2, y_2, z_2)$, через которые проходит прямолинейная образующая поверхности при заданных значениях x и z. Ордината y точки $M(x, y, z)$ определяется по этим данным из пятого уравнения (рис. 63).

Данная система уравнений составлена для случая, когда в качестве опорных кривых выбираются ватерлинии. Если ватерлинии могут быть заданы в виде кривых второго порядка, то система приводится к явному уравнению вида

$$y = f(x, z). \qquad \text{(III.41)}$$

Пусть ватерлинии определяются уравнениями

$$\begin{aligned} y_1 &= m_0 + m_1 x_1 + m_2 x_1^2; \\ y_2 &= n_0 + n_1 x_2 + n_2 x_2^2, \end{aligned} \qquad \text{(III.42)}$$

тогда четвертое уравнение системы (III.40) можно записать в виде равенства

$$m_1 + 2m_2 x_1 = n_1 + 2n_2 x_2.$$

Выражая из него x_1 через x_2 и решая совместно с третьим уравнением системы, получим x_1 и x_2 как функции от x и z. Подставляя x_1 и x_2 в первые два уравнения системы (III.40), опре-

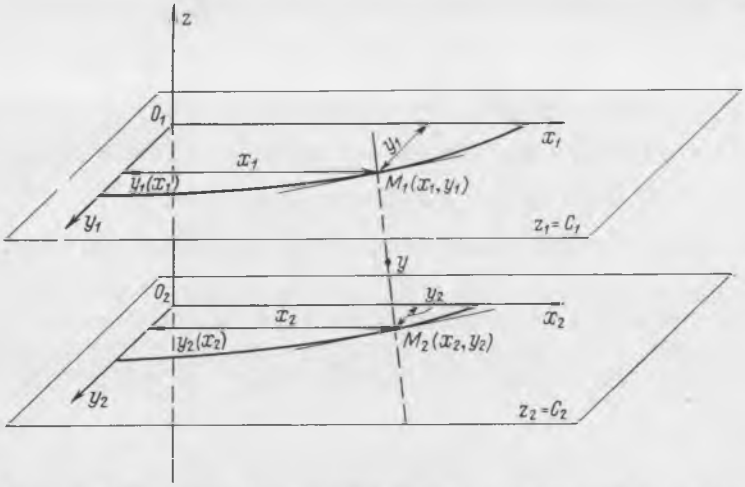

Рис. 63. Положение заданных ватерлиний и прямолинейных образующих судовой поверхности в общепринятой системе координат судна.

делим y_1 и y_2. Подставляя координаты точек $M_1[x_1(x, z); y_1(x, z); z_1]$ и $M_2[x_2(x, z); y_2(x, z); z_2]$ в пятое уравнение системы, легко получить уравнение развертывающейся поверхности, натянутой на заданные линии, в виде

$$y = \frac{D_1z^3 + D_2z^2 + D_3z + D_4xz + D_5x^2z + D_6z^2x + D_7x^2 + D_8x + D_9}{(D_{10} + D_{11}z)^2}. \tag{III.43}$$

Последовательность расчета коэффициентов D_i ($i = 1, 2, \ldots, 11$) на ЭВМ следующая:

1) $d_0 = m_0 - n_0$; $d_1 = m_1 - n_1$; $d_2 = m_2 - n_2$;

2) $K_1 = 2m_2(z_2 - z_1)$; $K_2 = z_2d_1$; $K_3 = -d_1$; $K_4 = 2d_2$;
$K_5 = 2(n_2z_2 - m_2z_1)$;

3) $l_1 = 4m_2n_2$; $l_2 = 2d_1m_2z_1$; $l_3 = -2d_1m_2$; $l_4 = 4m_2d_2$;
$l_5 = 4m_2(n_2z_2 - m_2z_1)$;

4) $p_1 = m_0l_4^2 + m_1l_3l_4 + m_2l_3^2$; $p_2 = l_4(2m_0l_5 + m_1l_2) + l_3(m_1l_5 + 2m_2l_2)$; (III.44)
$p_3 = m_2l_1^2$; $p_4 = l_1(m_1l_5 + 2m_2l_2)$; $p_5 = l_1(m_1l_4 + 2m_2l_3)$;
$p_6 = m_0l_5^2 + m_1l_2l_5 + m_2l_2^2$;

5) $s_1 = n_0K_4^2 + n_1K_3K_4 + n_2K_3^2$; $s_2 = K_4(2n_0K_5 + n_1K_2) +$
$+ K_3(n_1K_5 + 2n_2K_2)$; $s_3 = n_2K_1^2$; $s_4 = K_1(n_1K_5 + 2n_2K_2)$;
$s_5 = K_1(n_1K_4 + 2n_2K_3)$; $s_6 = n_0K_5^2 + n_1K_2K_5 + n_2K_2^2$;

6) $q = 1/(z_2 - z_1)4m_2^2$; $D_1 = q(4m_2^2s_1 - p_1)$; $D_2 = q(4m_2^2s_2 - p_2 -$
$- 4m_2^2s_1z_1 + z_2p_1)$; $D_3 = q(4m_2^2s_6 - p_6 - 4m_2^2s_2z_1 + z_2p_2)$;
$D_4 = q(4m_2^2s_4 - p_4 - 4m_2^2s_2z_1 + z_2p_5)$; $D_5 = q(4m_2^2s_3 - p_3)$;
$D_6 = q(4m_2^2s_5 - p_5)$; $D_7 = q(z_2p_3 - 4m_2^2z_1s_3)$;
$D_8 = q(z_2p_4 - 4m_2^2z_1s_4)$; $D_9 = q(z_2p_6 - 4m_2^2z_1s_6)$; $D_{10} = K_5$; $D_{11} = K_4$.

Следует заметить, что перед составлением уравнения необходимо проверить графически положение касательных на заданных кривых. Если на заданные кривые нельзя натянуть непрерывную развертывающуюся поверхность, то в процессе вычис-

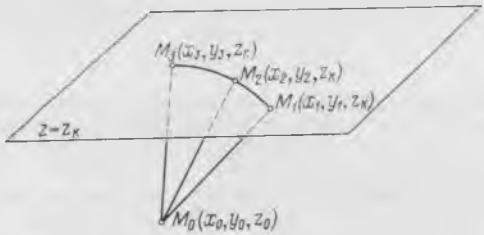

Рис. 64. Направляющая кривая и вершина M_0 конической поверхности.

лений ординат на ЭВМ на каком-нибудь участке поверхности ординаты y примут значения, резко отличающиеся от искомых. Это значит, что на проектируемом участке находится особая точка. Избавиться от нее можно только изменением любой из заданных линий.

Уравнение поверхности в виде (III.43) используется для описания подводной части судна, когда это необходимо для гидродинамических исследований. Хорошо аппроксимируются таким уравнением те части борта, которые имеют незначительную кривизну и расположены близко к палубе.

Для составления уравнения конической поверхности, направляющая которой совпадает с какой-нибудь ватерлинией или ее частью (рис. 64), задаются следующие условия:

1) $y_к = f(x_к)$; $z = z_к$, где $z_к$ — аппликата ватерлинии;

2) $M_0(x_0, y_0, z_0)$ — вершина конуса;

3) $\frac{x - x_0}{x_к - x_0} - \frac{y - y_0}{y_к - y_0} = \frac{z - z_0}{z_к - z_0}$ — уравнение прямолинейной образующей, проходящей через текущую точку поверхности $M(x, y, z)$, а $M_к(x_к, y_к, z_к)$ — точка на направляющей линии.

Из уравнения прямолинейной образующей определяется y в виде

$$y=y_0+(y_к-y_0)\frac{z-z_0}{z_к-z_0};$$

где

$$y_к=f(x_к),\ \text{а}\ x_k=x_0+(x-x_0)\frac{z_к-z_0}{z-z_0}.$$

Если уравнение ватерлинии задано кривой вида

$$y=a_3+a_2(x-x_1)^{a_1},$$

то уравнение конической поверхности имеет вид

$$y=y_0+\left\{a_3+a_2\left[x_0+(x-x_0)\frac{z_к-z_0}{z-z_0}-x_1\right]^{a_1}-y_0\right\}\frac{z-z_0}{z_к-z_0}. \quad \text{(III.45)}$$

Коэффициенты a_1 и a_2 определяются по трем заданным точкам направляющей кривой $M_1(x_1,\ y_1)$, $M_2(x_2,\ y_2)$, $M_3(x_3,\ y_3)$ из системы

$$\left.\begin{aligned} y_1&=a_3+a_2(x_1-x_1)^{a_1};\\ y_2&=a_3+a_2(x_2-x_1)^{a_1};\\ y_3&=a_3+a_2(x_3-x_1)^{a_1}.\end{aligned}\right\}$$

Из первого уравнения легко получить коэффициент $a_3=y_1$, и тогда второе и третье уравнения используются для определения коэффициентов a_1 и a_2 в виде

$$a_1=\frac{\ln\left(\frac{y_2-y_1}{y_3-y_1}\right)}{\ln\left(\frac{x_2-x_1}{x_3-x_1}\right)}; \quad \text{(III.46)}$$

$$a_2=\frac{y_2-y_1}{(x_2-x_1)^{a_1}}. \quad \text{(III.47)}$$

Когда точка $M_1(x_1,\ y_1)$ расположена так, что x_1 меньше, чем x_2 и x_3, для определения a_2 нужно использовать формулу

$$a_2=\frac{x_2-x_1}{(y_2-y_1)^{a_1}}.$$

В этом случае в уравнение конической поверхности вместо a_1 войдет коэффициент $a_4=1/a_1$, и уравнение поверхности имеет вид

$$y=y_0+\left[y_1+\left(\frac{x_0(z-z_к)+x(z_к-z_0)-x_1(z-z_0)}{a_2(z-z_0)}\right)^{a_4}-y_0\right]\frac{z-z_0}{z_к-z_0}. \quad \text{(III.48)}$$

Если направляющая конуса не может быть выражена уравнением параболического вида, то ее приходится описывать с помощью трансформированной верзиеры.

Пусть уравнение направляющей задано в виде (III.28) при $x = x_к$. $A(x_0, y_0, z_0)$ — координаты вершины. Тогда

$$z_к = z_0 + (z - z_0)\frac{x_к - x_0}{x - x_0},$$

а $y_к$ определяется по уравнению (III.28) методом «невязок». После определения $y_к$ определяется y при заданном значении x и z по формуле

$$y = y_0 + (y_к - y_0)\frac{x - x_0}{x_к - x_0}. \qquad \text{(III.49)}$$

Если поверхность натягивается на кривые с перегибом, в месте перегиба одной из заданных кривых может не оказаться касательной, параллельной касательной на другой заданной кривой. В таком случае точка перегиба принимается за вершину конуса, и на поверхности выделяется конический участок, координаты точек которого определяются по приведенной схеме.

Для описания цилиндрических поверхностей может быть использована система (III.40). Если направляющая описывается в виде $y = y_1 + a_2(x - x_1)^{a_1}$, тогда для составления уравнения прямолинейной образующей удобно задавать две точки, расположенные на ДП. Пусть направляющая определяется точками $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$, $M_3(x_3, y_3, z_3)$, где $z_к$ — аппликата кривой. Пусть $y_1 = 0$, тогда для образующей задаются точки $M_1(x_1, 0, z_к)$ и $M_4(x_4, 0, 0)$. Уравнение цилиндрической поверхности в этом случае имеет вид

$$y = y_1 + a_2\left[x - x_4 - (x_1 - x_4)\frac{z}{z_к}\right]^{a_1}. \qquad \text{(III.50)}$$

Таким уравнением легко описываются транец и корма эллиптического типа.

Цилиндрическая вставка задается уравнением шпангоута, а для шпангоута задаются направление килевой линии, скуловое закругление и бортовая линия. Тогда для задания цилиндрической вставки на ЭВМ используется следующее уравнение:

$$y = \begin{cases} kz + b, & \text{если } 0 \leqslant z \leqslant z_p; \\ f_1(z), & \text{если } z_p < z < z_b; \\ f_2(z), & \text{если } z \geqslant z_b. \end{cases} \qquad \text{(III.51)}$$

Точка z_p — это точка притыкания скулового закругления к днищу, а z_b — точка притыкания закругления к борту; $y = kz + b$ — уравнение днищевой ветви шпангоута; $y = f_1(z)$ — уравнение скулового закругления.

Если скуловое закругление выполнено по радиусу, то

$$y = y_0 + \sqrt{R^2 - (z - z_0)^2}, \qquad \text{(III.52)}$$

если же нужно обеспечить притыкание скулового закругления в заданных точках по касательным, то уравнение берется в виде

$$y = y_3 - a_2 (z_3 - z)^{a_1}, \qquad \text{(III.53)}$$

где $M_3(z_3, y_3)$ — точка притыкания к вертикальному борту (рис. 65).

Если борт имеет наклон, то его уравнение задается в виде прямой с угловым коэффициентом $y = k_1 z + b_1$. Для определения k_1 и b_1 необходимо задать еще одну точку $M_6(z_6, y_6)$. При этом уравнение скулового закругления имеет вид

$$y = a_3 - a_2 (z_3 - z)^{a_1} + a_4 (z_3 - z). \qquad \text{(III.54)}$$

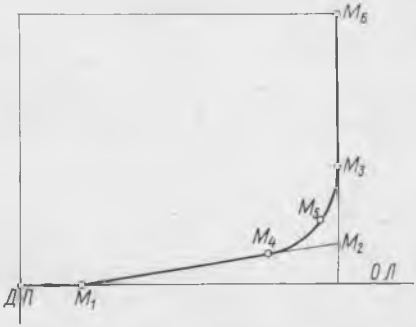

Рис. 65. Задание точек на шпангоуте для составления уравнения цилиндрической вставки.

Для цилиндрической вставки судна с плоским днищем и вертикальными бортами уравнение поверхности проще:

$$y = \begin{cases} y_3 - a_2 (z_3 - z)^{a_1}, & \text{если } z \leqslant z_p; \\ y_b, & \text{если } z > z_p, \end{cases}$$

где z_p — аппликата точки притыкания скулового закругления к бортовой ветви.

Как и для цилиндрической вставки, составляется уравнение поверхности палубы, когда линия ДП по палубе параллельна основной плоскости. Если палуба образуется квадратичной параболой со стрелкой погиби $B/50$, то ее уравнение имеет вид

$$y = 2{,}5 \sqrt{B\left(\frac{B}{50} + z_п - z\right)}, \qquad \text{(III.55)}$$

где $z_п$ — аппликата линии палубы у борта на миделе.

Если линия палубы на ДП наклонная прямая (рис. 66), то для составления уравнения палубы достаточно задать две точки на ДП и уравнение сечения при $x = x_1$. Пусть уравнение сечения по палубе при $x = x_1$

$$y = 2{,}5 \sqrt{B\left(\frac{B}{50} + z_{п1} - z\right)},$$

а уравнение образующей, проходящей через точки $M_1(x_1, O, z_{п1})$ и $M_2(x_2, O, z_{п2})$:

$$\frac{z - z_{п1}}{z_{п2} - z_{п1}} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}.$$

Отсюда уравнение палубы запишется в виде

$$y = 2{,}5\sqrt{B\left[z_{п2} + \left(z_{п1} + \frac{B}{50} - z_{п2}\right)\frac{x - x_2}{x_1 - x_2} - z\right]}. \quad \text{(III.56)}$$

В настоящее время предпочитают делать палубу «домиком»

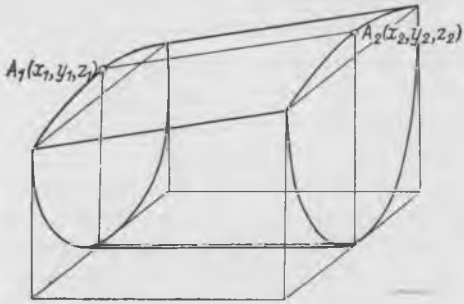

Рис. 66. Цилиндрическая часть палубы.

из двух наклонных плоскостей. В этом случае уравнение палубы при стрелке погиби $B/50$ имеет вид

$$y = \frac{B}{2} - 25(z - z_п). \quad \text{(III.57)}$$

Если ДП пересекает палубу по наклонной линии, уравнение плоскостей записывается в виде

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0, \quad \text{(III.58)}$$

где $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$ и $M_3(x_3, y_3, z_3)$ — любые точки, определяющие положение плоскости.

Все приведенные уравнения применяются для описания небольших участков поверхности корпуса возле форштевня, на транцевой или эллиптической корме, возле палубы, цилиндрической вставки, т. е. в тех местах, которые либо традиционно проектируются из развертывающихся поверхностей, либо легко ими заменяются.

При описании носовой или кормовой оконечностей судна, площадь которых велика, а форма сложна, такими простыми уравнениями ограничиваться невозможно. Объясняется это тем, что для задания опорных линий приходится применять уравне-

ние трансформированной верзиеры в виде (III.28). Тогда система уравнений, задающая судовую поверхность, принимает такой вид:

$$\left.\begin{aligned}
&1)\ a_1y_1^3+y_1^2(a_2z_1+a_3)+y_1(a_4z_1^2+a_5z_1+a_6)+\\
&\quad+a_7z_1^3+a_8z_1^2+a_9z_1+a_{10}=0;\\
&2)\ b_1y_2^3+y_2^2(b_2z_2+b_3)+y_2(b_4z_2^2+b_5z_2+b_6)+\\
&\quad+b_7z_2^3+b_8z_2^2+b_9z_2+b_{10}=0;\\
&3)\ \frac{z-z_1}{z_2-z_1}=\frac{x-x_1}{x_2-x_1};\\
&4)\ y_1'(z_1)=y_2'(z_2);\\
&5)\ y=y_1+(y_2-y_1)\frac{x-x_1}{x_2-x_1},
\end{aligned}\right| \qquad \text{(III.59)}$$

где x_1 — абсцисса первого опорного шпангоута; x_2 — абсцисса второго опорного шпангоута.

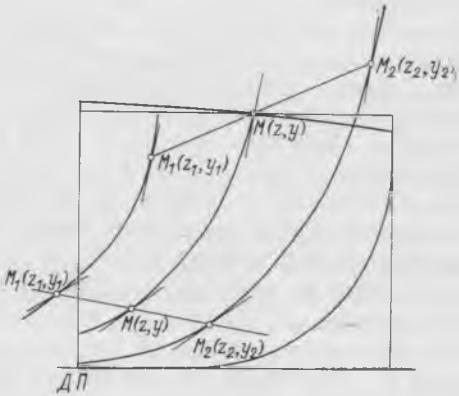

Рис. 67. Прямолинейные образующие, концы которых расположены на геометрическом продолжении опорных линий.

Решение этой системы выполняется на ЭВМ. Производные в четвертом уравнении системы определяются по правилу дифференцирования неявных функций по формулам

$$y'_{1z_1}=-\frac{F^1_{1z_1}}{F'_{1y_1}}; \qquad y'_{2z_2}=-\frac{F'_{2z_2}}{F'_{2y_2}}, \qquad \text{(III.60)}$$

где

$$\left.\begin{aligned}
F'_{1z_1}&=a_2y_1^2+2a_4y_1z_1+a_5y_1+3a_7z_1^2+2a_8z_1+a_9;\\
F'_{1y_1}&=3a_1y_1^2+2y_1(a_2z_1+a_3)+a_4z_1^2+a_5z_1+a_6;\\
F^2_{2z_2}&=b_2y_2^2+2b_4y_2z_2+b_5y_2+3b_7z_2^2+2b_8z_2+b_9;\\
F'_{2y_2}&=3b_1y_2^2+2y_2(b_2z_2+b_3)+b_4z_2^2+b_5z_2+b_6.
\end{aligned}\right| \qquad \text{(III.61)}$$

Ординаты поверхности y определяются по пятому уравнению системы (III.59), но после того, как по первым четырем уравнениям найдутся точки $M_1(y_1, z_1)$ и $M_2(y_2, z_2)$, для которых выполняется четвертое условие.

При проектировании корпуса судна из развертывающихся поверхностей, в отличие от обычных форм корпуса, приходится строить геометрическое продолжение опорных линий. Это связано с тем, что на крайних ватерлиниях точки определяются с помощью прямолинейных образующих, концы которых выходят за пределы корпуса судна (рис. 67).

§ 11

Согласование теоретического чертежа судна с РО на ЭВМ

Обычно при проектировании обводов судна задаются сечения поверхности корпуса плоскостями, параллельными трем взаимно перпендикулярным координатным плоскостям: основной, миделевой и диаметральной. Для согласования всех сечений необходимо, чтобы ординаты в точках пересечения линий сечений на всех трех проекциях были равны. Работу по согласованию линий теоретического чертежа выполняет при его разработке конструктор, а потом — на плазе. Если сечения задаются аналитически с помощью параболографического метода или радиусографии, то согласование сечений требует большой дополнительной работы [20, 21, 41, 47].

Согласование судов с РО на ЭВМ отличается от обычного согласования обводов на чертеже. Принципиальное отличие в том, что задаются не сечения, а участки поверхностей. Поверхность, заданная аналитически, согласована по сечениям, поэтому требуют согласования между собой участки поверхностей, заданные разными уравнениями.

При проектировании обводов судов с РО на ЭВМ нет необходимости вычерчивать все линии теоретического чертежа, т. е. ватерлинии, шпангоуты и батоксы. Вычерчивают только характерные шпангоуты, которые и выбирают в качестве опорных для составления аналитического выражения судовой поверхности. Такими опорными шпангоутами всегда являются нулевой, двадцатый, мидель и сечение в плоскости движителя.

Выбор опорных линий является самым важным и кропотливым этапом в процессе проектирования обводов на ЭВМ.

На базе опыта проектирования обводов морских и речных судов с РО на ЭВМ определен объем и содержание стандартных подпрограмм, которые образуют комплекс, необходимый для полного описания обводов.

В комплекс входят следующие стандартные подпрограммы.

I. Подпрограммы, позволяющие получить коэффициенты аппроксимирующих кривых с одновременной проверкой расчетных ординат: а) по трансформированной верзиере; б) по кривой с произвольным показателем степени и вершиной на оси координат; в) по квадратичной параболе; г) по наклонной кривой с переменным показателем степени.

II. Программа для определения ординат развертывающейся поверхности, у которой опорными линиями являются шпангоуты, заданные в виде трансформированной верзиеры.

III. Подпрограммы для определения ординат цилиндрической поверхности в зависимости от положения в координатной системе судна: а) цилиндрическая вставка судов с наклонным днищем; б) цилиндрическая вставка судов с плоским днищем; в) цилиндрический участок поверхности судна, направляющая которого идет по ватерлинии, заданной в виде параболы с произвольным показателем степени; г) цилиндрический участок поверхности судна, направляющая которого совпадает с ватерлинией, заданной в виде трансформированной верзиеры; д) цилиндрический участок поверхности судна, направляющая которого совпадает с участком шпангоута, заданным в виде параболы с произвольным показателем степени; е) цилиндрический участок поверхности судна, направляющая которого совпадает со шпангоутом, заданным в виде трансформированной верзиеры; ж) палуба с параболическим бимсом, образующая которой параллельна основной плоскости; з) палуба с параболическим бимсом и наклонной образующей.

IV. Подпрограммы для различных конических участков: а) с направляющей по ватерлинии, заданной в виде параболы произвольной степени; б) с направляющей по ватерлинии, заданной в виде трансформированной верзиеры; в) с направляющей по шпангоуту, заданному в виде трансформированной верзиеры.

V. Подпрограмма явного задания тех частей поверхности судна, ватерлинии которых описываются квадратичной параболой.

VI. Подпрограммы для описания неразвертывающихся участков в местах переходов: а) от цилиндрической вставки на носовую оконечность; б) от цилиндрической вставки на кормовую оконечность; в) между двумя развертывающимися участками оконечности, когда ординаты определяются по ватерлиниям; г) между двумя участками развертывающихся поверхностей в корме, когда ординаты определяются по батоксам; д) от развертывающейся части борта на форштевень или ахтерштевень.

VII. Подпрограммы для определения ординат линий пересечения между собой двух развертывающихся поверхностей: а) на линиях слома; б) на бортовой линии; в) на ДП; г) на острой скуле.

Основная программа, позволяющая описывать любой участок развертывающейся поверхности,— программа II. Все остальные подпрограммы являются ее частными случаями и нужны для сокращения времени проектирования. Для описания универсальной программы II воспользуемся примером проектирования носовой оконечности (рис. 68).

В носовой оконечности нужно задать нулевой шпангоут и шпангоут, ширина которого возле палубы немного меньше ширины на миделе. Оба шпангоута следует вычерчивать вместе с продолжением ниже нулевой ватерлинии и выше палубы.

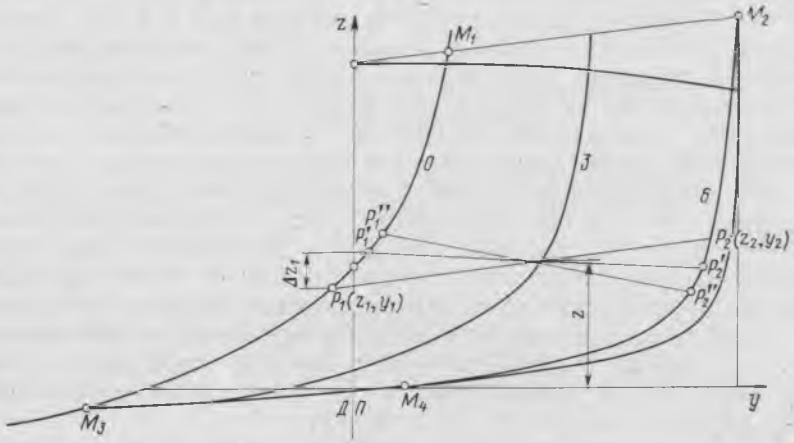

Рис. 68. Построение опорных линий для аналитического задания поверхности судна.

Вниз следует продолжать до той прямолинейной образующей, которая ограничивает поверхность на ДП, а вверх — до той, которая проходит через точку пересечения палубы с ДП на форштевне. В приведенном примере шпангоуты не имеют развала к палубе.

Для аппроксимации опорных шпангоутов используется уравнение трансформированной верзиеры в виде (III.27), а коэффициенты k и l определяются по формулам (III.29) и (III.30). Для перевода уравнения кривой в общесудовую систему координат применяют формулы (III.31) и (III.32).

Информация о кривой состоит из значений углов φ, α_1, α_2, координат вершины верзиеры y_0, z_0, массива $(l-\varepsilon)_i$, состоящего из N членов. Для 10 коэффициентов уравнения (III.28) отводится массив из 10 ячеек A [10] и для решения этого уравнения отводится массив из четырех ячеек C [4].

Алгоритм имеет вид

$$\left.\begin{aligned}
&k=ABS\left(\frac{\frac{S_5}{S_4}-\frac{S_2}{S_3}}{\frac{S_1}{S_3}-\frac{S_2}{S_4}}\right); \quad l=k\frac{S_1}{S_3}+\frac{S_2}{S_3};\\
&S_1=\sum_{i=1}^{N}(l-\varepsilon)_i;\\
&S_2=\sum_{i=1}^{N}x_i^2(l-\varepsilon)_i;\\
&S_3=\sum_{i=1}^{N}x_i^2;\\
&S_4=\sum_{i=1}^{N}x_i^4;\\
&S_5=\sum_{i=1}^{N}x_i^4(l-\varepsilon)_i,
\end{aligned}\right\} \qquad \text{(III.62)}$$

$\varkappa$ и λ определяются по формулам (III.31), а коэффициенты a_i по формулам (III.32). Коэффициенты A_i выводятся на печать для дальнейшего использования в системе пяти уравнений, задающих поверхность. В этой же программе аппроксимации выполняется расчет корней уравнения (III.28) для проверки точности полученной аппроксимации шпангоутов. Расчет значений ординат y при заданных значениях z выполняется по формуле Кардана.

Алгоритм определения ординат y такой: *

$$\begin{aligned}
&C_1=A_1;\\
&C_2=A_2z+A_3;\\
&C_3=A_4z^2+A_5z+A_6;\\
&C_4=A_7z^3+A_8z^2+A_9z+A_{10}.
\end{aligned}$$

При заданном значении z определяются величины

$$q=\frac{C_2^3}{27C_1^3}-\frac{C_2C_3}{6C_1^2}+\frac{C_4}{C_1};$$

$$p=\frac{3C_1C_3-C_2^2}{9C_1};$$

$$d=q^2+p^2.$$

---

* Коэффициенты A_i и B_i здесь и дальше равны коэффициентам a_i и b_i первого и второго уравнений системы (III.59). Обозначения A_i и B_i вводятся при расчете на ЭВМ.

Если $d \geqslant 0$, то $a_1 = -q + \sqrt{d}$, $b_1 = -q - \sqrt{d}$.
Если $a_1 < 0$, то $a_1 = ABS(a_1)$, $a = -a_1^{1/3}$, если $a_1 > 0$, то $a = a_1^{1/3}$.
Если $b_1 < 0$, то $b_1 = ABC(b_1)$, $b = -b_1^{1/3}$, если $b_1 > 0$, то $b = b_1^{1/3}$.

$$y = a + b - \frac{C_2}{3C_1}.$$

Если $d < 0$, то $r = \sqrt{|p|}$; если $g < 0$, то $r = -r$, $\varphi = \arccos(q/r^3)$;

$$y_1 = -2r\cos(\varphi/3) - \frac{C_2/3}{C_1};$$

$$y_2 = -\frac{C_2/3}{C_1} + 2r\cos(1{,}047\,197 - \varphi/3);$$

$$y_3 = -\frac{\frac{C_2}{3}}{C_1} + 2r\cos(1{,}047\,197 + \varphi/3).$$

После выдачи на печать координат z и y необходимо нанести расчетные точки на заданные опорные шпангоуты. Совпадение должно быть в пределах точности построения теоретического чертежа. Обычно для полного совпадения расчетной и заданной кривой достаточно двух-трех попыток.

Если шпангоут имеет несколько перегибов, то аппроксимацию можно сделать с помощью двух уравнений, но при этом нужно, чтобы соединение было с перекроем, а расчетные ординаты в месте перекроя совпадали с точностью до третьего знака после запятой. Расчет обычно ведется в дециметрах в масштабе чертежа.

После получения массивов коэффициентов A [10] для двух опорных шпангоутов выполняется расчет ординат промежуточных шпангоутов по системе пяти уравнений (III.59).

Расчет координат поверхности по системе (III.59) выполняют в следующей последовательности. Задаются начальные значения z_1, y_1 и y_2 и шаг по Δz_1, Δy_1 и Δy_2. Затем вычисляются значение z_2 по формуле

$$z_2 = \frac{(x - C_2)z_1 + (C_2 - C_1)z}{x - C_1},$$

где $C_1 = x_1$, $C_2 = x_2$ определяют положение кромочных шпангоутов. Шпангоуту x_1 соответствует массив коэффициентов A_i, а шпангоуту x_2 — массив B_i $(i = 1, 2, \ldots, 10)$.

Следует заметить, что при определении ординат шпангоута $x = x_1$ появляется деление на нуль при определении z_2, поэтому ординаты следует вычислять непосредственно по уравнению этого шпангоута, входящему в систему, без поиска прямолинейной образующей. Если же необходимо знать положение прямолинейных образующих, проходящих через расчетные точки пер-

вого шпангоута, то достаточно поменять местами C_1 и C_2 и переставить обозначения массивов A_i и B_i.

Для расчета на ЭВМ система (III.59) переписывается в виде

$$\left.\begin{aligned}
&1)\ z_2=\frac{(x-C_2)\,z_1+(C_2-C_1)\,z}{x-C_1};\\
&2)\ f_2=a_1y_1^3+y_1^2(a_2z_1+a_3)+y_1(a_4z_1^2+a_5z_1+a_6)+\\
&\quad+a_7z_1^3+a_8z_1^2+a_9z_1+a_{10}=0;\\
&3)\ f_3=b_1y_2^3+y_2^2(b_2z_2+b_3)+y_2(b_4z_2^2+b_5z_2+b_6)+\\
&\quad+b_7z_2^3+b_8z_2^2+b_9z_2+b_{10}=0;\\
&4)\ f_4=(f_3)'_{z_2}(f_2)'_{y_1}-(f_3)'_{y_2}(f_2)'_{z_1}=0;\\
&5)\ y=(y_2-y_1)\frac{x-C_1}{C_2-C_1}+y_1.
\end{aligned}\right\}\qquad \text{(III.63)}$$

При задании начальных значений z_1 следует в программе предусмотреть два случая. Первый случай, когда концы прямолинейных образующих поверхности на первом шпангоуте ниже, чем на втором, тогда z_1 выбираются в зависимости от z по формуле

$$z_1=\frac{z}{a}-b, \qquad \text{(III.64)}$$

где a равно 2 или 3, в зависимости от наклона образующих, а b нужно выбирать таким образом, чтобы не выходить за пределы поверхности судна или ее продолжения. Если образующие на первом шпангоуте выше, чем на втором, то z_1 можно принимать равным z. В программе нужно предусмотреть условие

$$z_1=z. \qquad \text{(III.65)}$$

Если шпангоут тоннельного типа, то выше тоннеля ординаты насчитывают по продолжению верзиеры и, как правило, оказываются больше ширины судна. Поэтому по признаку

$$y>B/2 \qquad \text{(III.66)}$$

выполняется переход к расчету следующего шпангоута.

После определения начальных приближений z_1 и z_2 по уравнениям опорных шпангоутов (второе и третье уравнения системы (III.63) определяются ординаты y_1 и y_2. Их расчет выполняется по «невязкам», а приближения определяют путем половинного деления.

Последовательность расчета показана на рис. 68.

Предположим, что определяется ордината y на 3-м теоретическом шпангоуте на высоте z (рис. 68). По формуле (III.64) или (III.65) определяется первое приближение z_1, затем по первой формуле системы (III.63) — первое приближение z_2.

По второму и третьему уравнениям системы находятся y_1 и y_2. Это дает координаты концов образующей P_1P_2. Затем по четвертой формуле системы определяется и запоминается значение f_4. После этого задается новое значение z_1 путем прибавления шага Δz_1. По той же схеме — определяется второе положение прямолинейной образующей $P_1'P_2'$ и снова вычисляется f_4, которое сравнивается с предыдущим и запоминается. Этот процесс продолжается до тех пор, пока знаки f_{4i} и f_{4i+1} не станут различными. Тогда следующее значение z_1 определяют путем половинного деления z_{1i} и z_{1i+1}, процесс повторяют, пока не выполнится условие $|f_{4i}| < \delta$, где δ — точность заданного расчета. Когда $|f_{4i}| < \delta$, по последним значениям y_{1i} и y_{2i} определяют ординату y по пятой формуле системы.

При первом проверочном расчете следует вывести на печать, кроме найденных координат x, y, z, координаты концов прямолинейной образующей, проходящей через заданную точку поверхности. Это нужно для проверки совпадения расчетного положения образующих с графическим, а также для оценки правильности выбора точности расчета.

Если на опорных шпангоутах нет точек с параллельными касательными, то это можно обнаружить по двум признакам. В первом случае, когда отсутствуют параллельные касательные, может выполняться первое сравнение

$$f_{4i} = f_{4i+1}, \tag{III.67}$$

но не выполняться второе условие

$$|f_{4i}| < \delta. \tag{III.68}$$

Тогда расчет ординат нужно прекратить. Во втором случае, когда не выполняется условие (III.67) при многократной перемене шага Δz_1, нужно предусмотреть счетчик перемены знака шага Δz_1. Когда знак шага поменяется больше трех раз, расчет нужно прекратить.

Точность, с которой определяется функция, зависит от формы шпангоутов. Это объясняется тем, что для избежания деления на нуль четвертое уравнение системы (III.63) задается в виде

$$f_4 = (f_3)'_{z_2}(f_2)'_{y_1} - (f_3)'_{y_2}(f_2)'_{z_1}.$$

При этом, если производные, входящие в это выражение, очень малы, то условие (III.68) выполняется при большой разнице в положении касательных на концах прямолинейной образующей. В этом случае нужно задать меньшее значение δ. Обычно точность принимается равной 0,01. Ординаты y определяются с точностью 0,0001.

Алгоритмы расчета ординат конических и цилиндрических участков поверхности значительно проще, потому что ординаты

определяются по уравнениям, заданным в явном виде. Сложности возникают только в том случае, когда направляющая не может быть описана уравнением параболического типа. Тогда приходится аппроксимировать направляющую с помощью трансформированной верзиеры.

Для расчета ординат конической поверхности, у которой направляющая совпадает с каким-нибудь шпангоутом, заданным в виде трансформированной верзиеры, следует иметь стандартную подпрограмму IV, в. Она составляется по следующей схеме.

Пусть заданы координаты вершины конуса $A(x_0, y_0, z_0)$ и массив коэффициентов A_i $(i = 1, 2, \ldots, 10)$ уравнения (III.28) для направляющей, расположенной на шпангоуте с абсциссой x_1. Прямолинейные образующие поверхности проходят через вершину и какую-нибудь точку на направляющей. Пусть необходимо найти ординату z_1 при заданных значениях x и z. По формуле

$$z_1 = z_0 + (z - z_0)\frac{x_1 - x_0}{x - x_0}$$

вычисляется значение z_1 конца прямолинейной образующей, проходящей через точку поверхности с заданными значениями x и z. Зная z_1, способом «невязок» по уравнению направляющей (III.28) определяется ордината y_1 (рис. 69). Затем по уравнению

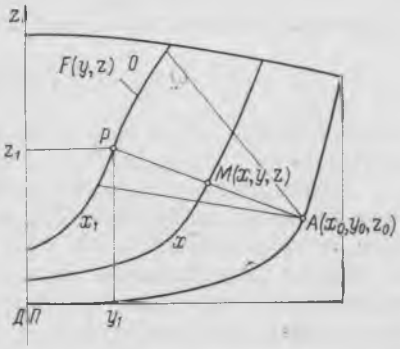

Рис. 69. Конический участок поверхности судна с направляющей по шпангоуту.

$$y = y_0 + (y_1 - y_0)\frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$

определяется ордината y точки M.

В программе следует предусмотреть переход по условию $y = B/2$ на конец программы, так как точки, расположенные вне судна, не нужны.

При задании направляющей по ватерлинии (подпрограмма IV, б) алгоритм расчета такой же, только меняются местами координаты x и z.

Когда направляющая конической поверхности совпадает с подпалубной ватерлинией, то она, как правило, может быть записана в виде

$$y = a_3 + a_2(x - x_1)^{a_1}.$$

Тогда расчет значительно упрощается (подпрограмма IV, а), так как уравнение поверхности записывается в явном виде.

В программе следует только предусмотреть формулы для определения коэффициентов уравнения a_1, a_2 и a_3. Тогда для выполнения расчета нужно задать координаты трех точек на направляющей и координаты вершины конической поверхности. Расчетные формулы приведены в § 10. Коэффициенты определяются по формулам

$$a_1=\frac{\ln\left(\frac{y_2-y_1}{y_3-y_1}\right)}{\ln\left(\frac{x_2-x_1}{x_3-x_1}\right)};$$

$$a_2=(y_2-y_1)/(x_2-x_1)^{a_1};\quad a_3=y_3.$$

Расчет ординат выполняется по формуле (III.45). Если выражение, стоящее в квадратных скобках,

$$Q=\left[x_0+(x-x_0)\frac{z_k-z_0}{z-z_0}-x_1\right]$$

отрицательно, то для избежания остановки счета следует предусмотреть условный переход при $Q<0$ на конец счета по z.

Составление остальных стандартных подпрограмм не содержит никаких особенностей и выполняется по расчетным формулам, приведенным в § 10.

Кроме подпрограмм, описывающих разные участки судовой поверхности, в комплекс включаются еще две стандартные подпрограммы для определения координат точек, принадлежащих линиям пересечения. Одна подпрограмма нужна для определения точек пересечения шпангоутов на скуле, на борту или на продольном сломе. Вторая подпрограмма необходима для определения точек пересечения ватерлиний с ДП.

Алгоритм определения точек пересечения двух заданных разными уравнениями поверхностей по шпангоутам следующий. При заданном значении x нужно найти такое значение z, при котором ордината y имеет на двух пересекающихся поверхностях одинаковое значение. Для этого задается первое приближение z_0 и шаг Δz. При данном z_0 вычисляются значения y_{10} и y_{20} соответственно по уравнениям первой и второй пересекающихся поверхностей. Затем определяется и запоминается разность

$$\Delta y_0=y_{10}-y_{20}.$$

Далее вычисляется $z_1=z_0+\Delta z$, снова определяются y_{11} и y_{21} и разность

$$\Delta y_1=y_{11}-y_{21}.$$

Если Δy_0 и Δy_1 одного знака, то процесс повторяется, если же знаки у Δy_0 и Δy_1 разные, то определяется $z_2=\frac{(z_0+z)}{2}$ при котором снова вычисляется разность

$$\Delta y_2=y_{12}-y_{22}.$$

Эта разность сравнивается с Δy_0 и Δy_1. Если Δy_2 имеет разный знак с Δy_0, то значение z_3 вычисляется по формуле

$$z_3=(z_0+z_2)/2,$$

а если Δy_2 имеет разные знаки с Δy_1, то

$$z_3=\frac{z_1+z_2}{2}.$$

Процесс повторяется до тех пор, пока разность $(y_{i+1}-y_i)$ не станет по модулю меньше δ, которое равно точности расчета ординат. Тогда y_{i+1} и z_{i+1} и будут координатами точки пересечения двух ветвей шпангоута.

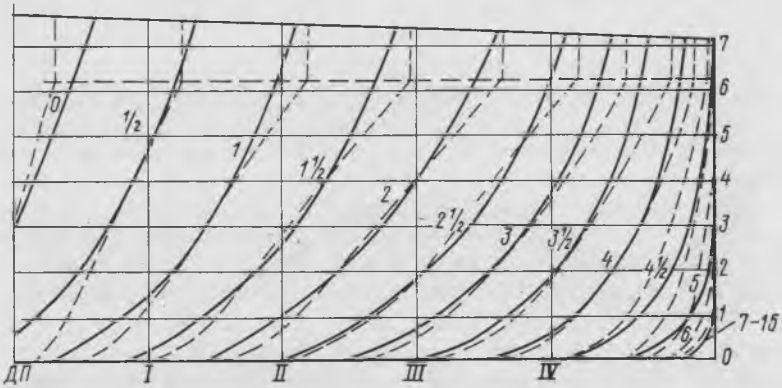

Рис. 70. Носовая оконечность речного судна.

—— исходные обводы, – – – обводы с РО, спроектированные на ЭВМ «Мир-1».

При определении точки пересечения ватерлинии с ДП алгоритм такой же, но вместо z_i задаются значения x_i. Значение y_2 на ДП всегда равно нулю, поэтому искомыми в этом случае являются такие значения x_i, при которых y_i поверхности становится по модулю меньше $\delta=0{,}0001$.

На рис. 70 показана носовая оконечность сухогрузно-наливного речного судна, обводы которого спроектированы с помощью ЭВМ. Неразвертывающиеся участки оставлены между 2 и 2,5 теоретическими шпангоутами и между 4,5 и 5,5. В качестве опорных на первом развертывающемся участке приняты нулевой и второй теоретические шпангоуты. Каждый из них описан одним уравнением трансформированной верзиеры. Точно так же заданы 2,5 и 4,5 теоретические шпангоуты, которые являются опорными для второго развертывающегося участка носовой оконечности. Шпангоут на цилиндрической вставке описан в виде

$$y=\begin{cases} y_3-a_2(z_3-z)^{a_1}, & \text{если } z\leqslant z_p; \\ \dfrac{B}{2}, & \text{если } z>z_p, \end{cases}$$

где z_p — аппликата точки притыкания скулового закругления к бортовой ветви шпангоута.

Ординаты точек первого неразвертывающегося участка (от 2,5 до 2 шпангоута) определяются по ватерлиниям, которые на этом участке описываются по формулам (III.26). Коэффициенты a_1, a_2, a_3 и a_4 для каждой ватерлинии определяются по координатам точек $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$, $M_3(x_3, y_3, z_3)$ и $M_4(x_4, y_4, z_4)$. Точки M_2 и M_1 выбираются соответственно на 2,5 и 2,75 теоретических шпангоутах. Их координаты определяются по уравнению второго развертывающегося участка. Точки M_3

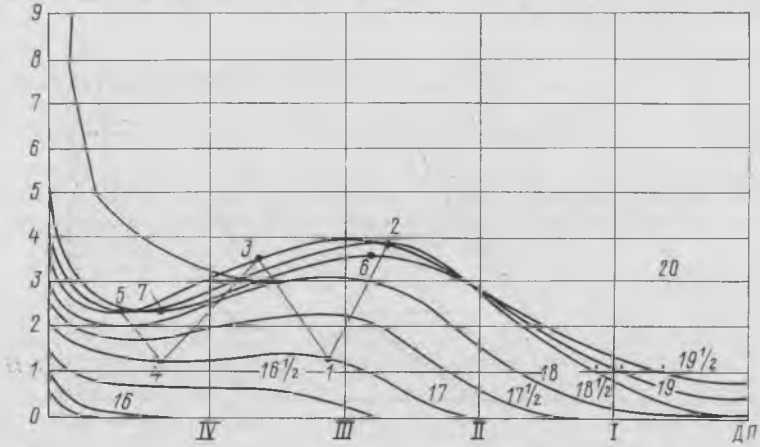

Рис. 71. Кормовые обводы речного судна, спроектированные на ЭВМ «Мир-1».

и M_4 расположены на 2 и 1,75 теоретических шпангоутах первого развертывающегося участка.

Ординаты точек второго неразвертывающегося участка, расположенного между 4,5 и 5,5 шпангоутами, определяются по ватерлиниям, заданным уравнениями (III.24). Для определения коэффициентов a_1, a_2 и a_3 используются координаты точки притыкания к цилиндрической вставке M_1 и точек M_2 и M_3, принадлежащих соответственно шпангоутам 4,5 и 4,25 второго развертывающегося участка.

На рис. 71 показана тоннельная корма этого же судна. Для согласования теоретического чертежа в кормовой оконечности поверхность тоннеля пришлось разделить на несколько участков. Плавное соединение этих участков достигнуто за счет перекроя аппроксимирующих кривых.

На рис. 57, *б* показаны обводы речного мелкосидящего судна с РО, ординаты которого получены на ЭВМ «Раздан-2».

На рис. 18 и 19 показаны спроектированные с помощью ЭВМ обводы транспортного морского судна, построенного в Дании.

Если сравнить его обводы с обводами рис. 57, *б* и 70 и 71, то видно, что последние меньше отличаются от общепринятых хорошо обтекаемых судов. Объясняется это тем, что при их проектировании использованы более разнообразные формы развертывающихся поверхностей.

§ 12

Расчет на ЭВМ кривых плавучести

Расчет кривых плавучести при проектировании обводов с РО целесообразно выполнять параллельно с проектированием. Это значительно облегчает не только расчет кривых, но и выбор формы обводов. Если в процессе расчета ординат судна на ЭВМ для каждого шпангоута одновременно вычислять площадь и статический момент в зависимости от осадки, то тогда в конце расчета каждого участка поверхности можно сразу получить величину объема, ограниченного данной поверхностью, положение его центра величины, масштаб Бонжана и строевые по ватерлиниям и шпангоутам. В конце обсчета всех участков можно получить все эти данные для судна в целом. Сравнение с заданными значениями V, x_c, z_c, α, β, δ и определение участков поверхности, которые потребуют исправления, не составляет труда для опытного конструктора.

В практике мирового судостроения создано несколько систем программ, включающих расчеты по теоретическому чертежу. В Испании разработана система FORAN, которая включает программы для автоматизации проектных работ. Проектная часть, кроме расчетов ходкости и прочности, включает генерирование теоретического чертежа по заданным главным размерениям и коэффициентам полноты и расчеты по теории корабля. В Англии создана и непрерывно совершенствуется система программ Britschips, которая включает расчеты элементов теоретического чертежа, прочности, остойчивости, согласования линий теоретического чертежа и плазовой разбивки, развертки листов наружной обшивки и программы для изготовления деталей судового корпуса на технологическом оборудовании с автоматическим управлением. Примерно такой же объем проектных работ охватывает система программ AUTOKON, созданная в Норвегии.

Специалисты, занимающиеся созданием таких программ, единодушно приходят к выводу, что переход от графического задания теоретического чертежа к заданию его на ЭВМ в виде пространных таблиц исходных данных является громоздким, трудоемким, занимающим много времени и чреватым пагубными для расчетов ошибками. Рекомендуется переход к математическому определению поверхности корпуса уже на начальных стадиях проектирования [89]. В частности, Маккалум приходит к заключению, что применение математического представления

поверхности корпуса судна на начальной стадии проектирования даст много преимуществ, главное из которых состоит в исключении процесса согласования теоретического чертежа. При этом проектировщик должен иметь возможность вмешиваться в процесс проектирования судовой поверхности.

Этим требованиям отвечает описанный выше метод проектирования с помощью ЭВМ обводов с РО, так как вся информация состоит из небольших массивов коэффициентов опорных линий, легко подвергающихся корректировке в процессе расчета ординат сечений.

Памяти таких ЭВМ, как «Мир-1», «Мир-2», «Наири», недостаточно для выполнения всего комплекса расчетов по теоретическому чертежу, но на начальной стадии проектирования на них можно по частям получить не только согласованный теоретический чертеж, плазовую таблицу ординат, но и кривую водоизмещения, строевые по шпангоутам и по ватерлиниям, значения метацентрических радиусов, кривые x_c, z_c и масштаб Бонжана.

В книге В. И. Брегмана «Решение задач статики корабля на ЭВМ» [9] тщательно проанализированы методы расчетов по теоретическому чертежу, заданному в табличном виде. Выбор более или менее точного пути расчета зависит от стадии проектирования и особенностей обводов и может быть сделан на базе алгоритмов, приведенных в работе В. И. Брегмана.

Рассмотрим только ту часть алгоритмов, которые изменяются в связи с особенностями задания на ЭВМ обводов судов с РО.

Расчет водоизмещения на ЭВМ можно выполнять таким же способом, как это делается при ручном счете, т. е. по формуле

$$V_j = \Delta L \left(\sum_{k=0}^{20} \omega_{jk} - \frac{\omega_{j20} + \omega_{j0}}{2} \right), \qquad \text{(III.69)}$$

где $\Delta L = \dfrac{L}{20}$; j — номер ватерлинии при осадке, равной z_j;

$$\omega_{jk} = 2\Delta z \left(\sum_{n=0}^{j} y_{nk} - \frac{y_{0k} + y_{jk}}{2} \right) + \Delta\omega_k; \qquad \text{(III.70)}$$

$\Delta\omega_k$ — площадь той части шпангоута, которая не может быть рассчитана по правилу трапеций.

При этом возможны три принципиально отличных случая: когда шпангоут пересекается с ДП не на основной линии, когда на шпангоуте есть слом и когда имеется тоннель.

Случай 1. Если шпангоут (рис. 72) пересекает ДП в точке, расположенной выше основной плоскости (аналогично, если ниже), то задача заключается в том, чтобы определить аппликату этой точки z_0. На опорных шпангоутах, данных уравнением (III.28), для этого достаточно положить $y = 0$ и решить кубическое уравнение

$$a_7 z^3 + a_8 z^2 + a_9 z + a_{10} = 0. \qquad \text{(III.71)}$$

Для решения (III.71) можно использовать метод «невязок». Задаются $z_{01}=0$ и $z_{02}=z_{\text{ГВЛ}}$ и вычисляется функция

$$f_5=a_7z^3+a_8z^2+a_9z+a_{10}.$$

При заданных значениях z для такого шпангоута $f_{5(1)}$ и $f_{5(2)}$ получаются с разными знаками, поэтому следующее значение определяется путем половинного деления. Далее снова определяется $f_{5(3)}$, сравнивается с $f_{5(1)}$ и $f_{5(2)}$, выбирается из них такое значение f_5, которое имеет знак, противоположный знаку $f_{5(3)}$, затем снова путем половинного деления выбирается значение z_{04} и так до тех пор, пока $f_{5(i)}$ не станет меньше $\delta=0{,}0001$.

Аналогично можно определить z_0 на промежуточном шпангоуте, координаты которого определяются по системе (III.63). Если расчет выполняется на быстродействующей ЭВМ, то такая схема расчета вполне приемлема, но на малой ЭВМ для определения z_0 промежуточного шпангоута потребуется много времени. В этом случае можно с небольшой потерей точности, вполне допустимой при

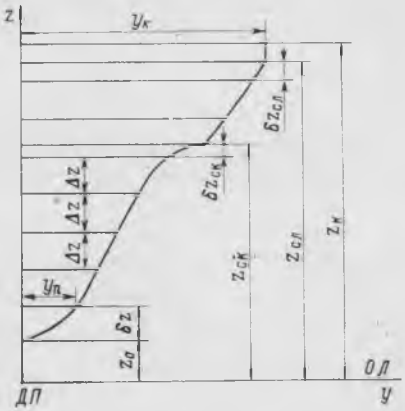

Рис. 72. Координаты на шпангоуте, расположенном выше основной плоскости.

$$\Delta z_i=|z_{0i+1}-z_{0i}|<\overline{\Delta z},$$

найти z_0 из условия, что на данном участке шпангоут можно заменить прямой линией. Тогда z_0 определяется по формуле

$$z_0=\frac{z_iy_{i+1}-z_{i+1}y_i}{y_{i+1}-y_i}. \qquad \text{(III.72)}$$

После определения z_0 путем сравнения с величиной $k\Delta z$, где $k=0, 1, 2, \ldots$, вычисляется δz (рис. 72):

$$\delta z=k\,\Delta z-z_0,$$

где k — выбирается из условий $y_{k-1}<0$ и $y_k>0$. Заодно определяется та аппликата z_n, с которой начинается расчет площади по методу трапеций. Добавка к площади данного шпангоута определяется по формуле

$$\Delta\omega_k=2\,\frac{y_n\,\delta z}{2}=y_n\,\delta z. \qquad \text{(III.73)}$$

Случай 2. Если шпангоут имеет подпалубный слом, то необходимо определить $z_{\text{сл}}$. Аналогично выполняется расчет

добавки к площади, если на шпангоуте имеется острая скула. Тогда нужно знать $z_{ск}$. Расчет добавки выполняется по формуле

$$\Delta\omega_k = \delta z_c \frac{y_k + y_c}{2}, \qquad \text{(III.74)}$$

где y_c — ордината либо слома, либо скулы.

В связи с тем что число расчетных шпангоутов не так уже велико, значения z_0, $z_{ск}$, $y_{ск}$, $z_{сл}$, $y_{сл}$ могут быть вычислены заранее и заданы в виде массивов.

Случай 3. Для шпангоута тоннельной формы (рис. 73) добавку $\Delta\omega_k$ определить сложнее. Необходимо знать значения z_0, z_{min}, $\delta_0 z$ и δz. Тогда добавка вычисляется по формуле

$$\Delta\omega_k \cong \delta_0 z \frac{y_n}{2} + y_n \delta z, \qquad \text{(III.75)}$$

где y_n определяется при z_n.

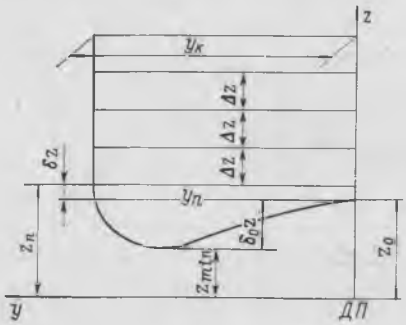

Рис. 73. Координаты на шпангоуте тоннельной кормы.

Следует заметить, что получить на ЭВМ ординату y_{min} можно только при $z_{min} + \Delta z_{min}$, где Δz_{min} может быть сделано сколь угодно малым, в то время как при z_{min} ЭВМ выдаст «нет памяти» или «нет шпангоута». Проще всего снять необходимые данные с чертежа при первом проверочном расчете.

Если обводы судна имеют одновременно скуловую линию, линию слома, а кроме того, настолько сложны, что расчет нижней части ведется по одному массиву коэффициентов, а верхней части — по другому, то в систему программ следует ввести стандартную подпрограмму анализа для выбора соответствующих данному участку поверхности расчетных формул и массивов.

Анализ ведется по аппликате z. Для того чтобы определить, к какому участку относится искомая точка, ее аппликата z сравнивается последовательно с z_{min}, z_0, z_n, $z_{ск}$, $z_{сл}$, z палубы. Для обычного шпангоута сравнение начинается с z_0. При этом Δz известно и постоянно для данного теоретического чертежа. Определяется разность

$$z_0 - j\,\Delta z,$$

где j — номера ватерлиний, начиная с $j = 1$. Как только эта разность становится отрицательной, определяется $\delta z = |z_0 - j\,\Delta z|$ и заодно $z_n = j\,\Delta z$. Если необходимо, то эти значения запоминаются. Но можно сразу использовать δz для определения $\Delta\omega_k$ и запомнить последнее.

Для того чтобы получить величину площади каждого шпангоута и каждой ватерлинии, соответствующие значения статистических моментов и моментов инерции, необходимо при вычислении очередной ординаты y_{ij} поверхности записывать в памяти ЭВМ ряд интегральных сумм.

1. Для вычисления площади шпангоута ω_{ji} эту ординату необходимо прибавлять к сумме

$$\sigma_{j-1,\,i}=\sum_{k=0}^{j-1} y_{ki}-\frac{y_{0i}}{2}, \qquad \text{(III.76)}$$

которая является промежуточной и используется затем для вычисления ω_{ji} по формуле

$$\omega_{ji}=2\,\Delta z\left(\sigma_{j-1,\,i}+\frac{y_{ji}}{2}\right); \qquad \text{(III.77)}$$

2. Чтобы в дальнейшем получить площади ватерлиний, ордината y_{ji} прибавляется к сумме, соответствующей данной ватерлинии:

$$P_j=\sum_{m=r}^{i-1} y_{jm}-\frac{y_{jr}}{2}+\frac{y_{ji}}{2}, \qquad \text{(III.78)}$$

где r — порядковый номер начального шпангоута участка;

3. Величина y_{ij} в соответствующей степени добавляется ко всем интегральным суммам статистических моментов относительно ДП, основной плоскости и миделевого шпангоута:

$$m_{xzji}=\frac{1}{2}\sum_{k=0}^{j-1} y_{ki}^2-\frac{y_{0i}^2}{4}+\frac{y_{ji}^2}{2}; \qquad \text{(III.79)}$$

$$m_{xyji}=\sum_{s=0}^{j-1} s y_{ki}+\frac{j y_{ji}}{2}; \qquad \text{(III.80)}$$

$$m_{yj}=\sum_{k=r}^{i-1} k y_{jk}-\frac{r y_{jr}}{2}+\frac{i y_{ji}}{2}; \qquad \text{(III.81)}$$

4. для определения моментов инерции площади ватерлиний ордината y_{ij} в соответствующей степени добавляется ко всем интегральным суммам:

$$h_{xj}=\sum_{k=r}^{i-1} y_{jk}^3-\frac{y_{jr}^3}{2}+\frac{y_{ji}^3}{2}; \qquad \text{(III.82)}$$

$$h_{yj}=\sum_{k=r}^{i-1} k^2 y_{jk}-\frac{r^2 y_{jr}}{2}+\frac{i^2 y_{ji}}{2}. \qquad \text{(III.83)}$$

Пусть на l-м участке (рис. 74) корпуса выполнены расчеты всех ординат и всех интегральных сумм для j ватерлиний и q

шпангоутов. Тогда для определения объема l-го участка поверхности по j-ю ватерлинию достаточно составить исправленную сумму всех ω_{ji} (III.77) для шпангоутов участка по формуле

$$\Omega_{jq}=\sum_{i=r}^{r+q}\omega_{ji}-\frac{\omega_{jr}+\omega_{j,\,r+q}}{2}. \qquad \text{(III.84)}$$

Тогда искомый объем равен

$$V_l=\Delta L\Omega_{jq}. \qquad \text{(III.85)}$$

Для того чтобы избежать загромождения памяти ЭВМ, целесообразно в процессе расчета сразу выводить на печать данные для масштаба Бонжана одновременно с ординатами y_{ji}, а в памяти сохранять суммы ординат по шпангоутам для каждой ватерлинии. При этом можно формировать сразу исправленные

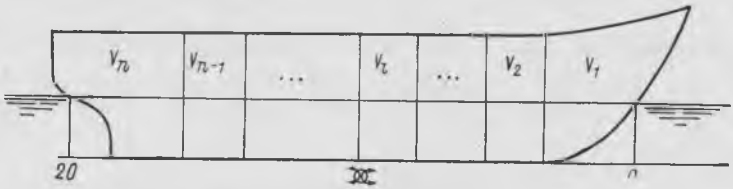

Рис. 74. Деление корпуса на расчетные участки.

суммы путем введения условных переходов по крайним номерам участка: если $i\neq r$ и $i\neq q$, то $\sigma=\sigma+y_{ji}$, в противном случае $\sigma=\sigma+\frac{y_{ji}}{2}$.

Площадь ватерлинии определяется

$$S_j=2\,\Delta L P_j. \qquad \text{(III.86)}$$

Для определения абсциссы центра величины x_c этого же участка следует использовать полученные в процессе обсчета каждого шпангоута значения площади ω_{ij} для формирования статического момента площади шпангоута до действующей ватерлинии.

$$m_{yz}=\sum_{i=r}^{r+q}i\omega_{ji}-\frac{r\omega_{jr}+(r+q)\,\omega_{j,\,r+q}}{2}, \qquad \text{(III.87)}$$

где j — порядковый номер ватерлинии. Тогда статический момент определится по формуле

$$M_{yz}=(\Delta L)^2 m_{yz}.$$

Отсюда величина x_c для l-го участка равна

$$x_c=\frac{M_{yz}}{V_l}.$$

При расчете кривых плавучести значения x_c и V_l определяются для каждой ватерлинии. Для определения аппликаты центра величины l-го участка достаточно при расчете площадей ватерлиний вычислить статические моменты этих площадей с помощью исправленной суммы

$$m_{xy}=\sum_{k=1}^{j} kS_k-\frac{jS_j}{2}. \qquad \text{(III.88)}$$

Тогда статический момент объемного водоизмещения участка относительно основной плоскости равен

$$M_{xy}=(\Delta T)^2 m_{xy},$$

а аппликата центра величины для данного участка

$$z_c=\frac{M_{xy}}{V_l}.$$

Для определения метацентрических радиусов каждой ватерлинии с помощью интегральных сумм (III.82) и (III.83) нужно получить моменты инерции площади ватерлинии относительно ДП и плоскости мидель-шпангоута по формулам

$$I_{xj}=\frac{2}{3}\Delta L h_{xj}; \qquad \text{(III.89)}$$

$$I_{yj}=2(\Delta L)^3 h_{yj}. \qquad \text{(III.90)}$$

Метацентрические радиусы получаются после выполнения расчетов по всем участкам корпуса.

Водоизмещение для всего судна определяется по формуле

$$V=\sum_{l=1}^{n} V_l, \qquad \text{(III.91)}$$

где n — число участков разбиения.

Если расчет выполняется в процессе выбора формы обводов, то объемное водоизмещение определяется только до действующей ватерлинии. Одновременно определяются координаты центра величины по формулам

$$\left.\begin{aligned} x_c&=\frac{\sum_{l=1}^{n} x_{cl}V_l}{V};\\ z_c&=\frac{\sum_{l=1}^{n} z_{cl}V_l}{V}. \end{aligned}\right\} \qquad \text{(III.92)}$$

Если объемное водоизмещение и положение центра величины отвечают требованиям, то сразу могут быть получены все кривые плавучести и начальной остойчивости.

Расчеты кривых плавучести можно выполнять и по практическим шпангоутам. Это повышает точность расчета, но никак

не изменяет программ, а главное, не требует дополнительных объемов памяти ЭВМ, так как все интегральные суммы составляются сразу в процессе счета. Число интегральных сумм не зависит от числа шпангоутов, а определяется количеством расчетных ватерлиний.

Площади ватерлиний вычисляют по формуле

$$S_j = \sum_{l=1}^{n} S_{jl}, \tag{III.93}$$

а положение центра тяжести площади ватерлинии

$$x_{fj} = \frac{\sum_{l=1}^{n} x_{fjl} S_{jl}}{S_j}. \tag{III.94}$$

Метацентрические радиусы вычисляют по известным формулам

$$r_j = \frac{I_{xj}}{V_j}; \quad R_j = \frac{I_{fj}}{V_j}, \tag{III.95}$$

где

$$I_{xj} = \sum_{l=1}^{n} I_{xjl}; \quad I_{fj} = \sum_{l=1}^{n} I_{yjl} - x_{fj}^2 S_j.$$

§ 13

Особенности расчета остойчивости судов с РО на ЭВМ

Использование ЭВМ существенно изменяет подход к оценке остойчивости и расчету пантокарен. Если при ручном счете пантокарены рассчитывают при постоянном дифференте и при достаточно приближенной оценке водоизмещения, то при использовании ЭВМ появляется возможность рассчитывать пантокарены для разных углов дифферента и даже учитывать изменение дифферента в процессе поперечных наклонений. Выполненный Халлом учет изменения дифферента на больших углах крена показал, что погрешность в определении плеч статической остойчивости увеличивается с возрастанием дифферента так значительно, что этим уже нельзя пренебрегать [80].

Для расчета пантокарен судов с развертывающейся обшивкой, у которых большая часть поверхности описана аналитически, количество чебышевских шпангоутов всегда можно выбрать таким образом, чтобы они попали на участки корпуса, заданные уравнениями. При этом может быть принята любая схема для определения плеч статической остойчивости. Можно принять схему Крылова—Дарньи, можно схему Матросова. В любом случае расчет сведется к определению точек пересечения судовой по-

верхности с плоскостью действующей ватерлинии при крене θ и дифференте ψ, заданной в виде

$$z = z_{\text{ѡ}} + (x - x_f)\operatorname{tg}\psi + y\operatorname{tg}\theta. \qquad \text{(III.96)}$$

Если производить расчет при фиксированных значениях осадки судна, тогда для каждого наклонения по значениям ординат правого и левого борта $y_{\theta п}$ и $y_{\theta л}$ на всех чебышевских шпангоутах нужно находить объем подводной части, статические моменты этого объема относительно координатных осей и момент инерции площади действующей ватерлинии.

Плечо статической остойчивости формы определяется по формуле

$$l = y_c \cos\theta + (z_c - z_{c0})\sin\theta, \qquad \text{(III.97)}$$

где

$$y_c = \int_0^\theta r_\theta \cos\theta\, d\theta; \quad z_c = z_{c0} + \int_0^\theta r_\theta \sin\theta\, d\theta.$$

Метацентрический радиус r_θ является функцией угла крена и определяется по формуле

$$r_\theta = \frac{I_{x\theta}}{V_\theta}, \qquad \text{(III.98)}$$

где $I_{x\theta}$ и V_θ — также являются функциями принятого угла θ.

Определение объема V_θ по правилу трапеций представляет собой громоздкую задачу, для которой требуются значительные затраты машинного времени. Целесообразнее выполнять не полный расчет объемного водоизмещения, а его изменение ΔV по формуле

$$\Delta V_\theta = \frac{1}{4}\Delta\theta \frac{L}{n} \sum_{(\text{инт})} \left[\sum (y_{\theta п}^2 - y_{\theta л}^2)\right] \qquad \text{(III.99)}$$

и затем находить его по формуле

$$V_\theta = V_0 + \Delta V_\theta. \qquad \text{(III.100)}$$

Координаты центра величины удобнее находить путем внесения поправок, чем выполнением полного расчета статических моментов подводного объема от основной плоскости до действующей ватерлинии при наличии крена и дифферента.

Для определения положения центра тяжести площади действующей ватерлинии требуется вычисление ее площади S_θ и статических моментов $M_{x\theta}$ и $M_{y\theta}$ по формулам

$$\left.\begin{aligned} S_\theta &= \frac{L}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_{\theta п} + y_{\theta л})_i; \\ M_{x\theta} &= \frac{L}{2n}\sum_{i=1}^{n}(y_{\theta п}^2 - y_{\theta л}^2)_i; \\ M_{y\theta} &= \frac{L}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i (y_{\theta п} - y_{\theta л})_i. \end{aligned}\right| \qquad \text{(III.101)}$$

Координаты центра тяжести площади действующей ватерлинии равны

$$\left.\begin{aligned} x_{f\theta} &= \frac{M_{y\theta}}{S_\theta}; \\ y_{f\theta} &= \frac{M_{x\theta}}{S_\theta}; \\ z_{f\theta} &= T_\theta + x_{f\theta} \operatorname{tg} \psi_0. \end{aligned}\right| \qquad \text{(III.102)}$$

В книге В. И. Брегмана [9] предлагается универсальный метод для расчетов различных диаграмм остойчивости на ЭВМ для случаев поврежденного и неповрежденного судна. Но в процессе расчета любых диаграмм (минимального момента, минимальной работы, диаграммы свободно плавающего тела) требуется определение ординат действующей ватерлинии для правого борта $y_{\theta п}$ и для левого борта $y_{\theta л}$. Определение этих ординат у судов с РО имеет свои особенности.

Для определения ординат в плоскости наклоненной ватерлинии $y_{\theta п}$ или $y_{\theta л}$ на чебышевском шпангоуте нужно найти аппликату точки пересечения наклонной плоскости действующей ватерлинии (III.96) с поверхностью корпуса. При этом уравнение плоскости удобно представить в виде

$$y_{i+1} = y_{f\theta_i} + \frac{z - z_{f\theta_i} - (x - x_{f\theta_i}) \operatorname{tg} \psi_{0_i}}{\operatorname{tg} \theta_{i+1}} \qquad \text{(III.103)}$$

для правого борта и

$$y_{i+1} = -y_{f\theta_i} - \frac{z - z_{f\theta_i} - (x - x_{f\theta_i}) \operatorname{tg} \psi_{\theta_i}}{\operatorname{tg} \theta_{i+1}} \qquad \text{(III.104)}$$

для левого борта, где y_{i+1} — ордината плоскости при $n+1$ наклонении.

Определение ординат поверхности корпуса $y_л$ и $y_п$ выполняется методом «невязок», а приближения находятся путем половинного деления. Допустим, что нужно вычислить $y_{\theta л}$. Для этого достаточно найти такое значение z, при котором y_{i+1} наклонной плоскости и $y_л$ поверхности корпуса равны между собой. Расчет выполняется в следующем порядке: 1) задается первое приближение z_1 и по формуле (III.104) определяется соответствующая ордината y_1 плоскости действующей ватерлинии на данном чебышевском шпангоуте $x_ч$;

2) путем сравнения аппликаты z_1 с аппликатой нижней точки, скулы, слома и палубы расчетного чебышевского шпангоута по стандартной подпрограмме анализа участка определяются подпрограмма и массив, по которым нужно производить расчет ординат, и определяется $y_{л1}$;

3) вычисляется разность $(y_1 - y_{л1})$;

4) по знаку разности $(y_1 - y_{л1})$ выбирается следующее приближение z_2 по формуле $z_2 = z_1 + \Delta z$; если разность отрицательна, то Δz тоже отрицательно, и наоборот; при определении $y_п$ шаг Δz берется с противоположным знаком;

5) модуль разности $|y_1 - y_{л1}|$ сравнивается с $\delta = 10^{-4}$.

Процесс продолжается до тех пор, пока $|y_j - y_{лj}|$ не станет меньше или равен δ.

После определения $y_л$ для левого борта аналогично определяется $y_п$ для правого борта, затем рассчитываются $y_{\theta л}$ и $y_{\theta п}$ по формулам

$$\left.\begin{aligned} y_{\theta л} &= \frac{y_л + y_{f\theta}}{\cos\theta}; \\ y_{\theta п} &= \frac{y_п - y_{f\theta}}{\cos\theta} \end{aligned}\right| \qquad \text{(III.105)}$$

и определяются их суммы, разности, разности квадратов, разности кубов, необходимые для расчетов метацентрических радиусов и координат центра величины.

Для судов с РО можно существенно сократить время расчета плеч статической остойчивости, если совместить опорные шпангоуты, по которым задаются массивы коэффициентов, с чебышевскими. В этом случае ординаты определяются непосредственно по уравнению шпангоута (III.28), а не по системе (III.63).

ГЛАВА IV

РАСЧЕТ СОСТАВЛЯЮЩИХ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ВЫБОР ОБВОДОВ СУДОВ С РО НА ЭВМ

§ 14

Расчет волнового сопротивления судов с развертывающейся обшивкой

Впервые зависимость между уравнением поверхности корпуса судна и волновым сопротивлением получена Мичеллем [90] в 1898 г. в виде интеграла

$$R = \frac{4\rho g^4}{\pi v^2} \int_1^\infty (I^2 + J^2) \frac{\lambda^2\, d\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}}, \qquad \text{(IV.1)}$$

где R — волновое сопротивление;

$$I=\int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\partial f(x, z)}{\partial x} e^{-\frac{gz}{v^2}\lambda^2} \cos\frac{gx}{v^2}\lambda\, dx\, dz;$$

$$J=\int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\partial f(x, z)}{\partial x} e^{-\frac{gz}{v^2}\lambda^2} \sin\frac{gx}{v^2}\lambda\, dx\, dz;$$

$f(x, z)$ — уравнение судовой поверхности.

Этот интеграл получен при ряде допущений. Жидкость предполагается идеальной, судно тонким, осадка бесконечной, а движение потенциальным.

Интеграл Мичелля начали использовать для изучения волнового сопротивления с 1923 г. Хавелок [82] и Вейнблюм [90, 98]. Существенные преобразования интеграла Мичелля выполнены Г. Е. Павленко [44, 46].

Интеграл Мичелля в форме Г. Е. Павленко имеет вид

$$R=\frac{4\rho g^4}{\pi v^6}\int_1^\infty [G^2+H^2]\frac{\lambda^4\, d\lambda}{\sqrt{\lambda^2-1}}, \qquad \text{(IV.2)}$$

где

$$G=\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\int_0^T f(x, z)\, e^{-pz}\sin kx\, dz\, dx,$$

$$H=\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\int_0^T f(x, z)\, e^{-pz}\cos kx\, dz\, dx;$$

$$p=\frac{g}{v^2}\lambda^2; \qquad k=\frac{g}{v^2}\lambda.$$

Принципиальное отличие этого интеграла от интеграла Мичелля в том, что интегрирование выполняется только в пределах диаметральной плоскости судна, а это дает возможность избавиться от внутренних несобственных интегралов. Кроме того, подынтегральная функция содержит уравнение поверхности корпуса $y=f(x, z)$ в явном виде, а не под знаком производной.

Следующая задача, которая стояла перед исследователями, заключалась в том, чтобы исключить допущение о тонком судне и каким-нибудь способом учесть влияние ширины. Большая работа проделана в этом направлении Н. Е. Кочиным [33], М. В. Келдышем, Л. И. Седовым [28]. В настоящее время большой вклад в дело изучения волнового сопротивления внесли А. А. Костюков [31, 32], А. М. Басин [4], Я. И. Войткунский [12, 13], В. Г. Сизов [56], М. Д. Хаскинд [67], Л. Н. Сретенский [58] и др.

Следующий важный шаг сделан в направлении учета вязкости жидкости. Этому вопросу посвящены работы Л. Н. Сретенского [59], Л. В. Черкасова [68], А. К. Никитина [39], И. П. Оборотова [43], Т. Инуи [84], А. Накаяма [91], С. Виглея [100] и др.

Все эти исследования показали, что допущения Мичелля приводят к расхождению с действительными значениями волнового сопротивления, но тем не менее интеграл Мичелля верно отражает качественную картину волнообразования. Это позволяет использовать его для выбора формы судна наименьшего сопротивления, а также для выполнения расчетов волнового сопротивления разных судов для сравнения.

Еще до появления электронно-вычислительной техники выполнялись расчеты волнового сопротивления для различных простых форм обводов К. И. Антимоновым [2], И. Г. Хановичем [62, 63, 66] и др. С появлением ЭВМ значительные усилия затрачиваются на то, чтобы на первых стадиях проектирования обводов до проведения испытаний в опытовом бассейне оценить сопротивление судна. Основной трудностью при этом является отсутствие математической модели судна. Если обводы заданы таблицей ординат, то вычисление внутренних интегралов при расчете волнового сопротивления вызывает большие трудности. Тем не менее эта задача решена Ю. Д. Пикиным и Ю. С. Тимошиным [48], Аструпом, Эмерсоном [73].

Если обводы заданы аналитически, то задача определения волнового сопротивления на ЭВМ существенно упрощается. Для обводов с РО расчет волнового сопротивления и исследование влияния формы на его величину выполняются с помощью интеграла Мичелля в форме Г. Е. Павленко. Вид уравнений, с помощью которых описывается поверхность подводной части корпуса судна с РО, оказался очень удобным для расчета, так как удалось взять внутренние интегралы G и H.

Расчет волнового сопротивления судов с РО выполняется следующим образом. При заданном значении скорости для ряда значений λ вычисляется значение подынтегральной функции интеграла

$$\int_1^\infty [G^2+H^2]\frac{\lambda^4\,d\lambda}{\sqrt{\lambda^2-1}}. \qquad \text{(IV.3)}$$

В связи с тем что с ростом λ значения подынтегральной функции очень быстро убывают, можно взять шаг по λ очень малым. Интеграл (IV.3) вычисляют путем суммирования, т. е. вычисляют его интегральную сумму.

Для расчета сопротивления подводная часть судна с РО записывается в виде трех уравнений. Два уравнения составляются для оконечностей, а одно — для цилиндрической вставки. Следует сразу заметить, что при таком задании на стыках оконечностей с цилиндрической вставкой появляется разрыв 1-го рода.

Такой разрыв допускает интегрирование, а величина погрешности в определении сопротивления от наличия разрыва значительно меньше погрешности всего расчета сопротивления по интегралу Мичелля.

Для аналитического задания оконечностей используют выражение (III.43)

$$y=\frac{D_1z^3+D_2z^2+D_3z+D_4xz+D_5x^2z+D_6xz^2+D_7x^2+D_8x+D_9}{(D_{10}+D_{11}z)^2}.$$

Для аналитического задания цилиндрической вставки, вернее, миделевого шпангоута следует использовать уравнение в явном виде, а не в виде трансформированной верзиеры. Практически для аппроксимации только подводной части миделевого шпангоута можно использовать уравнение в виде

$$y=a_0+a_1z+a_2z^2+a_3z^3+a_4z^4.$$

При такой аппроксимации интегралы, определяющие функции G и H, берутся достаточно просто. Подынтегральная функция $f(\lambda)$ подсчитывается на ЭВМ для большого количества значений λ с любой степенью точности за то время, которое необходимо для выдачи на печать.

Пусть уравнение поверхности записано в виде

$$y=\begin{cases} f_1(x,\ z) & \text{при } x_2\leqslant x\leqslant x_1; \\ f_2(z) & \text{при } x_3<x<x_2; \\ f_3(x,\ z) & \text{при } x_4\leqslant x\leqslant x_3, \end{cases}$$

где $f_1(x,\ z)$ — уравнение носовой оконечности; $f_2(z)$ — уравнение цилиндрической вставки; $f_3(x,\ z)$ — уравнение кормовой оконечности.

Тогда функции G и H представляются в виде сумм

$$\left.\begin{aligned} G&=G_{\text{н}}+G_{\text{ц. в}}+G_{\text{к}}; \\ H&=H_{\text{н}}+H_{\text{ц. в}}+H_{\text{к}}. \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.4)}$$

Учитывая, что при расчете волнового сопротивления интегрирование выполняется по области, ограниченной диаметральным батоксом, ось OZ обычно направляют вниз, а начало координат в этом случае находится на ГВЛ. Тогда функции G и H записываются в виде

$$\left.\begin{aligned} G&=\int\limits_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\int\limits_{0}^{T(x)} f(x,\ z)\,e^{-pz}\sin kx\,dz\,dx, \\ H&=\int\limits_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\int\limits_{0}^{T(x)} f(x,\ z)\,e^{-pz}\cos kx\,dz\,dx, \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.5)}$$

где верхний предел интегрирования по z является функцией от x, так как диаметральный батокс не везде совпадает с основной линией.

Для вычисления внутреннего интеграла в выражениях (IV.5) уравнение поверхности судна записывается в виде

$$f(x, z)=\frac{A_0z^3+A_1z^2+A_2z+A_3}{(D_{10}+D_{11}z)^2},$$

где

$$A_0=D_1; \quad A_1=D_2+D_6x; \quad A_2=D_3+D_4x+D_5x^2;$$
$$A_3=D_9+D_8x+D_7x^2.$$

Для упрощения расчета вместо переменного предела $T(x)$ берется предел T_i, где индекс i зависит от участка интегрирования. Тогда внутренний интеграл можно записать в виде

$$\int_0^{T_i}\frac{A_0z^3+A_1z^2+A_2z+A_3}{(D_{10}+D_{11}z)^2}e^{-pz}\,dz=B_1F_1+B_2F_2+B_3F_3+B_4F_4, \quad \text{(IV.6)}$$

где

$$\left.\begin{aligned}
&B_1=\frac{A_0}{D_{11}^2}; \quad B_2=\frac{A_1}{D_{11}^2}-\frac{3A_0D_{10}}{D_{11}^3};\\
&B_3=\frac{A_2}{D_{11}^2}-\frac{2A_1D_{10}}{D_{11}^3}+\frac{3A_0D_{10}^2}{D_{11}^4};\\
&B_4=\frac{A_3}{D_{11}}-\frac{A_2D_{10}}{D_{11}^2}+\frac{A_1D_{10}^2}{D_{11}^3}-\frac{A_0D_{10}^3}{D_{11}^4}.
\end{aligned}\right\} \quad \text{(IV.7)}$$

а функции F_1, F_2, F_3, F_4:

$$\left.\begin{aligned}
&F_1=\frac{1}{p}\left[1+p\frac{D_{10}}{D_{11}}-e^{-pT_i}\left(1+p\frac{D_{10}+D_{11}T_i}{D_{11}}\right)\right];\\
&F_2=\frac{1-e^{-pT_i}}{p};\\
&F_3=e^{\frac{D_{10}}{D_{11}}p}\left[Ei\left(-\frac{D_{10}+D_{11}T_i}{D_{11}}p\right)-Ei\left(-\frac{D_{10}}{D_{11}}p\right)\right];\\
&F_4=\frac{1}{D_{10}}-\frac{e^{-pT_i}}{D_{10}+D_{11}T_i}-\frac{p}{D_{11}}F_3.
\end{aligned}\right\} \quad \text{(IV.8)}$$

Пусть $x_н$ — абсцисса носового шпангоута, а $x_к$ — абсцисса кормового шпангоута интегрируемого участка. Тогда на отрезке $[x_к, x_н]$ после подстановки A_0, A_1, A_2, A_3 и группировки

в многочлены по степеням x функции $G_{кн}$ и $H_{кн}$ вычисляются с помощью интегралов

$$\left.\begin{aligned} G_{кн} &= \int_{x_к}^{x_н} (L_1 + L_2 x + L_3 x^2) \sin kx\, dx; \\ H_{кн} &= \int_{x_к}^{x_н} (L_1 + L_2 x + L_3 x^2) \cos kx\, dx, \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.9)}$$

где

$$\left.\begin{aligned} L_1 &= \frac{D_1}{D_{11}^2} F_1 + \left(\frac{D_2}{D_{11}^2} - \frac{3D_{10}D_1}{D_{11}^3}\right) F_2 + \\ &+ \left(\frac{D_3}{D_{11}^2} - \frac{2D_{10}D_2}{D_{11}^3} + \frac{3D_{10}^2 D_1}{D_{11}^4}\right) F_3 + \\ &+ \left(\frac{D_9}{D_{11}} - \frac{D_{10}D_3}{D_{11}^2} + \frac{D_2 D_{10}^2}{D_{11}^3} - \frac{D_1 D_{10}^3}{D_{11}^4}\right) F_4; \\ L_2 &= \frac{D_6}{D_{11}^2} F_2 + \left(\frac{D_4}{D_{11}^2} - \frac{2D_6 D_{10}}{D_{11}^3}\right) F_3 + \\ &+ \left(\frac{D_8}{D_{11}} - \frac{D_4 D_{10}}{D_{11}^2} + \frac{D_6 D_{10}^2}{D_{11}^3}\right) F_4; \\ L_3 &= \frac{D_5}{D_{11}^2} F_3 + \left(\frac{D_7}{D_{11}} - \frac{D_5 D_{10}}{D_{11}^2}\right) F_4. \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.10)}$$

После выполнения интегрирования функции $G_{кн}$ и $H_{кн}$ принимаются для расчета в виде

$$\left.\begin{aligned} G_{кн} &= L_1 S_1 + L_2 S_2 + L_3 S_3; \\ H_{кн} &= L_1 Q_1 + L_2 Q_2 + L_3 Q_3, \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.11)}$$

где

$$S_1 = \frac{\cos kx_к - \cos kx_н}{k};$$

$$S_2 = \frac{\sin kx_н - \sin kx_к}{k^2} - \frac{x_н \cos kx_н - x_к \cos kx_к}{k};$$

$$S_3 = \frac{2(x_н \sin kx_н - x_к \sin kx_к)}{k^2} - \left(\frac{x_н^2}{k} - \frac{2}{k^3}\right) \cos kx_н + \\ + \left(\frac{x_к^2}{k} - \frac{2}{k^3}\right) \cos kx_к;$$

$$Q_1 = \frac{\sin kx_н - \sin kx_к}{k};$$

$$Q_2 = \frac{\cos kx_н - \cos kx_к}{k^2} + \frac{x_н \sin kx_н - x_к \sin kx_к}{k};$$

$$Q_3 = \frac{2(x_н \cos kx_н - x_к \cos kx_к)}{k^2} + \left(\frac{x_н^2}{k} - \frac{2}{k^3}\right)\sin kx_н - \left(\frac{x_к^2}{k} - \frac{2}{k^3}\right)\sin kx_к.$$

При вычислении значений F_3 и F_4 на ЭВМ приходится вычислять интегральные показательные функции $Ei^*(x)$ и $Ei(-x)$. Несмотря на то что в справочной литературе * приводятся точные и асимптотические ряды для их вычисления, для получения непрерывных зависимостей потребовалось специальное исследование, чтобы найти значения аргумента x, при которых переход от одного ряда к другому не вызывает разрыва показательной функции. В результате исследования получены расчетные формулы для определения интегральных показательных функций.

Для отрицательных значений аргумента x

$$Ei(-x) = \begin{cases} C + \ln|x| + \sum\limits_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{x^n}{nn!}, & \text{если } |x| \leqslant 5; \\ -\frac{e^{-x}}{x}\Big\{0{,}999\,996\,5 - 0{,}998\,971\,0\frac{1}{x} + \\ \quad + 1{,}948\,764\,6\frac{1}{x^2} - 4{,}948\,209\,2\frac{1}{x^3} + \\ \quad + 11{,}785\,079\,2\frac{1}{x^4} - 20{,}452\,384\,0\frac{1}{x^5} + \\ + 21{,}149\,146\,9\frac{1}{x^6} - 9{,}524\,041\,0\frac{1}{x^7}\Big\}, & \text{если } |x| > 5, \end{cases}$$

где $C = 0{,}577\,215\,664\,902$.

Для положительных значений аргумента x

$$Ei^*(x) = \begin{cases} C + \ln x + \sum\limits_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{nn!}, & \text{если } x \leqslant 9; \\ \frac{e^x}{x}\left(1 + \sum\limits_{n=1}^{E(x)-1} \frac{n!}{x^n}\right), & \text{если } x > 9, \end{cases}$$

где $E(x)$ — целая часть x.

---

* См. Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш. Специальные функции. М., Наука, 1977; И. С. Градштейн и И. М. Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Физматгиз. 1963.

При интегрировании в пределах судовой поверхности разные знаки аргументов интегральной показательной функции при вычислении разности

$$Ei\left(-\frac{D_{10}+D_{11}Ti}{D_{11}}p\right)-Ei\left(-\frac{D_{10}}{D_{11}}p\right)$$

не могут получиться, так как поверхность не содержит особых точек. При определении пределов интегрирования T_i следует учитывать, что ниже диаметрального батокса могут оказаться особые точки продолжения развертывающейся поверхности, из которой образуются обводы.

Для цилиндрической вставки интегралы имеют более простой вид.

Пусть уравнение миделевого шпангоута имеет вид

$$y=a_0+a_1z+a_2z^2+a_3z^3+a_4z^4. \qquad \text{(IV.12)}$$

Тогда интегралы по переменной z равны

$$\int_0^T f(z)\,e^{-pz}\,dz=a_0K_0+a_1K_1+a_2K_2+a_3K_3+a_4K_4, \qquad \text{(IV.13)}$$

где

$$K_0=\frac{1}{p}\left(1-e^{-pT}\right);$$

$$K_1=\frac{1}{p^2}\left[1-e^{-pT}(pT+1)\right];$$

$$K_2=\frac{2}{p^3}-e^{-pT}\left(\frac{T^2}{p}+\frac{2T}{p^2}+\frac{2}{p^3}\right);$$

$$K_3=\frac{3}{p}K_2-\frac{T^3}{p}e^{-pT};$$

$$K_4=\frac{4}{p}K_3-\frac{T^4}{p}e^{-pT}.$$

Если судно не имеет дифферента, то на цилиндрической вставке осадка постоянна. После выполнения интегрирования по длине на цилиндрической вставке функции $G_{\text{ц. в}}$ и $H_{\text{ц. в}}$ для расчета принимаются в виде

$$G_{\text{ц. в}}=K\left(\frac{\sin kx_{\text{н}}}{k}-\frac{\sin kx_{\text{к}}}{k}\right); \qquad \text{(IV.14)}$$

$$H_{\text{ц. в}}=K\left(\frac{\cos kx_{\text{к}}}{k}-\frac{\cos kx_{\text{н}}}{k}\right),$$

где $K=a_0K_0+a_1K_1+a_2K_2+a_3K_3+a_4K_4$.

Для судна в целом $G(\lambda)$ и $H(\lambda)$ получаются в виде суммы

$$G(\lambda)=\sum_{j=1}^{n} G_j(\lambda); \quad H(\lambda)=\sum_{j=1}^{n} H_j(\lambda),$$

где j — номера участков, на которые разбивается судно по длине.

Обычно расчет выполняется при задании поверхности в относительных координатах. Тогда интеграл Мичелля в форме Г. Е. Павленко для расчета принимается в виде

$$R=\frac{4\rho g^4}{\pi v^6}\left(\frac{B}{2}\right)^2\left(\frac{L}{2}\right)^2\int_1^{\infty}[G^2(\lambda)+H^2(\lambda)]\frac{\lambda^4 d\lambda}{\sqrt{\lambda^2-1}}. \qquad \text{(IV.15)}$$

По этим расчетным формулам на ЭВМ «Раздан-2» выполнялись расчеты волнового сопротивления для судов с РО, модели которых одновременно испытывались в опытовом бассейне.

Первый расчет был выполнен для судна типа «Севан» (рис. 52, *б*). Это судно не совсем удовлетворяет условиям Мичелля, так как имеет удлинение $\frac{L}{B}=6{,}2$, а не 10.

Носовая оконечность разделена на два участка. Один участок от $x_к=0{,}8$ до $x_н=1$ с осадкой T_1. Второй участок от $x_к=0{,}2$ до $x_н=0{,}8$ с осадкой T_2.

Корма разделена на три части: от $x_к=-0{,}6$ до $x_н=-0{,}4$ с T_3, от $x_к=-0{,}8$ до $x_н=-0{,}6$ с T_4, от $x_к=-1{,}0$ до $x_н=-0{,}8$ с T_5.

Уравнение цилиндрической вставки задано в виде (IV.12). Она тянется от $x_к=-0{,}4$ до $x_н=0{,}2$.

Расчетные значения переменной интегрирования были взяты с шагом $\Delta\lambda=0{,}2$ от 1,2 до 20. Расчетные значения скорости брались с шагом 0,5 от 4,5 м/с до 9 м/с. На печать выдавалось для каждого значения скорости по сто значений функции

$$f(\lambda)=[G^2(\lambda)+H^2(\lambda)]\frac{\lambda^4}{\sqrt{\lambda^2-1}} \qquad \text{(IV.16)}$$

в зависимости от λ. Поведение функции $f(\lambda)$ показано на рис. 75. Для определения величины волнового сопротивления использована формула

$$R=\frac{4\rho g^4}{\pi v^6}\left(\frac{L}{2}\right)^2\left(\frac{B}{2}\right)^2\Delta\lambda\sum_{\lambda=1,\,2}^{20} f(\lambda). \qquad \text{(IV.17)}$$

Полученная расчетная кривая показана на рис. 76. График волнового сопротивления носит волнообразный характер. Бугры соответствуют числам Fr = 0,225 и Fr = 0,31, что хорошо согласуется с экспериментом. Второй расчет выполнялся для быстроходного судна (см. рис. 57, *б*).

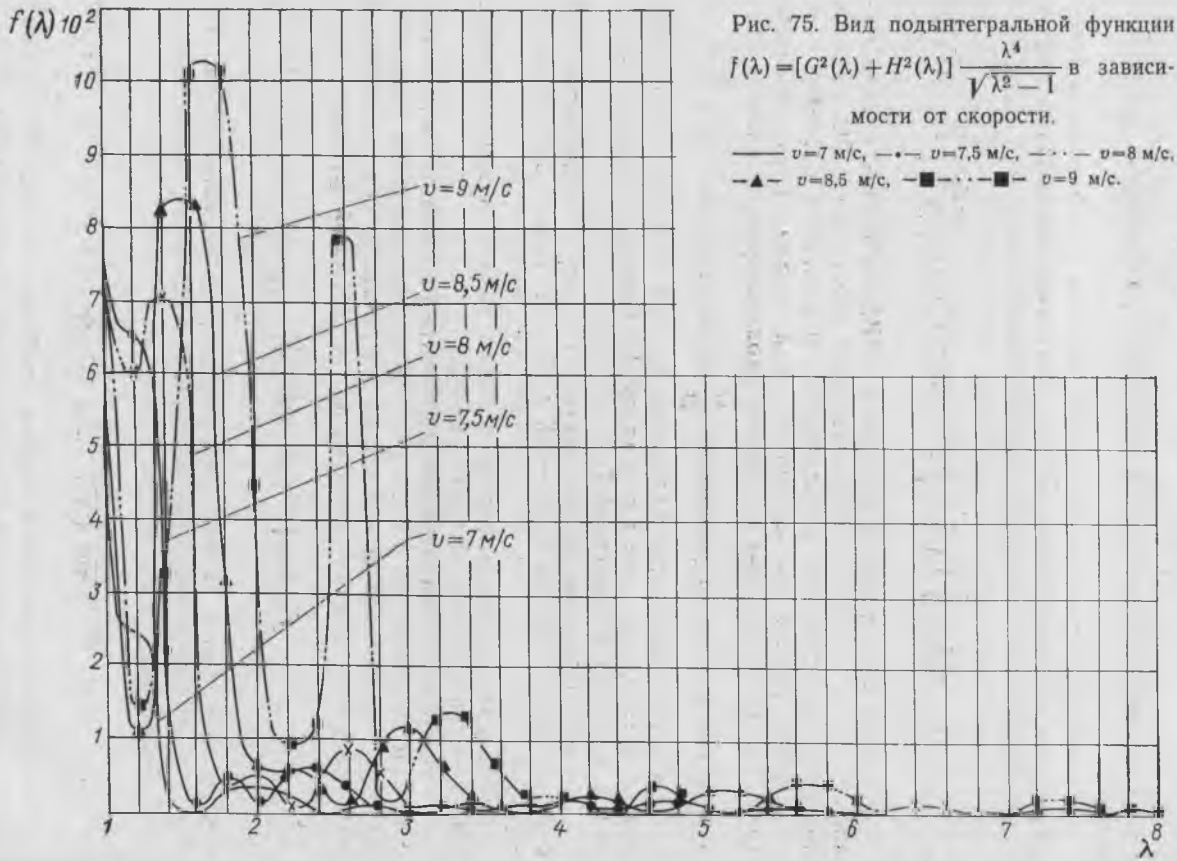

Рис. 75. Вид подынтегральной функции $f(\lambda)=[G^2(\lambda)+H^2(\lambda)]\frac{\lambda^4}{\sqrt{\lambda^2-1}}$ в зависимости от скорости.

—— v=7 м/с, —•— v=7,5 м/с, —··— v=8 м/с, —▲— v=8,5 м/с, —■—··—■— v=9 м/с.

По приведенной схеме можно выполнять расчеты для сравнения разных обводов. Путем вариации коэффициентов уравнения поверхности подводной части судна можно выделить варианты обводов с меньшим значением волнового сопротивления.

Для сокращения объема вычислений в дальнейших расчетах и исследованиях использована замена переменной интегрирова-

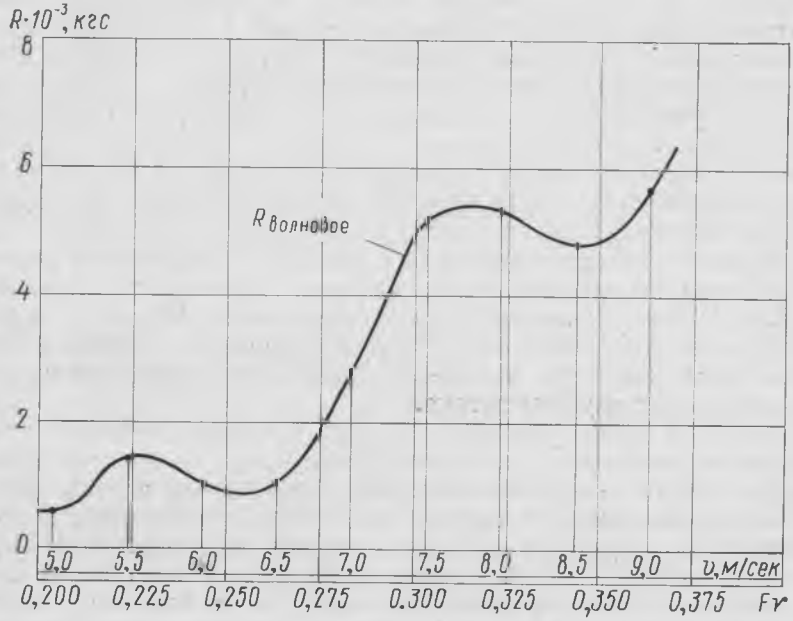

Рис. 76. Расчетная кривая волнового сопротивления.

ния $\lambda = \frac{1}{\cos\theta}$. Тогда интеграл для расчета волнового сопротивления имеет вид

$$R = \frac{4\rho g^4}{\pi v^6} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (G^2 + H^2) \frac{d\theta}{\cos^5\theta},$$

где G и H сохраняют прежний вид, а параметры p и k соответственно равны: $p = \frac{g}{v^2\cos^2\theta}$; $k = \frac{g}{v^2\cos\theta}$. При этом пределы интегрирования становятся конечными и устраняется разрыв подынтегральной функции.

§ 15

Зависимость волнового сопротивления от коэффициентов уравнения поверхности корпуса судов с РО

Для анализа влияния формы судовых обводов на величину волнового сопротивления используются различные методы. Самым естественным путем является решение изопериметрической вариационной задачи для волнового интеграла при постоянном водоизмещении и заданных главных размерениях L, B, T. При строгой постановке задачи необходимо составить волновой интеграл с учетом конечной ширины B, осадки T, а главное, необходим учет вязкости жидкости. В такой постановке задача пока не решена. Поэтому для выбора оптимальной формы носовой оконечности использован интеграл Мичелля в форме Г. Е. Павленко.

Впервые изопериметрическая задача для определения формы судна наименьшего сопротивления была решена Г. Е. Павленко [46], К. И. Антимоновым [2], Л. Н. Сретенским [58] и др., а для мелководья А. М. Басиным [4]. Эти решения относятся к случаю, когда жидкость считается идеальной, судно «тонким», а осадка равна глубине потока.

Задача о судне наименьшего сопротивления решалась с помощью вариационных методов только для упрощенных форм корпуса. Это объясняется тем, что только в том случае, когда уравнение поверхности корпуса не зависит от аппликаты z, изотермическая задача может быть доведена до конца. Аналитический вид обводов с РО оказался удобным для выполнения анализа влияния параметров формы корпуса на величину подынтегральной функции в выражении волнового сопротивления. Кроме того, обводы с РО, не будучи в общем случае упрощенными, могут быть использованы для изучения различных упрощенных форм, а также обычных обводов.

Исследования Г. Е. Павленко [44, 45, 46], Р. А. Гиллотона [77, 78], Г. Вейнблюма [98, 99] и др. показали, что несмотря на допущение о «тонкости» судна теория Мичелля и его интеграл могут быть использованы для анализа влияния формы корпуса конечной ширины на величину волнового сопротивления. В данном параграфе приведены результаты исследования зависимости волнового сопротивления судна от формы его носовой оконечности. Для решения этой задачи вначале была сделана попытка найти условный экстремум подынтегральной функции при постоянном водоизмещении с помощью метода Лагранжа. Однако такая попытка не привела к успеху, так как удалось найти только тривиальное решение. Минимум сопротивления оказался при $v = 0$. Следовательно, для решения поставленной задачи необходимо задавать больше начальных условий. В связи с этим

пришлось выполнить анализ практически независимых коэффициентов, входящих в уравнение поверхности корпуса. В результате этого анализа удалось наметить путь исследования.

Для анализа использован интеграл в виде

$$R=\frac{4\rho g^4}{\pi v^6}\int_0^{\frac{\pi}{2}}[G^2(\theta)+H^2(\theta)]\frac{d\theta}{\cos^5\theta}. \qquad \text{(IV.18)}$$

Функции $G(\theta)$ и $H(\theta)$ для участка корпуса, заключенного между шпангоутами $x_к$ и $x_н$, рассматриваются в виде (IV.11).

Функции L_1, L_2, L_3 (IV.10) зависят от скорости, осадки и коэффициентов D_i ($i=1, 2, \ldots, 11$) уравнения поверхности (III.43).

Для облегчения исследования выполнен переход к безразмерным координатам

$$\xi=\frac{x}{L/2}; \quad \eta=\frac{y}{B/2}; \quad \zeta=\frac{z}{T}. \qquad \text{(IV.19)}$$

Тогда p и k преобразуются следующим образом:

$$p=\frac{g}{v^2\cos^2\theta}=\frac{gL}{v^2\cos^2\theta}\frac{1}{L}=p_0\frac{1}{L}, \qquad \text{(IV.20)}$$

где

$$p_0=\frac{1}{\mathrm{Fr}^2\cos^2\theta}, \qquad \text{(IV.21)}$$

$$k=\frac{g}{v^2\cos\theta}=\frac{gL}{2v^2\cos\theta}\frac{1}{L/2}=k_0\frac{1}{L/2}, \qquad \text{(IV.22)}$$

где

$$k_0=\frac{1}{2\,\mathrm{Fr}^2\cos\theta}. \qquad \text{(IV.23)}$$

Аргументы kx записываются в этом случае через безразмерные величины: $kx_н=k_0\xi_н$; $kx_к=k_0\xi_к$.

Уравнение поверхности выражается через относительные координаты следующим образом:

$$\eta=\frac{D_1^0\zeta^3+D_2^0\zeta^2+D_3^0\zeta+D_4^0\xi\zeta+D_5^0\xi^2\zeta+D_6^0\xi\zeta^2+D_7^0\xi^2+D_8^0\xi+D_9^0}{(D_{10}^0+D_{11}^0\zeta)^2}. \qquad \text{(IV.24)}$$

При составлении уравнения поверхности в качестве опорных линий взяты ватерлинии на подводной части корпуса при значениях аппликат ζ_1 и ζ_2::

$$\eta_1=m_0+m_1\xi+m_2\xi^2 \quad \text{при } \zeta_1=t_1;$$
$$\eta_2=n_0+n_1\xi+n_2\xi^2 \quad \text{при } \zeta_2=t_2, \qquad \text{(IV.25)}$$

где $t_1=\frac{z_1}{T}$; $t_2=\frac{z_2}{T}$.

Параметры m_0, m_1, m_2, n_0, n_1, n_2, t_1, t_2 полностью определяют форму обводов, поэтому все коэффициенты D_i^0 являются функциями этих параметров и выражаются через них следующим образом:

$$
\left.
\begin{aligned}
D_1^0 &= \frac{1}{t_2-t_1}\left[4(m_2-n_2)^2(n_0-m_0)+(m_2-n_2)(m_1-n_1)^2\right];\\
D_2^0 &= \frac{4}{t_2-t_1}\left[(m_2-n_2)^2(t_2m_0-t_1n_0)-2(n_2t_2-t_1m_2)\times\right.\\
&\qquad \left.\times(m_2-n_2)(m_0-n_0)\right]+\frac{1}{t_2-t_1}\left[2(m_1-n_1)^2\times\right.\\
&\qquad \left.\times(n_2t_2-t_1m_2)+(m_1-n_1)^2(n_2t_1-m_2t_2)\right];\\
D_3^0 &= \frac{1}{t_2-t_1}\left\{4(n_2t_2-t_1m_2)^2(n_0-m_0)+8(n_2t_2-t_1m_2)\times\right.\\
&\qquad \times(m_2-n_2)(m_0t_2-n_0t_1)+\\
&\qquad \left.+(m_1-n_1)^2\left[m_2t_1^2-t_2^2n_2+2t_1t_2(m_2-n_2)\right]\right\};\\
D_4^0 &= 4\left[m_2n_2(m_1+n_1)(t_2+t_1)-2(m_1t_2n_2^2+n_1t_1m_2^2)\right];\\
D_5^0 &= 4m_2n_2(m_2-n_2)(t_2-t_1);\\
D_6^0 &= 4(m_2-n_2)(m_2n_1-m_1n_2);\\
D_7^0 &= 4m_2n_2(t_2-t_1)(t_2n_2-t_1m_2);\\
D_8^0 &= 4(n_2t_2-t_1m_2)(t_2m_1n_2-t_1n_1m_2);\\
D_9^0 &= \frac{1}{t_2-t_1}\left[4(n_2t_2-t_1m_2)^2(m_0t_2-n_0t_1)+\right.\\
&\qquad \left.+(n_2t_2-t_1m_2)(m_1-n_1)^2t_1t_2\right];\\
D_{10}^0 &= 2(n_2t_2-t_1m_2);\\
D_{11}^0 &= 2(m_2-n_2).
\end{aligned}
\right\}
\qquad \text{(IV.26)}
$$

В этом случае волновое сопротивление определяется по формуле

$$
R=\frac{4\rho g^4}{\pi v^6}\left(\frac{L}{2}\right)^2\left(\frac{B}{2}\right)^2T^2\int_0^{\frac{\pi}{2}}\left[G^2(\theta)+H^2(\theta)\right]\frac{d\theta}{\cos^5\theta}, \qquad \text{(IV.27)}
$$

в которой интеграл не зависит от главных размерений L, B, T, а является функцией числа Фруда, относительной осадки T/L и коэффициентов формы a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7.

Функции $G(\theta)$ и $H(\theta)$ для участка корпуса между шпангоутами $\xi_н$ и $\xi_к$ в этом случае записываются в виде (IV.11), но входящие в них S_1, S_2, S_3, Q_1, Q_2, Q_3 выражаются через безразмерные параметры и относительные координаты ξ, η, ζ:

$$\left.\begin{aligned}
S_1 &= \frac{\cos k_0\xi_к - \cos k_0\xi_н}{k_0};\\
S_2 &= \frac{\sin k_0\xi_н - \sin k_0\xi_к}{k_0^2} - \frac{\xi_н \cos k_0\xi_н - \xi_к \cos k_0\xi_к}{k_0};\\
S_3 &= \frac{2(\xi_н \sin k_0\xi_н - \xi_к \sin k_0\xi_к)}{k_0^2} -\\
&\quad -\left(\frac{\xi_н^2}{k_0} - \frac{2}{k_0^3}\right)\cos k_0\xi_н + \left(\frac{\xi_к^2}{k_0} - \frac{2}{k_0^3}\right)\cos k_0\xi_к;\\
Q_1 &= \frac{\sin k_0\xi_н - \sin k_0\xi_к}{k_0};\\
Q_2 &= \frac{\cos k_0\xi_н - \cos k_0\xi_к}{k_0^2} + \frac{\xi_н \sin k_0\xi_н - \xi_к \sin k_0\xi_к}{k_0};\\
Q_3 &= \frac{2(\xi_н \cos k_0\xi_н - \xi_к \cos k_0\xi_к)}{k_0^2} +\\
&\quad +\left(\frac{\xi_н^2}{k_0} - \frac{2}{k_0^3}\right)\sin k_0\xi_н - \left(\frac{\xi_к^2}{k_0} - \frac{2}{k_0^3}\right)\sin k_0\xi_к.
\end{aligned}\right\} \quad \text{(IV.28)}$$

Функции S_1, S_2, S_3, Q_1, Q_2, Q_3 зависят только от числа Фруда и переменной интегрирования θ через $\cos\theta$. Эти функции и определяют осциллирующий характер подынтегрального выражения.

Для анализа влияния L_1, L_2, L_3 на величину волнового сопротивления их удобно представить в виде

$$\left.\begin{aligned}
L_1 &= a_1F_1 + a_2F_2 + a_3F_3;\\
L_2 &= a_4F_2 + a_5F_3;\\
L_3 &= a_6F_3,
\end{aligned}\right\} \quad \text{(IV.29)}$$

где

$$\left.\begin{aligned}
F_1 &= \frac{1 - e^{-p_0T/L} - p_0(T/L)\,e^{-p_0T/L}}{p_0^2(T/L)^2};\\
F_2 &= \frac{1 - e^{-p_0T/L}}{p_0T/L};\\
F_3 &= e^{a_7p_0T/L}\{Ei[-(a_7+1)p_0T/L] - Ei(-a_7p_0T/L)\},
\end{aligned}\right\} \quad \text{(IV.30)}$$

а коэффициенты a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7 равны

$$\left.\begin{aligned}
a_1 &= \frac{n_0 - m_0}{t_2 - t_1} + \frac{(m_1 - n_1)^2}{4(m_2 - n_2)(t_2 - t_1)};\\
a_2 &= \frac{m_0 t_2 - n_0 t_1}{t_2 - t_1} + \frac{(m_1 - n_1)^2 (n_2 t_1 - m_2 t_2)}{4(m_2 - n_2)^2 (t_2 - t_1)};\\
a_3 &= \frac{m_2 n_2 (m_1 - n_1)^2 (t_2 - t_1)}{4(m_2 - n_2)^3};\\
a_4 &= \frac{n_2 m_1 - m_2 n_1}{m_2 - n_2};\\
a_5 &= \frac{m_2 n_2 (t_2 - t_1)(m_1 - n_1)}{(m_2 - n_2)^2};\\
a_6 &= \frac{m_2 n_2 (t_2 - t_1)}{m_2 - n_2};\\
a_7 &= \frac{n_2 t_2 - m_2 t_1}{m_2 - n_2}.
\end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.31)}$$

Следует заметить, что при выражении коэффициентов D_i^0 через m_0, m_1, m_2, n_0, n_1, n_2, t_1, t_2 оказалось, что в формулах (IV.10) все выражения в скобках при F_4 обратились в нуль.

Для упрощения исследования целесообразно выбирать первую ватерлинию на уровне свободной поверхности, где $t_1 = 0$. В этом случае при вариациях формы обводов легче делать выводы о характере нижних ватерлиний, так как сравнение производится с ГВЛ, имеющей фиксированное положение.

В случае, когда $t_1 = 0$, функции L_1, L_2, L_3, F_1, F_2 будут того же вида, но функцию F_3 удобнее записать так:

$$F_3 = a_7 e^{a_7 p_0 \frac{T}{L}} \{Ei[-(a_7+1)p_0 T/L] - Ei(-a_7 p_0 T/L)\}. \qquad \text{(IV.32)}$$

Коэффициенты a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7 упрощаются:

$$\left.\begin{aligned}
a_1 &= \frac{n_0 - m_0}{t_2} + \frac{(m_1 - n_1)^2}{4t_2(m_2 - n_2)};\\
a_2 &= m_0 - \frac{m_2 (m_1 - n_1)^2}{4(m_2 - n_2)^2};\\
a_3 &= \frac{m_2 (m_1 - n_1)^2}{4(m_2 - n_2)^2};\\
a_4 &= \frac{n_2 m_1 - m_2 n_1}{m_2 - n_2};\\
a_5 &= \frac{m_2 (m_1 - n_1)}{m_2 - n_2};\\
a_6 &= m_2;\\
a_7 &= \frac{n_2 t_2}{m_2 - n_2}.
\end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.33)}$$

Анализируя $G(\theta)$ и $H(\theta)$, можно сделать следующие очевидные выводы. Функции S_1, S_2, S_3, Q_1, Q_2, Q_3 играют роль, аналогичную той, которую выполняют ортогональные функции ряда Фурье. Зависимость волнового сопротивления от формы обводов определяется величиной амплитуд L_1, L_2, L_3. Влияние относительной осадки на волновое сопротивление видно по выражениям F_1, F_2, F_3, куда она входит в виде числителя дроби, знаменателем которой служит квадрат числа Фруда (IV.30). Следовательно, при постоянном водоизмещении увеличение относительной осадки приводит к такому же изменению функций F_1, F_2, F_3, как и уменьшение квадрата скорости.

В связи с тем что при использовании для проектирования обводов развертывающихся поверхностей главные размерения не изменяются, а происходит перераспределение кривизны поверхности, интерес представляет именно влияние кривизны, зависящей от коэффициентов n_2 и m_2. Кроме того, при проектировании обводов с РО приходится отступать от общепринятых рекомендаций в тех случаях, когда обычные обводы имеют S-образную форму ватерлиний. Экспериментальные исследования судов с РО показали, что при правильном выборе коэффициентов m_1, n_1, m_2, n_2 не происходит увеличения сопротивления. Для получения рекомендаций по выбору этих коэффициентов необходимо исследовать их влияние на величины $G(\theta)$ и $H(\theta)$.

Судя по a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, коэффициенты m_0, n_0, m_1 и n_1 увеличивают величину сопротивления, так как входят в числитель. Уменьшать сопротивление за счет этих коэффициентов можно путем уменьшения их разности. Влияние коэффициентов m_2 и n_2 сложнее. Их разность везде входит в знаменатель, и, по-видимому, увеличение этой разности с одновременным уменьшением их абсолютных значений должно приводить к уменьшению волнового сопротивления.

Для того чтобы оценить роль отдельных коэффициентов, рассмотрим функции F_1, F_2 и F_3 в зависимости от скорости. При увеличении скорости функции F_1, F_2 и F_3 изменяются различно. Это видно при рассмотрении следующих пределов:

$$\left.\begin{aligned} &\lim_{\substack{v\to\infty\\(p_0\to 0)}} F_1 = \lim_{\substack{v\to\infty\\(p_0\to 0)}} \frac{1-e^{-p_0T/L}-p_0(T/L)e^{-p_0T/L}}{p_0^2(T/L)^2} = \frac{1}{2};\\ &\lim_{\substack{v\to\infty\\(p_0\to 0)}} F_2 = \lim_{\substack{v\to\infty\\(p_0\to 0)}} \frac{1-e^{-p_0T/L}}{p_0T/L} = 1. \end{aligned}\right\} \quad \text{(IV.34)}$$

Функция F_3 зависит не только от числа Фруда и отношения T/L, но и от m_2 и n_2 через коэффициент a_7. Поэтому анализ этой функции сложнее и будет выполнен после определения роли, которую она играет в образовании величин $G(\theta)$ и $H(\theta)$.

Для упрощения анализа допустим, что цилиндрическая вставка отсутствует, а вся носовая оконечность описывается

уравнением (IV.24). В этом случае $\xi_н = 1$, $\xi_к = 0$, а функции S_1, S_2, S_3, Q_1, Q_2, Q_3 упрощаются и имеют вид

$$\left.\begin{aligned}
S_1 &= \frac{1-\cos k_0}{k_0};\\
S_2 &= \frac{\sin k_0}{k_0^2} - \frac{\cos k_0}{k_0};\\
S_3 &= \frac{2\sin k_0}{k_0^2} - \frac{\cos k_0}{k_0} + \frac{2}{k_0^3}(\cos k_0 - 1);\\
Q_1 &= \frac{\sin k_0}{k_0};\\
Q_2 &= \frac{\cos k_0 - 1}{k_0^2} + \frac{\sin k_0}{k_0};\\
Q_3 &= \frac{2\cos k_0}{k_0^2} + \frac{\sin k_0}{k_0} - \frac{2\sin k_0}{k_0^3}.
\end{aligned}\right| \qquad \text{(IV.35)}$$

Тогда $H(\theta)$ и $G(\theta)$ могут быть записаны в таком виде, при котором легко отделить слагаемые, зависящие от квадрата, четвертой и шестой степени числа Фруда через k_0, k_0^2, k_0^3:

$$H(\theta) = (L_1 + L_2 + L_3)\frac{\sin k_0}{k_0} + \\ + \frac{L_2(\cos k_0 - 1) + 2L_3}{k_0^2} - 2L_3\frac{\sin k_0}{k_0^3}; \qquad \text{(IV.36)}$$

$$G(\theta) = (L_1 + L_2 + L_3)\left(-\frac{\cos k_0}{k_0}\right) + \frac{L_1}{k_0} + \\ + (L_2 + 2L_3)\frac{\sin k_0}{k_0^2} + 2L_3\frac{\cos k_0 - 1}{k_0^3}. \qquad \text{(IV.37)}$$

Роли $G(\theta)$ и $H(\theta)$ в образовании величины подынтегральной функции различны. Это легко видеть из выражений

$$\left.\begin{aligned}
G(\theta) &= \int_{-1}^{1}\int_{0}^{1} f(\xi, \zeta)\, e^{-p_0\zeta}\sin k_0\xi\, d\zeta\, d\xi;\\
H(\theta) &= \int_{-1}^{1}\int_{0}^{1} f(\xi, \zeta)\, e^{-p_0\zeta}\cos k_0\xi\, d\zeta\, d\xi.
\end{aligned}\right| \qquad \text{(IV.38)}$$

Если судно симметрично относительно миделя, то функция $G(\theta)$ равна нулю, так как ее подынтегральная функция нечетна.

В этом случае величину волнового сопротивления вычисляют по формуле

$$R=\frac{4\rho g^4}{\pi v^6}\int_0^{\frac{\pi}{2}} H^2(\theta)\frac{d\theta}{\cos^5\theta}. \qquad \text{(IV.39)}$$

Если судно несимметрично, то все равно функция $G(\theta)$ меньше, чем $H(\theta)$, так как носовая часть ее величины компенсируется кормовой частью. Следовательно, уменьшение волнового сопротивления возможно за счет уменьшения функции $H(\theta)$ путем вариации коэффициентов опорных сечений.

Из формулы (IV.36) видно, что роль функций

$$\left.\begin{aligned} A&=L_1+L_2+L_3;\\ B&=L_2(\cos k_0-1)+2L_3;\\ C&=2L_3 \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.40)}$$

зависит от k_0, так как A, B и C умножаются соответственно на $\frac{1}{k_0}$, $\frac{1}{k_0^2}$, $\frac{1}{k_0^3}$. Величина k_0 зависит от числа Фруда и параметра интегрирования θ. Для того чтобы определить, при каких значениях параметра θ подынтегральная функция достигает максимума, выполнен расчет волнового сопротивления для серии обводов, отличающихся коэффициентами m_0, m_1, m_2, n_0, n_1, n_2 носовой оконечности. На графиках (рис. 77) показан характер функции $\frac{H^2(\theta)}{\cos^5\theta}$. Анализ этих графиков показал, что максимумы подынтегральной функции находятся при таких значениях параметра θ, при которых $k_0\approx 2\pi n+\frac{\pi}{4}$.

Для того чтобы преодолеть трудности, связанные с осциллирующим характером подынтегральной функции, выполнен анализ поведения F_1, F_2, F_3, L_1, L_2, L_3 в зависимости от θ на отрезке интегрирования $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$. Оказалось, что функции L_1, L_2, L_3, независимо от значений a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, изменяются монотонно, не пересекаясь. Это показано на рис. 78.

Для построения таких же графиков для функций F_1, F_2, F_3, зависящих от θ через коэффициент p_0, выполнено специальное исследование функции F_3 (IV.32). Для этого определены пределы функции при $p_0\to 0$ (т. е. при $v\to\infty$) для различных значений коэффициента a_7, а затем найдены пределы F_3 при $a_7\to 0$, $a_7\to\infty$ и $a_7\to-\infty$.

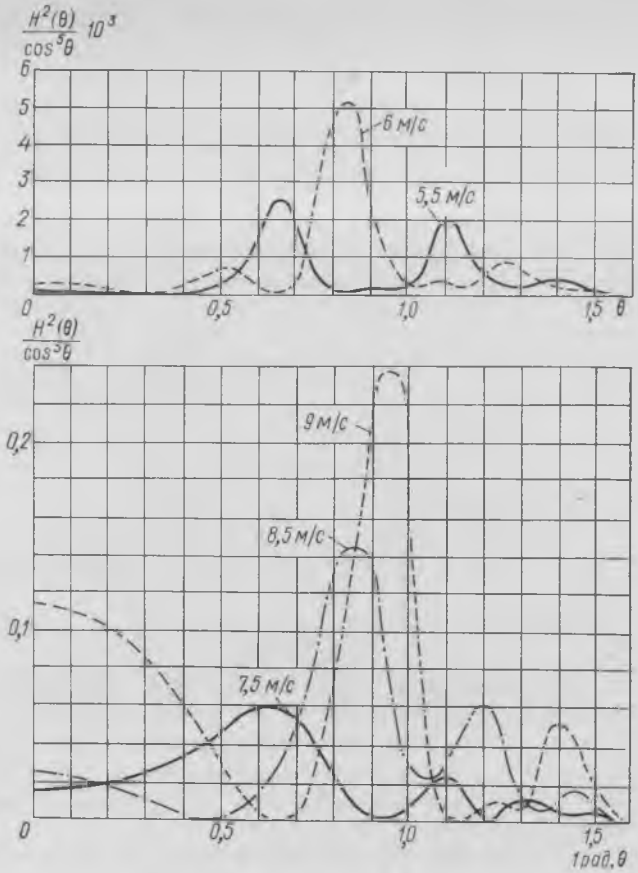

Рис. 77. Зависимость подынтегральной функции $f(\theta)=$ $=[G^2(\theta)+H^2(\theta)]\,\frac{1}{\cos^5(\theta)}$ от скорости

на верхнем графике ——— $v=5{,}5$ м/с; – – – $v=6$ м/с; на нижнем графике ——— $v=7{,}5$ м/с; — · — $v=8{,}5$ м/с; – – – $v=9$ м/с.

Если коэффициент a_7 положительный, то найти $\lim\limits_{p_0\to 0} F_3$ можно, если представить интегральные показательные функции в виде

$$Ei(-x)=C+\ln|x|+\int_0^x \frac{e^{-t}-1}{t}\,dt. \qquad \text{(IV.41)}$$

Тогда входящую в выражение F_3 разность можно записать так:

$$Ei[-(a_7+1)\,p_0T/L]-Ei(-a_7p_0T/L)=$$

$$=\ln\left|\frac{a_7+1}{a_7}\right|+\int_{a_7p_0T/L}^{(a_7+1)\,p_0T/L} \frac{e^{-t}-1}{t}\,dt \qquad \text{(IV.42)}$$

и предел получается очень просто из выражения

$$F_3 = a_7 e^{a_7 p_0 T/L} \left[\ln \left| 1 + \frac{1}{a_7} \right| + \int\limits_{a_7 p_0 T/L}^{(a_7+1) p_0 T/L} \frac{e^{-t} - 1}{t} dt \right]. \qquad \text{(IV.43)}$$

Он равен

$$\lim_{p_0 \to 0} F_3 = a_7 \ln \left| 1 + \frac{1}{a_7} \right|. \qquad \text{(IV.44)}$$

Если $a_7 < 0$, а $|a_7| > 1$, то обе интегральные показательные функции имеют аргумент одного знака. В этом случае функцию

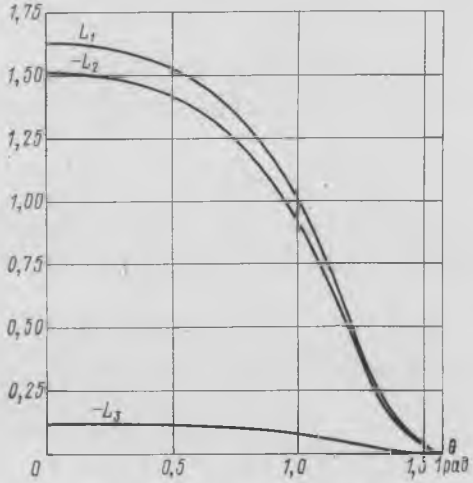

Рис. 78. Зависимость функций формы L_1, L_2 и L_3 от параметра интегрирования θ.

F_3 удобно исследовать, если представить ее в виде

$$F_3 = a_7 e^{a_7 p_0 T/L} \int\limits_{a_7 p_0 T/L}^{(a_7+1) p_0 T/L} \frac{e^{-t}}{t} dt. \qquad \text{(IV.45)}$$

При $a_7 = -1$ функция F_3 терпит бесконечный разрыв

$$\lim_{a_7 \to -1} F_3 = \lim_{a_7 \to -1} a_7 \ln \left| 1 + \frac{1}{a_7} \right| = \infty. \qquad \text{(IV.46)}$$

При $p_0 \to 0$, $a_7 \to \pm\infty$

$$\lim_{\substack{a_7 \to \pm\infty \\ p_0 \to 0}} F_3 = \lim_{\substack{a_7 \to \pm\infty \\ p_0 \to 0}} a_7 \ln \left| 1 + \frac{1}{a_7} \right| = 1. \qquad \text{(IV.47)}$$

При a_7, стремящемся к нулю справа, т. е. для положительных значений, сначала удобнее найти предел при $p_0 \to 0$, а затем при $a_7 \to 0$:

$$\lim_{a_7 \to +0} a_7 \ln \left| 1 + \frac{1}{a_7} \right| = 0.$$

Если $|a_7| < 1$, а $a_7 < 0$, то выражение для F_3 значительно усложняется, так как аргумент $[-(a_7+1)p_0T/L] < 0$ а $(-a_7p_0T/L) > 0$. В этом случае $Ei[-a_7p_0T/L] \to -\infty$, а $Ei[-(a_7+1)p_0T/L]$ является конечным числом. Для определения $\lim\limits_{p_0 \to 0} F_3$ можно представить F_3 в виде суммы

$$F_3 = F_3^* + F_3^{**}, \text{ где } F_3^* = a_7 e^{a_7 p_0 T/L} Ei[-(a_7+1)p_0T/L];$$

$$F_3^{**} = a_7 e^{a_7 p_0 T/L} Ei(-a_7 p_0 T/L).$$

Предел первого слагаемого определяется просто:

$$\lim_{a_7 \to -0} F_3^* = \lim_{a_7 \to -0} a_7 e^{a_7 p_0 T/L} Ei[-(a_7+1)p_0T/L] = 0.$$

Используя то, что при малых x $E_i^*(x) \approx \ln \gamma x$, можно найти предел второго слагаемого следующим образом:

$$F_3^{**} = -|a_7| e^{-|a_7| p_0 T/L} \ln \gamma |a_7| p_0 T/L,$$

где γ — постоянная Эйлера. Тогда

$$\lim_{|a_7| \to 0} F_3^{**} = 0.$$

Легко заметить, что при $a_7 = -\frac{1}{2}$ в формуле (IV.44) аргумент логарифма равен единице, и функция F_3 равна нулю:

$$F_3 = a_7 \ln \left| 1 + \frac{1}{a_7} \right| = -\frac{1}{2} \ln |-1| = 0. \qquad \text{(IV.48)}$$

Следовательно, при $p_0 = 0$ кривая на отрезке изменения a_7 от -1 до $-\frac{1}{2}$ уменьшается от ∞ до 0. На отрезке $\left[-\frac{1}{2}, 0\right]$ функция F_3 отрицательна. Если p_0 не равно нулю, то F_3 принимает равные нулю значения при $-\frac{1}{2} < a_7 < 0$.

Для анализа поведения функции F_3 в зависимости от скорости определяются пределы F_3 при $a_7 \to \pm\infty$. Для этого функция F_3 записывается так:

$$F_3 = a_7 e^{a_7 \alpha} \int_{a_7 \alpha}^{(a_7+1)\alpha} \frac{e^{-t}}{t} dt = a_7 \int_{a_7 \alpha}^{(a_7+1)\alpha} \frac{e^{a_7 \alpha - t}}{t} dt, \qquad \text{(IV.49)}$$

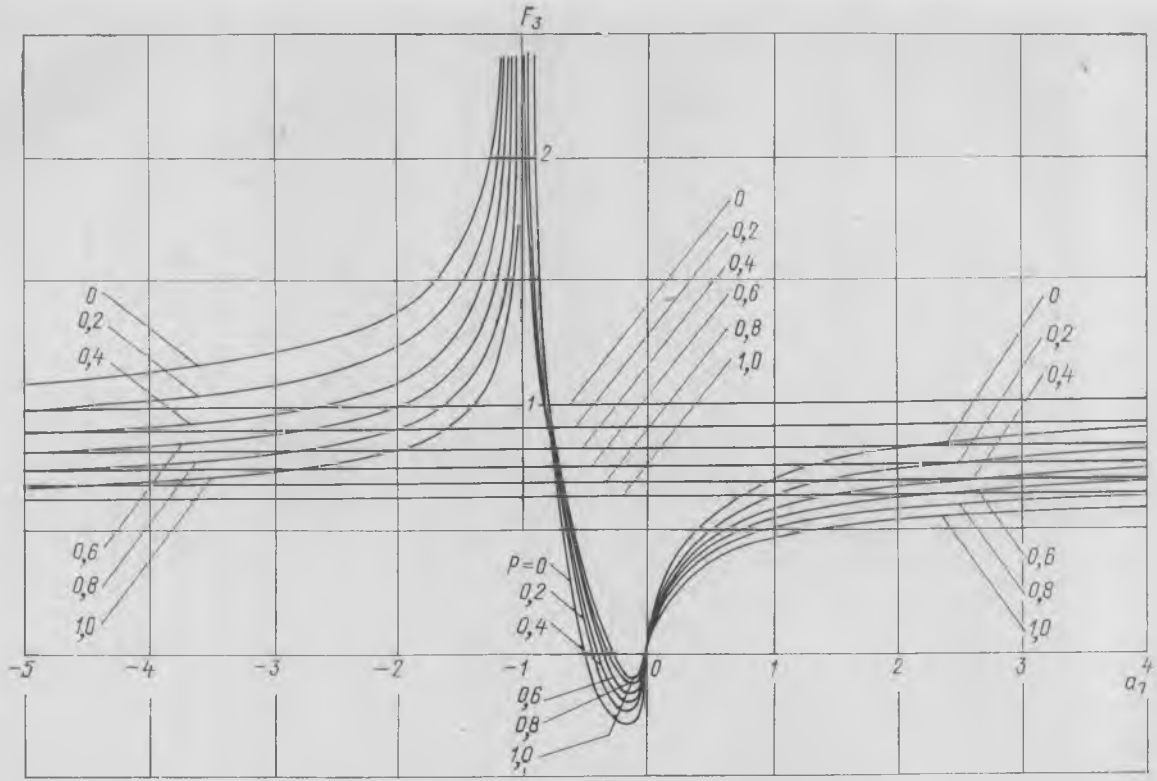

Рис. 79. Зависимость функции F_3 от коэффициента a_7 и p.

где $\alpha = p_0 T/L$. Введя новую переменную $z = a_7\alpha - t$, получим

$$F_3 = -a_7 \int_0^{-\alpha} \frac{e^z}{a_7\alpha - z} dz. \qquad \text{(IV.50)}$$

Тогда

$$\lim_{a_7 \to \pm\infty} F_3 = \lim_{a_7 \to \pm\infty} \left[-\int_0^{-\alpha} \frac{e^z}{\alpha - \frac{z}{a_7}} dz \right] = -\int_0^{-\alpha} \frac{e^z}{\alpha} dz = \frac{1 - e^{-\alpha}}{\alpha}.$$

Отсюда при $a_7 \to \pm\infty$

$$F_3 = \frac{1 - e^{-p_0 T/L}}{p_0 T/L}. \qquad \text{(IV.51)}$$

Такой же вывод для функции F_3 получается при $m_2 = n_2$ (когда $a_7 \to \infty$) непосредственно из уравнения поверхности и выражения L_3. Этот случай будет рассмотрен особо. Поведение функции F_3 в зависимости от a_7 и параметра $p = \frac{T/L}{F r^2}$ показано на рис. 79. Убывающий характер функций F_1, F_2, F_3 в зависимости от параметра интегрирования θ показан на рис. 80.

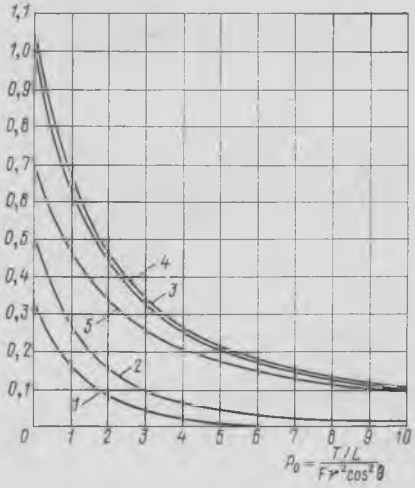

Рис. 80. Зависимость функций скорости и относительной осадки $\frac{T}{L}$ от параметра интегрирования θ:

1 — F_1 по формуле (IV.60); *2* — F_1 по формуле (IV.30); F_2 по формуле (IV.61); *3* — F_2 по формуле (IV.30); F_3 по формуле (IV.62); *4* — F_3 по формуле (IV.32) при $a_7 = -10$; *5* — F_3 по формуле (IV.32) при $a_7 = 1$.

Для определения роли L_1, L_2, L_3 рассмотрено выражение (IV.36). Учитывая монотонный характер зависимости L_1, L_2, L_3 от θ, легко заметить, что уменьшение этих функций при $\theta = 0$ приводит к их уменьшению и при изменении θ от 0 до $\frac{\pi}{2}$. Это обстоятельство позволяет анализировать влияние L_1, L_2, L_3 на величину волнового сопротивления по значениям этих функций при $\theta = 0$, т. е. при $\cos\theta = 1$. При таком подходе можно легко

получить максимумы и минимумы кривой волнового сопротивления в зависимости от числа Фруда.

Легко заметить, что при таких значениях $k_0 = \frac{1}{2\mathrm{Fr}_2}$, когда $\sin k_0 = 0$, а $\cos k_0 = 1$, на кривой волнового сопротивления должны быть условные минимумы, так как тогда при $\theta = 0$

$$H(\theta = 0) = \frac{2L_3}{k_0^2}. \qquad \text{(IV.52)}$$

Это получается при $k_0 = 8\pi$ ($\mathrm{Fr} = 0{,}141$); $k_0 = 6\pi$ ($\mathrm{Fr} = 0{,}163$); $k_0 = 4\pi$ ($\mathrm{Fr} = 0{,}200$); $k_0 = 2\pi$ ($\mathrm{Fr} = 0{,}284$). Результат хорошо согласуется с известными теоретическими и экспериментальными исследованиями.

В процессе интегрирования функция $H(\theta)$ принимает максимальные значения при таких k_0, при которых $\sin k_0$ и $\cos k_0$ соизмеримы по величине и когда слагаемые

$$(L_1 + L_2 + L_3)\frac{\sin k_0}{k_0} \quad \text{и} \quad \frac{L_2(\cos k_0 - 1) + 2L_3}{k_0^2}$$

имеют противоположные знаки. Следует учесть, что для обычных обводов знаки $(L_1 + L_2 + L_3)$, L_2 и L_3 одинаковы (эти величины отрицательны). Обычно $|L_2|$ больше, чем $2|L_3|$ в носовой оконечности. В кормовой оконечности L_2 и L_3 соизмеримы. Когда знаки второго слагаемого совпадают со знаками первого или третьего слагаемого ($\sin k_0 = 1$, $\cos k_0 = 0$), то происходит увеличение сопротивления либо за счет носовой, либо за счет кормовой оконечности. Это справедливо, когда абсолютные значения $k_0 \leqslant 4$. Только в данном случае роль второго и третьего слагаемого значительна. Для $k_0 = 4$ уже второе слагаемое делится на 16, а третье — на 64, и основную долю составляет первое слагаемое. При $k_0 \leqslant 4$ максимумы волнового сопротивления получаются при $k_0 = \frac{\pi}{2}$ ($\mathrm{Fr} = 0{,}55$); $k_0 = \frac{3\pi}{2}$ ($\mathrm{Fr} = 0{,}326$); $k_0 = \frac{5\pi}{2}$ ($\mathrm{Fr} = 0{,}253$); $k_0 = \frac{7\pi}{2}$ ($\mathrm{Fr} = 0{,}215$).

Если расчетная скорость судна соответствует впадинам кривой волнового сопротивления, то доля кривизны, а следовательно, функции L_3 очень велика. Уменьшение L_3 приводит к уменьшению сопротивления практически в любом случае, но меры его уменьшения могут быть различны. Они зависят от значений функций F_1, F_2 и F_3, которые, в свою очередь, зависят от скорости, относительной осадки, а F_3 еще и от коэффициента a_7, отражающего общую кривизну обводов.

Особый интерес вызывает область, где a_7 принимает значения от 0 до $-\frac{1}{2}$. Только на этом участке функция F_3 может обращаться в нуль. Для того чтобы установить зависимость между

формой обводов и волновым сопротивлением, необходимо знать связь между коэффициентом a_7 и формой обводов судов с РО. Следует отметить, что не любые значения коэффициентов m_2 и n_2 могут быть приняты для аппроксимации, так как в уравнении обводов (IV.24) знаменатель не должен обращаться в нуль, когда ζ принимает значения от 0 до 1. Это дает условие, которое накладывается на коэффициенты m_2 и n_2 гладкостью поверхности,

$$|n_2 t_2| > |m_2 - n_2|. \qquad \text{(IV.53)}$$

Гладкие поверхности получаются при $t_2 \leqslant 1$ только в следующих случаях: 1) если $m_2<0$ и $n_2<0$, обе опорные ватерлинии выпуклые, значения $|m_2|$ и $|n_2|$ могут быть любыми; при этом коэффициент a_7 в зависимости от отношения $\frac{m_2}{n_2}$ может принимать либо значения положительные, либо меньшие -1 ($a_7>0$ или $a_7<-1$ соответственно при $\frac{m_2}{n_2}>1$ и $\frac{m_2}{n_2}<1$); 2) если $m_2>0$ и $n_2>0$, обе опорные ватерлинии вогнутые, диаметральный батокс подрезан, что обычно на судах не делается; при этом модуль отношения $\frac{m_2}{n_2}$ может быть любым, а $a_7<-1$, когда $\frac{m_2}{n_2}<1$, и $a_7>0$, когда $\frac{m_2}{n_2}>1$; 3) если знаки m_2 и n_2 различны, то при $t_2=1$ и $t_2<1$ поверхность терпит разрыв при таких значениях ζ_0, где

$$n_2 t_2 - (m_2 - n_2)\zeta_0 = 0. \qquad \text{(IV.54)}$$

Следует заметить, что именно этот случай представляет теоретический интерес, так как только при разных знаках m_2 и n_2 можно получить значения коэффициента $-1<a_7<0$, т. е. обеспечить равенство нулю амплитуды L_3. Существует только два значения a_7, при которых $F_3=0$. Первое значение при $a_7=0$, а второе зависит от скорости судна и отношения T/L, оно заключено между 0 и $-\frac{1}{2}$. Можно предположить, что именно по величине коэффициента a_7, соответствующего $F_3=0$, следует выбирать положение и величину бульба носовой оконечности, если допустить, что разрыв при аналитическом задании поверхности получается в том месте, где должно быть расположено наибольшее сечение бульба. К сожалению, к моменту выхода этой книги экспериментальная проверка этой гипотезы не могла быть сделана.

Расчет волнового сопротивления и экспериментальная проверка выполнены для реальных случаев, когда $m_2<0$ и $n_2<0$. Для исследования влияния величины L_3 на волновое сопротивление была составлена серия обводов, в которой последовательно изменялись два коэффициента n_1 и n_2 в носовой оконечности. При этом кормовые обводы, длина и форма цилиндриче-

ской вставки оставались постоянными. Для вариации коэффициентов n_1 и n_2 составлена программа, по которой вычисляются коэффициенты D_i уравнения поверхности (IV.24), затем методом «невязок» по заданному водоизмещению путем половинного деления подбираются коэффициенты n_1 и n_2. Программа позволяет обнаружить разрыв поверхности при неудачном сочетании m_2 и n_2, так как при этом получается деление на нуль. Расчет по этой программе выполняется в следующей последовательности: по заданным коэффициентам m_0, m_1, m_2, n_0, n_1, n_2, t_1 и t_2 по формулам (IV.26) вычисляют все коэффициенты D_i ($i = 1, 2, \ldots, 11$), затем по формуле (IV.24) — ординаты y; с учетом поправок на крайних ватерлиниях и шпангоутах ординаты суммируют и вычисляют водоизмещение. При этом расчете легко предусмотреть исключение ординат $y<0$, которые получаются на аналитическом продолжении развертывающейся поверхности, образующей носовую оконечность.

Следует заметить, что расчет волнового сопротивления выполняется по коэффициентам a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, которые могут принимать любые значения. Независимо от того, имеет или не имеет разрыв поверхность обводов, по значениям коэффициентов a_i расчет волнового сопротивления может выполняться.

В серии, разработанной для исследования, менялись значения $L_3 = m_2F_3$. При этом соответственно для моделей 1, 2, 3 и 4 значения коэффициента n_1 равнялись —0,9; —0,932; —0,966; —1,00. Для n_2 получились из условия постоянного водоизмещения следующие значения: —0,189 843 5; —0,15; —0,109 375; —0,07. Остальные коэффициенты сохраняли значения: $m_0 = 1{,}319$; $m_1 = -1{,}149$; $m_2 = -0{,}168$; $n_0 = 0{,}99$. Для этих моделей значения коэффициента a_7 соответственно равны 76,862; 11,878 12; 5,780 07; 3,563 67. Относительная осадка $\frac{T}{L} = 0{,}0307$.

Расчет волнового сопротивления для этой серии показал, что волновое сопротивление зависит от обводов кормы больше, чем от носовых. Это происходит по двум причинам. Во-первых, если шпангоуты имеют большую кривизну, то точность расчета по интегралу Мичелля становится тем меньше, чем меньше относительная осадка. Это заложено в допущении Мичелля о малости угла наклона касательных к шпангоутам. В связи с пренебрежением производной $\frac{\partial y}{\partial z}$ величина расчетного волнового сопротивления получается больше действительной, а доля более крутой кормовой оконечности преувеличенной. Во-вторых, кривизна ватерлиний в корме велика, и величина L_3, отражающая влияние кривизны, получается большой.

Для исключения влияния кормовых обводов, кроме обычной формы судна, для расчета волнового сопротивления были использованы симметричные обводы, которые получались путем

зеркального отражения носовой половины судна относительно миделя.

Расчеты показали, что уменьшение волнового сопротивления для симметричных моделей происходит от 1-й к 4-й. Для обводов с обычной кормовой оконечностью до Fr = 0,28 меньшее сопротивление имеет модель 1, а у моделей 2, 3, 4 сопротивление соответственно увеличивается (рис. 81). В результате выполненного анализа и целого ряда расчетов для обводов с РО могут быть сделаны следующие рекомендации по выбору формы носовой оконечности. При постоянном водоизмещении могут быть выбраны разные формы носовой оконечности, близкие по величине волнового сопротивления. При этом если коэффициент общей полноты большой, то пределы изменений коэффициентов опорных ватерлиний невелики. Если допустить, что выбирается упрощенная форма обводов, причем упрощение состоит в том, что форма ватерлинии остается постоянной по осадке, то выбора практически нет, так как площадь ватерлинии должна быть постоянной и равной частному $\frac{V_н}{T}$, где $V_н$ — объем носовой оконечности. В пределах данного исследования уравнение ватерлинии имеет вид

$$y = m_0 + m_1 x + m_2 x^2, \qquad \text{(IV.55)}$$

точка притыкания ватерлинии к цилиндрической вставке определена условиями общего расположения, а для того, чтобы ватерлиния начиналась на носовом перпендикуляре, должно выполняться условие

$$m_0 + m_1 + m_2 = 0. \qquad \text{(IV.56)}$$

Таким образом, все три коэффициента m_0, m_1, m_2 определяются однозначно.

Для таких обводов выполняются равенства коэффициентов $m_2 = n_2$, $m_1 = n_1$; $m_2 = n_2$, и выражения для функций L_1, L_2, L_3 имеют вид

$$L_1 = m_0 F; \quad L_2 = m_1 F; \quad L_3 = m_2 F, \qquad \text{(IV.57)}$$

где

$$F = \frac{1 - e^{-p_0 T/L}}{p_0 T/L}. \qquad \text{(IV.58)}$$

Следует отметить, что среди функций F_1, F_2 и F_3 функция F имеет наибольшее значение при реальных обводах, поэтому волновое сопротивление этих обводов больше обычных. Так как такого типа упрощенные обводы изучены наиболее широко, благодаря возможности взять интеграл по параметру, на них нет смысла останавливаться.

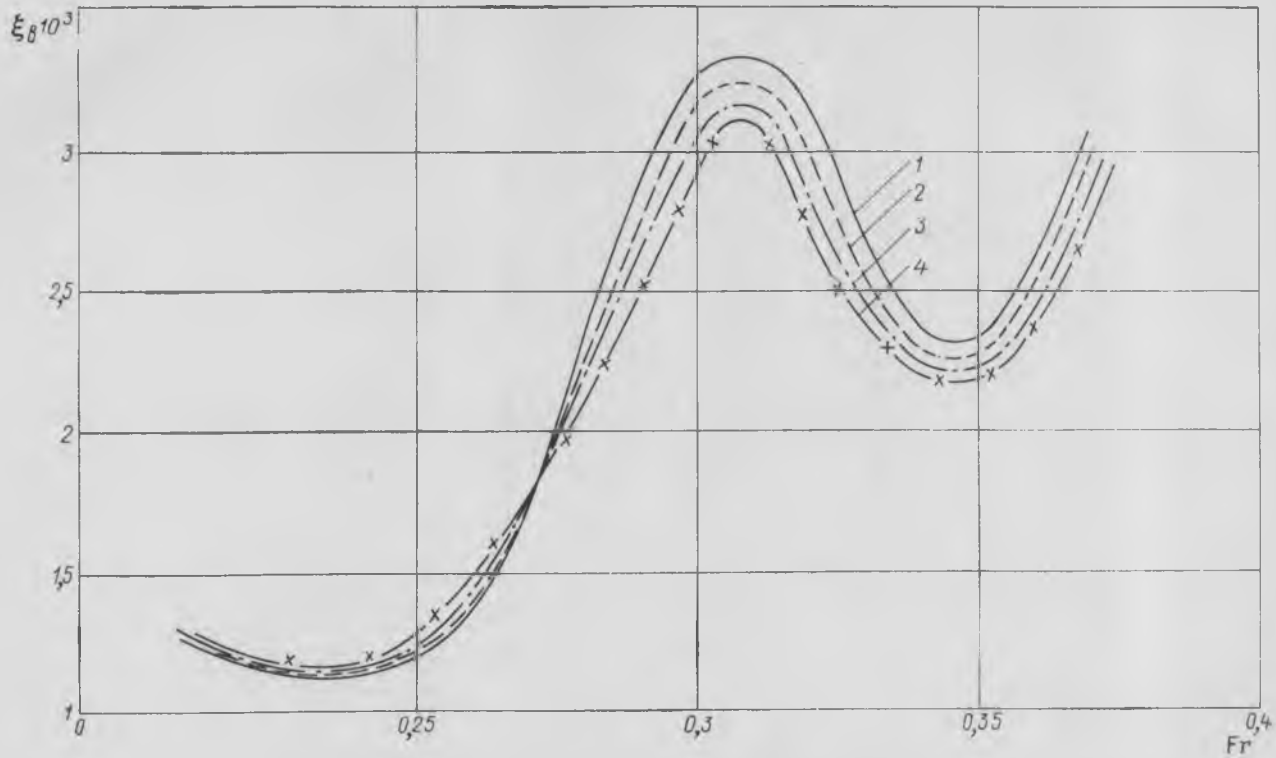

Рис. 81. Расчетные кривые волнового сопротивления обводов с РО.

—— 1-й вариант обводов; – – – 2-й вариант обводов; —·— 3-й вариант обводов; —×— 4-й вариант обводов.

Существует еще один тип упрощенных обводов, когда $m_2 = n_2$. В этом случае коэффициент $a_7 \to \infty$, а коэффициенты, зависящие от формы поверхности, имеют вид

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= \frac{(m_1 - n_1)^2}{4m_2 t_2}; \\ a_2 &= \frac{n_0 - m_0}{t_2} - \frac{(m_1 - n_1)^2}{4m_2 t_2}; \\ a_3 &= \frac{n_1 - m_1}{t_2}; \\ a_4 &= m_2; \\ a_5 &= m_1; \\ a_6 &= m_0. \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.59)}$$

Функции F_1, F_2 и F_3 соответственно равны

$$F_1 = \frac{2 - \left[2 + p_0^2 (T/L)^2 + 2p_0 T/L\right] e^{-p_0 T/L}}{p_0^3 (T/L)^3}; \qquad \text{(IV.60)}$$

$$F_2 = \frac{1 - e^{-p_0 T/L} - p_0 (T/L) e^{-p_0 T/L}}{p_0^2 (T/L)^2}; \qquad \text{(IV.61)}$$

$$F_3 = \frac{1 - e^{-p_0 T/L}}{p_0 T/L}. \qquad \text{(IV.62)}$$

При увеличении скорости эти три функции имеют такие пределы:

$$\lim_{p_0 \to 0} F_1 = \frac{1}{3}; \quad \lim_{p_0 \to 0} F_2 = \frac{1}{2}; \quad \lim_{p_0 \to 0} F_3 = 1. \qquad \text{(IV.63)}$$

Функции L_1, L_2, L_3 находят по формулам

$$\left.\begin{aligned} L_1 &= a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_6 F_3; \\ L_2 &= a_3 F_2 + a_5 F_3; \\ L_3 &= a_4 F_3. \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.64)}$$

Коэффициент a_2 определяет положение точек притыкания ватерлиний к цилиндрической вставке по ширине. Это легко заметить, если уравнение опорной ватерлинии привести к каноническому виду

$$y - \left(m_0 - \frac{m_1^2}{4m_2}\right) = m_2 \left(x + \frac{m_1}{2m_2}\right)^2. \qquad \text{(IV.65)}$$

Здесь положение вершины параболы, образующей ватерлинию, определяется координатами точки $M(x_0, y_0)$, где

$$x_0 = -\frac{m_1}{2m_2}; \qquad y_0 = m_0 - \frac{m_1^2}{4m_2}. \qquad \text{(IV.66)}$$

Как правило, вершина не принадлежит поверхности, но ее смещение влияет на положение точки пересечения заданной ветви ватерлинии с цилиндрической вставкой. Для таких обводов уменьшение L_3, а следовательно, волнового сопротивления, достигается за счет уменьшения коэффициента m_2.

Описанные упрощенные обводы помогают в данном случае определить место хорошо обтекаемых обводов по величине волнового сопротивления. Это хорошо видно по величине коэффициента a_7, определяющего величину L_3. В случае упрощенных обводов этот коэффициент увеличивается до бесконечности (см. рис. 79).

При проектировании быстроходных судов с малым коэффициентом общей полноты возможности перераспределения объема в носовой оконечности значительно шире, чем у полных обводов. В этом случае можно уменьшать величину волнового сопротивления за счет вариации формы нижних ватерлиний в большом диапазоне. Путем вариации коэффициентов нижней опорной ватерлинии при постоянном водоизмещении можно легко найти предельно возможные значения n_1 и n_2. Как показали исследования, при малых числах Фруда могут оказаться выгодными полные носовые ватерлинии из-за полной кормы. Тогда коэффициент n_2 нужно не уменьшать, а увеличивать, чтобы компенсировать интенсивное волнообразование в корме. При больших числах Фруда для уменьшения волнового сопротивления судов с РО следует уменьшать n_2. Если уменьшение n_2 становится невозможным, так как приводит к разрыву поверхности, то следует уменьшать m_2. Этот вывод напрашивается сам собой, если представить функции (IV.40) в виде

$$\left.\begin{aligned} A&=a_1F_1+(a_2+a_4)F_2+\left[1+\frac{m_1-n_1}{m_2-n_2}+\frac{(m_1-n_1)^2}{4(m_2-n_2)^2}\right]m_2F_3;\\ B&=\left[a_4F_2+\frac{m_1-n_1}{m_2-n_2}m_2F_3\right](\cos k_0-1)+2m_2F_3;\\ C&=2m_2F_3, \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.67)}$$

где F_3 определяется по формуле (IV.32), а t_1 принято равным нулю. Отсюда видно, что при уменьшении m_2 уменьшается функция $L_3=m_2F_3$.

Вариация коэффициента m_2 тоже выполняется по описанной выше программе из условия постоянства водоизмещения. Если при такой вариации коэффициентов получается $a_7<0$, то нужно, чтобы a_7 по абсолютной величине был как можно больше при минимальном m_2. Это легко видеть из графика (см. рис. 79). При отрицательных a_7 функция F_3 больше, чем при положительных, так как стремится к своему пределу при $a_7<0$ сверху, а при $a_7>0$ — снизу. При резком уменьшении m_2 величина функции L_3 может быть сделана меньше, чем при $a_7>0$.

Практически это означает уменьшение угла входа действующей ватерлинии.

Для судов с РО уменьшение m_2 тоже имеет предел, поэтому при проектировании быстроходных судов, для которых волнообразование играет большую роль, целесообразно выбирать такое сочетание m_2 и n_2, при котором $F_3 = 0$. Это можно сделать либо за счет бульба, либо за счет сильного развала шпангоутов. При этом уравнение обводов в виде (III.43) уже не может быть применено, но расчет волнового сопротивления по приведенным формулам может быть выполнен и использован для выбора соотношения между уравнением действующей ватерлинии и нижней ватерлинии. Если проектируются обводы с развалом, то нижняя ватерлиния получается заостренной. Если же проектируются обводы с бульбом, то очень заостренной получается действующая ватерлиния. В любом из этих случаев для определения m_2 и n_2 нужно точно определить величину a_7. Значение a_7 берется в тех точках графика (см. рис. 79), в которых $F_3 = 0$. Положение этих точек на оси зависит от величины $p_0 = \frac{T/L}{\mathrm{Fr}^2}$. Для облегчения выбора коэффициента в зависимости от p_0 эта зависимость представлена в виде

$$a_7 = -\frac{0{,}7}{p_0 + 1{,}4} + 0{,}006\,08 p_0. \qquad \text{(IV.68)}$$

Формула справедлива для значений p_0, заключенных на отрезке [0, 10]. Если a_7 определено, то из выражения

$$\frac{n_2 t_2}{m_2 - n_2} = a_7 \qquad \text{(IV.69)}$$

по заданному значению m_2 можно найти величину коэффициента n_2:

$$n_2 = \frac{a_7 m_2}{t_2 + a_7}. \qquad \text{(IV.70)}$$

Такое тщательное исследование зависимости волнового сопротивления от формы судов с РО выполнено с двоякой целью. Во-первых, необходимо было выяснить величину влияния тех изменений, которые происходят при проектировании обводов с РО, на волновое сопротивление. Это дает возможность теоретически обосновать результаты экспериментального сравнения обычных хорошо обтекаемых обводов с обводами с РО. Приведенные расчеты показывают, что при правильном выборе коэффициентов m_1, m_2, n_1, n_2 можно приблизиться к минимуму волнового сопротивления без введения S-образности ватерлиний. Во-вторых, данное исследование необходимо для разработки рекомендаций по выбору формы опорных ватерлиний при проектировании обводов с РО.

По полученным результатам можно предварительный выбор коэффициентов значительно упростить, т. е. не выполнять все расчеты волнового сопротивления для разных вариантов. С помощью предварительных вариаций значений функций $(L_1+L_2+L_3)$; $L_2(\cos k_0-1)+2L_3$ и $2L_3$ по различным значениям коэффициентов m_0, n_0, m_1, n_1, m_2, n_2 при $V=\text{const}$ можно сразу оценить наилучшие их комбинации. Чем меньше сумма $(L_1+L_2+L_3)$ и функция L_3, определяемые по формуле (IV.29), тем меньше будет величина волнового сопротивления.

В заключение хочется отметить, что отклонение коэффициентов m_0, m_1, m_2, n_0, n_1, n_2 от оптимальных приводит к резкому возрастанию расчетной величины волнового сопротивления, поэтому результаты исследования, выполненного по интегралу Мичелля в форме Г. Е. Павленко, получаются достаточно убедительными.

§ 16

Расчет сопротивления трения судов с РО с учетом кривизны

Наряду со сравнительной оценкой волнового сопротивления судов с развертывающейся наружной обшивкой можно определить на ЭВМ величину влияния на сопротивление трения местной кривизны судовой поверхности. Для этой цели используется полуэмпирическая теория пограничного слоя. Эта теория применяется для расчета касательных напряжений осесимметричных и цилиндрических тел [13, 64, 61, 63].

При составлении интегрального соотношения пространственного пограничного слоя пользуются системой криволинейных координат, принадлежащих обтекаемой поверхности [1, 15]. В качестве третьей координаты используется нормаль к поверхности. Это облегчает решение задачи, но при таком способе учитываются длины траекторий, но не учитывается кривизна поверхности. Для учета кривизны при определении касательных напряжений интегральное соотношение составляется в общесудовой системе координат. Начало координат помещается на миделе судна в месте пересечения диаметральной плоскости с плоскостью действующей ватерлинии. Ось OX направлена в нос, ось OY — на правый борт, ось OZ — вверх. При такой системе координат в интегральное соотношение входят коэффициенты, отражающие кривизну поверхности. Таким образом учитывается разница в величине касательных напряжений при одном и том же градиенте давления в случае обтекания плоской и криволинейной формы обводов.

Для составления интегрального соотношения рассматривается элемент поверхности, проекцией которого на ДП является прямоугольник со сторонами dx и dz (рис. 82). Линии шпангоутов и ватерлиний служат криволинейными координатами

поверхности. В качестве третьей координатной оси используется нормаль к касательной плоскости, на которую развертывается выделенный элемент поверхности. При составлении интегрального соотношения для пограничного слоя используется закон количества движения. Упрощение решения задачи достигается

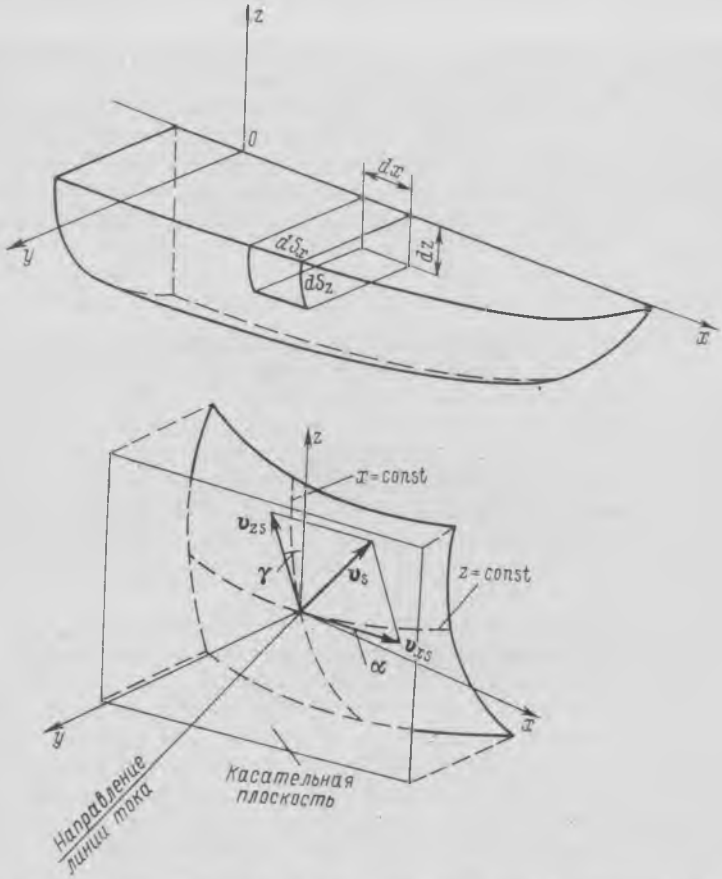

Рис. 82. Элемент судовой поверхности (вверху) и проекции вектора скорости на касательную плоскость к нему (внизу).

за счет того, что каждый элемент поверхности судна с РО развертывается на касательную плоскость с сохранением длин дуг, площадей и углов.

Объем жидкости (рис. 83) ограничен элементом судовой поверхности $ABCD$, внешней границей пограничного слоя $A'B'C'D'$, плоскостями $AA'B'B$, $BB'C'C$, $CC'D'D$ и $AA'D'D$. Количество движения жидкого объема в пограничном слое изменяется вследствие переноса количества движения через конт-

рольные сечения, вследствие рассеяния через внешнюю границу и вследствие неустановившегося поля скоростей.

$\mathbf{v}_s$ — скорость внешнего потока в направлении линии тока; $\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_1(n)$ — уравнение эпюры изменения скорости в пограничном слое в направлении линии тока; $\mathbf{u} = \mathbf{u}(n)$ — уравнение эпюры изменения скорости в пограничном слое в направлении ватерлинии; $\mathbf{w} = \mathbf{w}(n)$ — уравнение эпюры изменения скорости в направлении шпангоута; $\mathbf{v}$ — скорость рассеяния через внешнюю границу $A'B'C'D'$.

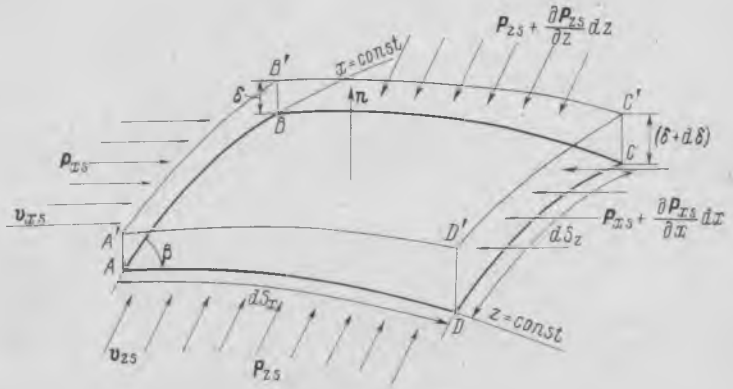

Рис. 83. Течение жидкости в пограничном слое на элементе судовой поверхности.

Через коэффициенты первой квадратичной формы длины дуг dS_x и dS_z и площадь поверхности элемента $ABCD$ выражаются в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} dP &= \sqrt{EG - F^2}\, dx\, dz; \\ dS_x &= \sqrt{E}\, dx; \\ dS_z &= \sqrt{G}\, dz, \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.71)}$$

где

$$\left.\begin{aligned} E &= 1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2; \\ F &= \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial z}\right); \\ G &= 1 + \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)^2; \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.72)}$$

α — угол между направлением оси OX и касательной к ватерлинии; γ — угол между направлением оси OZ и касательной

к шпангоуту; β — угол между криволинейными координатами судовой поверхности.

Косинусы этих углов в каждой точке поверхности судна выражаются через коэффициенты формы (IV.72) следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} \cos\alpha &= \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{E}}; \\ \cos\gamma &= \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{G}}; \\ \sin\beta &= \frac{\sqrt{EG-F^2}}{\sqrt{EG}}; \quad \cos\beta = \pm\frac{F}{\sqrt{EG}}. \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.73)}$$

Объем выделенного элемента равен

$$\left[\sqrt{EG-F^2}\int_0^\delta dn\right] dx\,dz = \sqrt{EG-F^2}\,\delta_{\text{ср}}\,dx\,dz,$$

где δ — толщина пограничного слоя.

При составлении интегрального соотношения коэффициенты E, F и G приняты в пределах выделенного объема постоянными. Изменение количества движения вследствие неустановившегося поля скоростей по объему жидкого элемента за единицу времени равно

$$\sqrt{EG-F^2}\,dx\,dz\frac{\partial}{\partial t}\int_0^\delta \rho \mathbf{u}_1\,dn.$$

Изменение количества движения вследствие переноса жидкости через контрольные сечения $AA'B'B$ и $DD'C'C$ равно

$$\sqrt{G}\sin\beta\,dx\,dz\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta \rho \mathbf{u}_1 u\,dn.$$

Соответствующее изменение количества движения при переносе жидкости через контрольные сечения $AA'D'D$ и $BB'C'C$ равно

$$\sqrt{E}\sin\beta\,dx\,dz\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta \rho \mathbf{u}_1 w\,dn.$$

Изменение количества движения, вызванное рассеянием через внешнюю границу,

$$\rho\sqrt{EG-F^2}\,dx\,dz\mathbf{v}_s v.$$

В последнем выражении скорость рассеяния v определяется из уравнения неразрывности, которое для выделенного жидкого объема определяется следующим путем. Количество жидкости, втекающей через контрольное сечение $AA'B'B$ за единицу времени, равно

$$u\sqrt{G}\sin\beta\,dz\,dn,$$

а количество жидкости, вытекающей через сечение $CC'D'D$,

$$u\sqrt{G}\sin\beta\,dz\,dn+\frac{\partial}{\partial x}\left(u\sqrt{G}\sin\beta\,dz\,dn\right)dx.$$

Соответственно через сечение $AA'D'D$ втекает

$$w\sqrt{E}\sin\beta\,dx\,dn,$$

а вытекает через $BB'C'C$

$$w\sqrt{E}\sin\beta\,dx\,dn+\frac{\partial}{\partial z}\left(w\sqrt{E}\sin\beta\,dx\,dn\right)dz.$$

Через верхнюю границу пограничного слоя $A'B'C'D'$ проходит объем жидкости

$$\frac{\partial}{\partial n}\left(v\sqrt{EG-F^2}\,dx\,dz\right)dn,$$

а через поверхность $ABCD$ не происходит ни втекания, ни вытекания. Вследствие постоянства выделенного объема и несжимаемости жидкости изменение количества движения равно

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(u\sqrt{G}\sin\beta\,dz\,dn\right)dx+\frac{\partial}{\partial z}\left(w\sqrt{E}\sin\beta\,dx\,dn\right)dz+$$
$$+\frac{\partial}{\partial n}\left(v\sqrt{EG-F^2}\,dx\,dz\right)dn=0.$$

Подставляя $\sin\beta$ из (IV.73) и сокращая на $\sqrt{EG-F^2}\,dx\,dz\,dn$, получим

$$\frac{1}{\sqrt{E}}\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial w}{\partial z}+\frac{\partial v}{\partial n}=0.$$

Отсюда скорость v равна

$$v=-\left[\frac{1}{\sqrt{E}}\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta u\,dn+\frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta w\,dn\right].$$

Тогда изменение количества движения, вызванное рассеянием поля скоростей через внешнюю границу пограничного слоя, равно

$$\rho\sqrt{EG-F^2}\,dx\,dz\mathbf{v}_s\left[-\left(\frac{1}{\sqrt{E}}\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta u\,dn+\frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta w\,dn\right)\right].$$

При определении внешних сил, действующих на выделенный жидкий элементарный объем, центробежные силы не учитываются. При составлении интегрального соотношения учитываются силы давления, действующие на контрольные поверхности, и касательные напряжения, вызванные вязкостью жидкости.

Вычитая из силы, приложенной к грани $AA'D'D$, силу, действующую на грань $BB'C'C$, получим

$$\sqrt{G}\sin\beta\, dz\left[\delta \mathbf{P}_{sx}-\left(\mathbf{P}_{sx}+\frac{\partial \mathbf{P}_{sx}}{\partial x}\,dx\right)\delta\right]=-\delta\frac{\partial \mathbf{P}_{sx}}{\partial x}\,dx\,dz\sin\beta\sqrt{G}.$$

Таким же путем определяется сила, действующая в направлении шпангоута,

$$\sqrt{E}\sin\beta\, dx\left[\delta \mathbf{P}_{sz}-\left(\mathbf{P}_{sz}+\frac{\partial \mathbf{P}_{sz}}{\partial z}\,dz\right)\delta\right]=-\delta\frac{\partial \mathbf{P}_{sz}}{\partial z}\,dx\,dz\sin\beta\sqrt{E}.$$

Касательная сила в направлении линии тока равна

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{полн}}\sqrt{EG-F^2}\,dx\,dz.$$

Отсюда уравнение количества движения в векторной форме имеет вид

$$\sqrt{EG-F^2}\,dx\,dz\frac{\partial}{\partial t}\int_0^\delta \rho\mathbf{u}_1\,dn+$$
$$+\left[\sqrt{G}\sin\beta\,dx\,dz\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta \rho\mathbf{u}_1 u\,dn+\sqrt{E}\,dx\,dz\sin\beta\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta \rho\mathbf{u}_1 w\,dn\right]-$$
$$-\sqrt{EG-F^2}\,dx\,dz\mathbf{v}_s\left[\frac{1}{\sqrt{E}}\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta \rho u\,dn+\frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta \rho w\,dn\right]=$$
$$=-\left[\frac{\partial \mathbf{P}_{sx}}{\partial x}\delta\sqrt{G}\sin\beta\,dx\,dz+\frac{\partial \mathbf{P}_{sz}}{\partial z}\delta\sqrt{E}\sin\beta\,dx\,dz\right]-$$
$$-\sqrt{EG-F^2}\,dx\,dz\boldsymbol{\tau}_{\text{полн}}. \qquad \text{(IV.74)}$$

Из уравнения Эйлера частные производные $\frac{\partial P_{sx}}{\partial x}$ и $\frac{\partial P_{sz}}{\partial z}$ выражаются через составляющие скорости внешнего потока следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial P_{sx}}{\partial x}=-\rho\frac{\partial v_{sx}}{\partial t}=\\
&=-\rho\left[\frac{\partial v_{sx}}{\partial t}+\frac{\partial v_{sx}}{\partial x}v_x+\frac{\partial v_{sx}}{\partial z}v_z+\frac{\partial v_{sx}}{\partial n}v_n\right];\\
&\frac{\partial P_{sz}}{\partial z}=-\rho\frac{\partial v_{sz}}{\partial t}=\\
&=-\rho\left[\frac{\partial v_{sz}}{\partial t}+\frac{\partial v_{sz}}{\partial x}v_x+\frac{\partial v_{sz}}{\partial z}v_z+\frac{\partial v_{sz}}{\partial n}v_n\right].
\end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.75)}$$

В этих выражениях

$$v_n=0;\quad v_{sx}=\sqrt{E}v_x;\quad v_{sz}=\sqrt{G}v_z.$$

Если считать движение установившимся, тогда

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial P_{sx}}{\partial x}&=-\rho\left[\sqrt{E}v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}+\sqrt{E}v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}\right];\\ \frac{\partial P_{sz}}{\partial z}&=-\rho\left[\sqrt{G}v_x\frac{\partial v_z}{\partial x}+\sqrt{G}v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right].\end{aligned}\right\}\qquad\text{(IV.76)}$$

Учитывая (IV.73) и раскладывая векторы по направлениям касательных к ватерлиниям и к шпангоутам, можно получить уравнение (IV.74) в проекциях. При установившемся движении по направлениям касательных к ватерлиниям уравнение имеет вид

$$\frac{1}{\sqrt{E}}\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta \rho u^2\,dn+\frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta \rho uw\,dn-v_x\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta \rho u\,dn-$$

$$-\sqrt{\frac{E}{G}}v_x\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta \rho w\,dn=\delta\rho\left[v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}+v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}\right]-\tau_{sx};$$

$$\frac{1}{\sqrt{E}}\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta \rho uw\,dn+\frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta \rho w^2\,dn-\sqrt{\frac{G}{E}}v_z\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta \rho u\,dn-$$

$$-v_z\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta \rho w\,dn=\delta\rho\left[v_x\frac{\partial v_z}{\partial x}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right]-\tau_{sz}.\qquad\text{(IV.77)}$$

Полученное интегральное соотношение справедливо при следующих допущениях: давление в направлении нормали постоянно по толщине пограничного слоя, а скорости в поперечном направлении малы по сравнению со скоростью потока; изменения составляющих скорости и их производных в касательной плоскости имеют меньший порядок, чем по нормали; элемент поверхности не имеет особых точек; изменение течения вследствие центробежных сил считается учтенным в уравнении профиля скорости; силовая функция опускается.

Для конических и цилиндрических поверхностей Л. Е. Калихман [40] получил интегральное соотношение в виде

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta u^2\,dy+\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta uw\,dy-u_\delta\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta u\,dy-\\ &-u_\delta\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta w\,dy=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}\delta-\frac{1}{\rho}\left[\tau_{yx}\right]_0^\delta;\\ &\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta uw\,dy+\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta w^2\,dy-w_\delta\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta u\,dy-\\ &-w\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta w\,dy=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}\delta-\frac{1}{\rho}\left[\tau_{yz}\right]_0^\delta,\end{aligned}\right\}\qquad\text{(IV.78)}$$

где x и z — криволинейные координаты обтекаемой поверхности; y — координата, совпадающая с нормалью к поверхности.

Сравнивая (IV.77) и (IV.78), легко заметить, что разница между этими выражениями заключается в том, что коэффициенты E, F и G, отражающие местную кривизну поверхности, входят в (IV.77) в явном виде. Это обстоятельство позволяет для судов с развертывающейся обшивкой выполнять учет местной кривизны при определении касательных напряжений в разных точках поверхности судна.

Для точного определения касательных напряжений необходимо знать зависимость профиля скорости в пограничном слое от кривизны поверхности, а также распределение толщины пограничного слоя в зависимости от расстояния расчетной точки от носа судна и от кривизны поверхности. Кроме того, необходимо знать поле скоростей внешнего потока. При отсутствии этих данных можно определить влияние кривизны только на интегральное соотношение. Но даже таким образом можно сравнить степень влияния формы обводов на величину сопротивления трения.

Сопротивление трения определяется по формуле

$$R=\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\int_{0}^{T}\tau_x\sqrt{EG-F^2}\,dz\,dx, \qquad \text{(IV.79)}$$

где τ_x находим из интегрального соотношения по формуле

$$\tau_x=\frac{1}{\sqrt{E}}\left\{-\frac{1}{\sqrt{E}}\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta \rho u^2\,dn-\frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta \rho u w\,dn+\right.$$

$$\left.+v_x\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\delta \rho u\,dn+\sqrt{\frac{E}{G}}\,v_x\frac{\partial}{\partial z}\int_0^\delta \rho w\,dn+\delta p\left[v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}+v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}\right]\right\}. \qquad \text{(IV.80)}$$

Для примера взят степенной закон изменения профиля скорости в пограничном слое

$$u=v_x\left(\frac{n}{\delta}\right)^m, \qquad \text{(IV.81)}$$

а показатель степени m зависит от числа Рейнольдса. Эта зависимость получена на базе обработки экспериментов с трубами и пластинами. Измерения производились по направлению движения. Поэтому при расчете касательных напряжений приходится считать равной нулю составляющую скорости течения w,

которая направлена ортогонально к потоку. В этом случае формула (IV.80) упрощается:

$$\tau_x = \frac{1}{\sqrt{E}} \left\{ -\frac{1}{\sqrt{E}} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\delta \rho \left(\frac{n}{\delta}\right)^{2m} v_x^2 \, dn + \right.$$

$$\left. + v_x \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\delta \rho v_x \left(\frac{n}{\delta}\right)^m dn + \delta\rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \right\}. \qquad \text{(IV.82)}$$

После взятия интегралов и приведения подобных членов формула (IV.82) может быть принята для расчета касательных напряжений в виде

$$\tau_x = \frac{\rho}{\sqrt{E}} \left[\left(\frac{1}{m+1} - \frac{2}{\sqrt{E}\,(2m+1)} + 1 \right) \delta v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{1}{m+1} - \frac{1}{\sqrt{E}\,(2m+1)} \right) v_x^2 \frac{\partial \delta}{\partial x} + \rho\, \delta v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right].$$

В это выражение входит величина E, отражающая продольную кривизну поверхности корпуса. С увеличением E выражения, заключенные в круглые скобки,

$$\left(\frac{1}{m+1} - \frac{2}{\sqrt{E}\,(2m+1)} + 1 \right);$$

$$\left(\frac{1}{m+1} - \frac{1}{\sqrt{E}\,(2m+1)} \right)$$

тоже увеличиваются.

При наличии экспериментальных данных или точных теоретических решений для профиля скорости в пограничном слое в направлении, перпендикулярном к потоку, при расчете касательных напряжений с помощью формулы (IV.80) могут быть учтены члены, содержащие коэффициент G, зависящий от поперечной кривизны поверхности.

Для расчета на ЭВМ касательных напряжений с учетом уравнения поверхности по формуле (IV.80) в процессе получения последней приняты следующие допущения:

1) составляющая скорости внешнего потока вычисляется схематично путем трансформации поля скоростей потенциального потока соответственного трехосного эллипсоида на дублированную модель судна;

2) обратное влияние пограничного слоя на внешний потенциальный поток не учитывается;

3) толщина пограничного слоя в каждой точке вычисляется по формулам, принятым для плоских течений;

4) профиль скорости в пограничном слое считается изменяющимся по одному и тому же степенному закону, независимо от расстояния текущей расчетной точки от носа судна.

Для расчета поля скоростей внешнего потока используется известный потенциал скорости при обтекании трехосного эллипсоида. Трансформация поля скоростей производится таким образом, чтобы в точках поверхности дублированной модели судна и трехосного эллипсоида с параллельными касательными плоскостями скорости имели одинаковое направление, а по величине были пропорциональны отношению ширины судна к ширине эллипсоида. Такой метод не является строгим. Для определения поля скоростей внешнего потока следует найти потенциал потока с учетом обратного влияния пограничного слоя. Подобные задачи решаются в работах Г. Е. Гедда [75], [76], А. Е. Перри и П. Н. Джуберта [93], В. Г. Вебстера [97], Д. Х. Престона [94], А. И. Лапа [87], А. Накаямы [91] и других авторов. Особое значение имеют в этом отношении работы, связанные с изучением обтекания математических моделей, близких к форме судна, осесимметричных и других тел вращения.

Пусть уравнение поверхности судна задано в виде

$$y = y(x, z), \tag{IV.83}$$

а уравнение трехосного эллипсоида

$$y_1 = y_1(x_1, z_1). \tag{IV.84}$$

Уравнение касательной плоскости к судовой поверхности в точке $M_0(x_0, y_0, z_0)$ имеет вид

$$y - y_0 = \frac{\partial y}{\partial z}(z - z_0) + \frac{\partial y}{\partial x}(x - x_0).$$

Отсюда условие параллельности двух касательных плоскостей состоит из двух равенств:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial x} &= \frac{\partial y_1}{\partial x_1}; \\ \frac{\partial y}{\partial z} &= \frac{\partial y_1}{\partial z_1}, \end{aligned}\right\} \tag{IV.85}$$

где $\frac{\partial y}{\partial x}$ и $\frac{\partial y}{\partial z}$ — угловые коэффициенты касательных к шпангоуту и к ватерлинии, проходящих через заданную точку $M_0(x_0, y_0, z_0)$ судовой поверхности, а $\frac{\partial y_1}{\partial x_1}$ и $\frac{\partial y_1}{\partial z_1}$ — угловые коэффициенты касательных к поверхности эллипсоида.

Уравнение соответственного эллипсоида записывается через главные размерения судна в следующем виде:

$$\frac{x_1^2}{\left(\frac{L}{2}\right)^2} + \frac{y_1^2}{\left(\frac{B}{2}\right)^2} + \frac{z_1^2}{T^2} = 1. \tag{IV.86}$$

Если известны проекции v_{x_1}, v_{y_1}, v_{z_1} скорости внешнего потока эллипсоида, то проекции скорости в соответствующей точке судна определяются по формулам

$$\left.\begin{aligned} v_x &= \frac{y_c}{y_э} v_{x_1}; \\ v_y &= \frac{y_c}{y_э} v_{y_1}; \\ v_z &= \frac{y_c}{y_э} v_{z_1}, \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.87)}$$

где y_c — ширина судна в текущей точке поверхности $M(x, y, z)$; $y_э$ — ширина эллипсоида в точке, где касательная плоскость параллельна касательной плоскости в текущей точке $M(x, y, z)$ судна.

Множитель $\frac{y_c}{y_э}$ в какой-то мере учитывает разницу в ширине для соответствующих точек судна и эллипсоида. Таким образом получается поле скоростей потока жидкости, обтекающего судно, которое, не давая точных количественных значений, удовлетворительно отражает качественную картину течения.

Необходимые для расчета значения частных производных скорости $\frac{\partial v_x}{\partial x}$ и $\frac{\partial v_z}{\partial z}$ пересчитываются таким же образом, как v_x, v_y, v_z по формулам

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial x} &= \frac{y_c}{y_э} \frac{\partial v_{x_1}}{\partial x}; \\ \frac{\partial v_x}{\partial z} &= \frac{y_c}{y_э} \frac{\partial v_{x_1}}{\partial z}, \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.88)}$$

где

$$\frac{\partial v_{x_1}}{\partial x} = \frac{\partial v_{x_1}}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial x} + \frac{\partial v_{x_1}}{\partial y_1} \frac{\partial y_1}{\partial x} + \frac{\partial v_{x_1}}{\partial z_1} \frac{\partial z_1}{\partial x};$$

$$\frac{\partial v_{x_1}}{\partial z} = \frac{\partial v_{x_1}}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial z} + \frac{\partial v_{x_1}}{\partial y_1} \frac{\partial y_1}{\partial z} + \frac{\partial v_{x_1}}{\partial z_1} \frac{\partial z_1}{\partial z}.$$

Для эллипсоида значения v_{x_1}, v_{y_1}, v_{z_1} вычисляются по формулам, заимствованным из курса «Теоретической механики» Н. Е. Кочина, И. А. Кибеля и Н. В. Розе:

$$\left.\begin{aligned} v_{x_1} &= \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} = \frac{v_\infty}{2 - A_0}\left(A_0 - \frac{2x^2}{a^4 p^2}\right) + v_\infty; \\ v_{y_1} &= \frac{\partial \varphi}{\partial y_1} = -\frac{v_\infty}{2 - A_0} \frac{2y_1 x_1}{a^2 b^2 p^2}; \\ v_{z_1} &= \frac{\partial \varphi}{\partial z_1} = -\frac{v_\infty}{2 - A_0} \frac{2z_1 x_1}{a^2 c^2 p^2}, \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.89)}$$

где

$$p^2=\frac{x_1^2}{a^4}+\frac{y_1^2}{b^4}+\frac{z_1^2}{c^4},$$

а v_∞ — скорость движения судна и соответственного эллипсоида.

Для определения A_0 используется формула

$$A_0-A(x_1,\ y_1,\ z_1)=abc\int\limits_\lambda^\infty \frac{du}{(a^2+u)\sqrt{(a^2+u)(b^2+u)(c^2+u)}}$$

при $\lambda=0$; $a=\frac{L}{2}$; $b=\frac{B}{2}$; $c=T$.

Интеграл, входящий в это выражение, приводится к виду

$$\int\limits_x^\infty \frac{du}{\sqrt{(u-d)(u-f)(u-g)^3}}=\frac{2}{(f-g)\sqrt{d-g}}\left[F(\nu,\ g^2)-E(\nu,\ g^2)\right]$$

при $x>d>f>g$, если $g=-a^2$; $f=-b^2$; $d=-c^2$; $x=0$.

Тогда

$$\int\limits_0^\infty \frac{du}{(a^2+u)\sqrt{(a^2+u)(b^2+u)(c^2+u)}}=$$

$$=\frac{2}{(a^2-b^2)\sqrt{a^2-c^2}}\left[F(\nu,\ q^2)-E(\nu,\ q^2)\right],$$

где $\nu=\arcsin\sqrt{\frac{a^2-c^2}{a^2}}$; $q=\frac{a^2-b^2}{a^2-c^2}$.

A_0 постоянно для всех точек эллипсоида, так как не зависит от x_1, y_1, z_1.

Уравнение оконечностей судна для этого расчета принимается в явном виде (III.43), а уравнение цилиндрической вставки в виде (IV.12).

Из аналитических выражений поверхности судна и эллипсоида определяются значения тангенсов углов наклона касательных плоскостей и соответственные точки судна и эллипсоида, в которых составляющие скоростей пересчитываются по приведенным выше формулам. Для определения координат точек на эллипсоиде с параллельными касательными плоскостями необходимо найти значения производных $\frac{\partial y}{\partial x}$ и $\frac{\partial y}{\partial z}$ в точке $P(x_0,\ z_0)$. При этом уравнения для определения производных имеют вид

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial y}{\partial x}&=\frac{D_4z+2D_5xz+D_6z^2+2D_7x+D_8}{(D_{10}+D_{11}z)^2};\\ \frac{\partial y}{\partial z}&=\frac{\begin{gathered}(3D_1z^2+2D_2z+2D_6xz+D_5x^2+D_4x+D_3)\times\\ \times(D_{10}+D_{11}z)-2D_{11}(D_1z^3+D_2z^2+D_3z+D_4xz+\\ +D_5x^2z+D_6xz^2+D_7x^2+D_8x+D_9)\end{gathered}}{(D_{10}+D_{11}z)^3}\end{aligned}\right\}. \qquad \text{(IV.90)}$$

Определяя частные значения этих производных в точке $P(x_0, z_0)$ и приравнивая значениям производных на поверхности эллипсоида

$$\frac{\partial y_1}{\partial x_1} = \frac{-bx_1}{a^2\sqrt{1-\frac{x_1^2}{a^2}-\frac{z_1^2}{c^2}}};$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial z_1} = \frac{-bz_1}{c^2\sqrt{1-\frac{x_1^2}{a^2}-\frac{z_1^2}{c^2}}}, \qquad \text{(IV.91)}$$

можно получить условия для определения точки на эллипсоиде с параллельной касательной плоскостью

$$\left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_{\substack{x=x_0\\z=z_0}} = \frac{\partial y_1}{\partial x_1}; \quad \left.\frac{\partial y}{\partial z}\right|_{\substack{x=x_0\\z=z_0}} = \frac{\partial y_1}{\partial z_1}. \qquad \text{(IV.92)}$$

Отсюда

$$x_1 = \frac{-y'_{x_1}a^2}{\sqrt{b^2+y'^2_x+y'^2_z}};$$

$$z_1 = \frac{-y'_{z_1}c^2}{\sqrt{b^2+y'^2_x+y'^2_z}}. \qquad \text{(IV.93)}$$

Из этих уравнений определяется точка $P_1(x_1, z_1)$ на эллипсоиде. По формулам (IV.89) определяются проекции скорости внешнего потока в точке P_1 трехосного эллипсоида v_{x_1}, v_{y_1}, v_{z_1}, а затем по формулам (IV.87) — проекции скорости v_x, v_y, v_z на поверхности судна в точке $P(x_0, z_0)$.

Значение производной можно принять равным значению $\frac{\partial v_{x_1}}{\partial x_1}$, учитывая, что пересчет выполняется схематично. Значение производной $\frac{\partial v_x}{\partial z}$ в пределах полосы в районе ватерлинии можно принять равным нулю.

Для расчета касательных напряжений по формуле (IV.80) необходимо знать закон для профиля скорости в пограничном слое и толщину пограничного слоя. Численная проверка показала, что наиболее достоверные результаты получаются, если принять профиль скорости с показателем степени равным $\frac{1}{11}$, а толщину пограничного слоя определять по формуле

$$\delta = 0{,}21\left(\frac{v_x}{\nu}\right)^{-\frac{1}{7}} x_s^{\frac{6}{7}}. \qquad \text{(IV.94)}$$

Для $\frac{\partial \delta}{\partial x}$ из (IV.94) получаем выражение

$$\frac{\partial \delta}{\partial x} = 0{,}18\nu^{\frac{1}{7}} x_s^{-\frac{1}{7}} v_x^{-\frac{1}{7}} - 0{,}03\nu^{\frac{1}{7}} x_s^{\frac{6}{7}} v_s^{-\frac{8}{7}} \frac{\partial v_x}{\partial x}, \qquad \text{(IV.95)}$$

где x_s — расстояние от носа судна до расчетной точки.

Эпюра скоростей в пограничном слое выражается зависимостью

$$u = v_x \left(\frac{n}{\delta}\right)^{\frac{1}{11}}. \qquad \text{(IV.96)}$$

Тогда

$$\int_0^\delta \rho u^2\, dn = \int_0^\delta \rho v_x^2 \left(\frac{n}{\delta}\right)^{\frac{2}{11}} dn = 0{,}846 \rho v_x^2 \delta;$$

$$\int_0^\delta \rho u\, dn = \int_0^\delta \rho v_x \left(\frac{n}{\delta}\right)^{\frac{1}{11}} dn = 0{,}917 \rho v_x \delta.$$

Для расчета касательных напряжений τ_x используется формула

$$\tau_x = \frac{\rho}{\sqrt{E}} \left[\left(1{,}917 - \frac{1{,}691}{\sqrt{E}}\right) \delta v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \left(0{,}917 - \frac{0{,}846}{\sqrt{E}}\right) v_x^2 \frac{\partial \delta}{\partial x}\right]. \qquad \text{(IV.97)}$$

Расчет касательных напряжений любой точки поверхности подводной части судна по приведенной схеме трудностей не представляет и может быть легко выполнен на ЭВМ.

Для того чтобы оценить порядок влияния продольной кривизны на величину касательных напряжений, выполнен расчет τ_x по формуле (IV.97) с учетом того, что

$$E = 1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2,$$

а затем τ_x^1 в тех же точках корпуса, но для $E = 1$, т. е. без учета кривизны. Расчет выполнен для судна типа «Севан» с развертывающейся наружной обшивкой (см. рис. 52, *б*) для ватерлиний, расположенных от ГВЛ на расстоянии 0,5 м (табл. 6) и 1,0 м (табл. 7).

Таблица 6

Номера точек	1	2	3	4	5	6	7	8	9
τ_x	5,03	4,55	4,32	4,14	3,22	3,14	3,08	2,54	3,69
τ_x^1	4,08	3,80	3,70	3,62	3,22	3,14	3,08	2,24	2,17

Номера точек	1	2	3	4	5	6	7	8
τ_x	4,13	4,53	4,30	4,15	3,18	3,12	2,64	2,14
τ_x^1	3,40	3,84	3,70	3,62	3,18	3,12	2,64	1,95

Значения касательных напряжений τ_x и τ_x^1 совпадают в районе цилиндрической вставки (номера точек возрастают к корме).

По полученным значениям касательных напряжений вычислены значения коэффициента сопротивления трения для разных точек судовой поверхности по формуле

$$\zeta_f = \frac{2\tau_x}{\rho v^2}.$$

Среднее значение ζ_f для ватерлинии $z_1 = 0{,}5$ м получилось равным $2{,}02 \cdot 10^{-3}$ с учетом кривизны и $1{,}75 \cdot 10^{-3}$ без учета кривизны, а для ватерлинии $z_2 = 1{,}0$ м соответствующие значения равны $1{,}91 \cdot 10^{-3}$ и $1{,}72 \cdot 10^{-3}$. Резкие скачки в значениях касательных напряжений (например, в точке *9* на ватерлинии $z_1 = 0{,}5$) свидетельствуют о том, что в данном районе должны находиться точки отрыва пограничного слоя. Если требования к ходкости высоки, то с помощью приведенного расчета можно сделать практические выводы об изменении обводов кормы, чтобы сместить точки отрыва за счет кривизны кормовых обводов.

Следует отметить, что условность поля скоростей и профиля скорости в пограничном слое позволяет принять такой расчет в качестве первого приближения. Принятый метод расчета поля скоростей в потенциальном потоке должен давать наибольшие отклонения от реального поля скоростей в носовой оконечности, так как носовая оконечность отличается по форме от эллипсоида больше, чем кормовая. Данный расчет представляет интерес тем, что позволяет хоть в какой-то степени учесть трехмерность потока и найти зависимость вязкостной составляющей сопротивления от формы обводов. Дальнейшее уточнение данной схемы расчета целесообразно проводить на базе теоретических и экспериментальных исследований, выполненных для конических и цилиндрических тел. Большой интерес в этом смысле представляет работа о влиянии поперечной кривизны на характеристики турбулентного пограничного слоя Е. Е. Солодкина и А. С. Гиневского [57].

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА СУДОВ С РО

§ 17

Построение развертки наружной обшивки судов с РО на ЭВМ

Системы программ плазово-технологической подготовки производства, кроме согласования теоретического чертежа и составления плазовой книги, включают программы развертки листов наружной обшивки с трассировкой пазов и стыков. Аналитические методы, применяемые на ЭВМ, практически повторяют графоаналитические методы построения разверток, издавна применяемые на плазе. Разработанные в настоящее время системы программ «Геокод» и «Геокодс» включают программы развертывания листов, основанные на двух методах: методе геодезических линий и методе наименьших площадей.

Основные аналитические решения задачи развертывания листов наружной обшивки корпуса судна, заданного в виде плазовых ординат, принадлежат М. Н. Ничипорову, Ю. И. Оприско [41], В. Н. Никитину, Г. С. Ларионовой, Е. Б. Мосалевой [40], Э. А. Шелковниковой. О реализации этих решений при создании комплекса программ плазовых расчетов можно подробно узнать из работ [5, 6, 30].

Несмотря на то что развертывающиеся поверхности совмещаются с плоскостью без складок и разрывов, найти положение сечений корпуса судна с РО на развертке совсем не просто. Задача состоит в том, чтобы, имея уравнение развертывающейся поверхности и ее сечений, получить уравнение этих сечений на развертке. Теоретическое решение этой задачи основано на использовании инвариантов изгибания поверхностей, которыми являются гауссова кривизна, геодезическая кривизна, длины дуг и углы между сечениями. При решении этой задачи на ЭВМ пользуются аналитическим выражением поверхности корпуса судна с РО, приведенным в гл. III.

Для определения связи между уравнениями сечений теоретического чертежа судна и уравнениями этих же сечений на развертке наружной обшивки использовано следующее важное свойство: *кривизна кривой*, лежащей на плоскости, является одновременно ее *геодезической кривизной*. А поскольку геодезическая кривизна в каждой точке поверхности при изгибании остается неизменной, то линия, в которую переходит заданное сечение, на развертке должна иметь кривизну, равную геодезической кривизне этого сечения.

В основу построения развертки наружной обшивки судов с РО и положена связь между геодезической кривизной сечений судовой поверхности и кривизной соответствующих этим сечениям линий на развертке. Определение геодезической кривизны шпангоутов и ватерлиний судов с РО не вызывает трудностей, так как шпангоуты и ватерлинии заданы аналитически и, кроме того, являются плоскими сечениями.

Пусть K_c — кривизна сечения в точке $M(x, y, z)$ поверхности корпуса. Тогда геодезическая кривизна K_g в этой точке связана с K_c уравнением

$$K_g = K_c \cos\theta, \tag{V.1}$$

где θ — угол между нормалью плоского сечения в точке $M(x, y, z)$, проведенной в плоскости этого сечения, и касательной плоскостью к поверхности, проходящей через точку $M(x, y, z)$.

Кривизна кривой K_p на развертке этого сечения равна геодезической кривизне

$$K_p = K_g,$$

или

$$K_p = K_c \cos\theta. \tag{V.2}$$

Кривизна K_c шпангоута, заданного в виде $y = f(z)$,

$$K_c = \frac{y''_{zz}}{\left(1 + y'^2_z\right)^{3/2}}, \tag{V.3}$$

а для ватерлинии, заданной в виде $y = f(x)$,

$$K_c = \frac{y''_{xx}}{\left(1 + y'^2_x\right)^{3/2}}. \tag{V.4}$$

Для развертки принята плоская система координат OTP с осями OT и OP. Тогда кривизна кривой имеет вид

$$K_p = \frac{t''_{pp}}{\left(1 + t'^2_p\right)^{3/2}}. \tag{V.5}$$

Отсюда получено дифференциальное уравнение сечений шпангоутов и ватерлиний на развертке

$$\frac{t''_{pp}}{\left(1 + t'^2_p\right)^{3/2}} = K_c \cos\theta, \tag{V.6}$$

где K_c и $\cos\theta$ являются функциями координат точки $M(x, y, z)$. Если $x = \text{const}$, т. е. задача решается для шпангоута, то в правой части уравнения (V.6) кривизна K_c — функция одной координаты z.

Учитывая, что кривизна кривой на развертке K_p равна геодезической кривизне сечения K_g, можно получить дифференциальное уравнение, решением которого при заданных начальных условиях является искомая кривая:

$$t''_{pp}=K_g(p)\left(1+t'^2_p\right)^{3/2}. \qquad (V.7)$$

Это уравнение интегрируется путем замены переменной

$$t'_p=u,$$

тогда (V.7) можно записать в виде

$$u'=K_g(p)(1+u^2)^{3/2}.$$

Это обычное уравнение с разделяющимися переменными, приводящееся к виду

$$\frac{du}{(1+u^2)^{3/2}}=K_g(p)\,dp.$$

После интегрирования получим

$$\int\frac{du}{(1+u^2)^{3/2}}=\int K_g(p)\,dp+C_1.$$

Левый интеграл легко берется с помощью тригонометрической подстановки

$$u=\operatorname{tg} v;\quad du=\sec^2 v\,dv$$

и получается в виде

$$\frac{u}{\sqrt{1+u^2}}=\int K_g(p)\,dp+C_1.$$

Решая это уравнение относительно u, получим

$$u=\sqrt{\frac{\left[C_1+\int K_g(p)\,dp\right]^2}{1-\left[C_1+\int K_g(p)\,dp\right]^2}}. \qquad (V.8)$$

Учитывая, что $u=\dfrac{dt}{dp}$, интегрирование необходимо выполнить еще раз. Тогда

$$t=\int\sqrt{\frac{\left[C_1+\int K_g(p)\,dp\right]^2}{1-\left[C_1+\int K_g(p)\,dp\right]^2}}\,dp+C_2. \qquad (V.9)$$

Это уравнение является решением задачи в общем виде. Получить явную зависимость между координатами t и p можно только в том случае, если интегралы берутся в элементарных функциях. Но входящая в подынтегральное выражение функция $K_g(p)$ даже у простейших поверхностей настолько сложна, что

взять интегралы в (V.9) можно только в том случае, когда геодезическая кривизна сечений постоянна.

Геодезическая кривизна вычисляется по формуле (V.1). Для ее определения необходимо найти кривизну заданного сечения и косинус угла между нормалью сечения в точке $M(x, y, z)$ и касательной плоскостью к поверхности в этой точке. Кривизна сечений определяется по формулам (V.3) или (V.4), а определение косинуса угла между нормалью и касательной плоскостью показано ниже при рассмотрении случая, когда уравнения сечений развертываемой поверхности заданы в явном виде.

Предположим, что заданы два шпангоута на поверхности судна с РО и их уравнения представлены в явном виде

$$y_1 = y_1(z_1); \quad y_2 = y_2(z_2).$$

Необходимо найти координаты точек заданных шпангоутов на развертке. Уравнение поверхности судна можно записать в виде системы

$$\left.\begin{aligned} y_1 &= y_1(z_1); \\ y_2 &= y_2(z_2); \\ \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} &= \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}; \\ y'_{1z_1} &= y'_{2z_2}; \\ y &= y_1 + (y_2 - y_1)\frac{x - x_1}{x_2 - x_1}. \end{aligned}\right| \qquad (V.10)$$

Каждой точке одного сечения, имеющей координаты x_1, y_1, z_1, соответствует на другом сечении точка с координатами x_2, y_2, z_2, касательные в которых параллельны. Через эти точки $M_1(x_1, y_1, z_1)$ и $M_2(x_2, y_2, z_2)$ на поверхности проходит прямолинейная образующая (рис. 84). Касательная плоскость, проходящая через точку M_1, касается поверхности не только в этой точке, но во всех точках прямолинейной образующей M_1M_2 и в точке M_2.

Для составления уравнения касательной плоскости, проведенной к поверхности в точке $M_1(x_1, y_1, z_1)$, достаточно задать две прямые, принадлежащие этой плоскости. Такими прямыми являются касательная к сечению, проходящему через точку M_1, и прямолинейная образующая поверхности M_1M_2.

Уравнение прямолинейной образующей

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}, \qquad (V.11)$$

а уравнение касательной прямой

$$\frac{x - x_1}{0} = \frac{y - y_1}{y'_z} = \frac{z - z_1}{1}, \qquad (V.12)$$

где y'_z равно y'_{1z_1} или y'_{2z_2}, так как последние равны между собой.

Для случая, когда искомыми сечениями на развертке являются ватерлинии, заданные в явном виде:

$$\left.\begin{aligned} y_1 &= y_1(x_1); \\ y_2 &= y_2(x_2), \end{aligned}\right\} \qquad (V.13)$$

уравнение касательной прямой имеет вид

$$\frac{x-x_1}{1} = \frac{y-y_1}{y'_x} = \frac{z-z_1}{0}. \qquad (V.14)$$

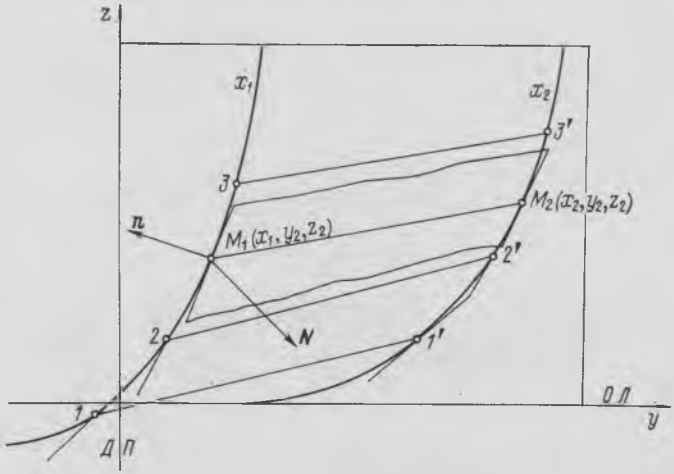

Рис. 84. Нормаль к шпангоуту n и касательная плоскость с нормалью к ней N.

Вектор нормали **N** касательной плоскости можно записать в виде определителя

$$\mathbf{N} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ 0 & y'_{1z_1} & 1 \end{vmatrix}. \qquad (V.15)$$

Если касательная плоскость проходит через касательную к ватерлинии, то в определителе (V.15) вместо y'_{1z_1} входит y'_{2z_2}. Если уравнение касательной плоскости записано в общем виде

$$Ax + By + Cz + D = 0, \qquad (V.16)$$

то коэффициенты вычисляются по формулам

$$\left.\begin{aligned} A &= y_2 - y_1 - y'_{1z_1}(z_2 - z_1); \\ B &= x_1 - x_2; \\ C &= y'_{1z_1}(x_2 - x_1); \\ D &= y'_{1z_1}(x_1 z_2 - x_2 z_1) + (x_2 y_1 - x_1 y_2). \end{aligned}\right\} \qquad (V.17)$$

Нормальная прямая к сечению в точке $M_1(x_1, y_1, z_1)$ задается уравнением

$$\frac{x - x_1}{0} = \frac{y - y_1}{-1} = \frac{z - z_1}{y'_{1z_1}}, \qquad (V.18)$$

где $\mathbf{n} = \{0, -1, y'_{1z_1}\}$.

Угол между нормальной прямой $\mathbf{n}$ и касательной плоскостью определяется по формуле

$$\sin\theta = \frac{Am + Bn + Cp}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}.$$

В данном случае

$$\sin\theta = \frac{\left| x_2 - x_1 + y'^2_{1z_1}(x_2 - x_1) \right|}{\sqrt{1 + y'^2_{1z_1}} \times}$$

$$\times \sqrt{[y_2 - y_1 - y'_{1z_1}(z_2 - z_1)]^2 + (x_2 - x_1)^2 + y'^2_{1z_1}(x_2 - x_1)^2}$$

$$= \frac{\left| (x_2 - x_1)\sqrt{1 + y'^2_{1z_1}} \right|}{\sqrt{(1 + y'^2_{1z_1})(x_2 - x_1)^2 + y'^2_{1z_1}(z_2 - z_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 - 2y'_{1z_1}(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)}}. \qquad (V.19)$$

Отсюда определяется $\cos\theta$:

$$\cos\theta = \frac{\left| y_2 - y_1 - y'_{1z_1}(z_2 - z_1) \right|}{\sqrt{(1 + y'^2_{1z_1})(x_2 - x_1)^2 + y'^2_{1z_1}(z_2 - z_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 - 2y'_{1z_1}(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)}}. \qquad (V.20)$$

Тогда для определения геодезической кривизны получается выражение

$$K_g = \frac{y''_{zz}}{\left(1 + y'^2_z\right)^{3/2}} \times$$

$$\times \frac{\left| y_2 - y_1 - y'_{1z_1}(z_2 - z_1) \right|}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2 + y'^2_z\left[(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2\right] - 2y'_z(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)}}. \qquad (V.21)$$

Геодезическая кривизна является функцией координаты z_1 той точки поверхности, для которой она определяется. Это получается вследствие того, что y_1 является функцией z_1, а координаты y_2 и z_2 зависят от положения точки $M_1(x_1, y_1, z_1)$ из-за условия $y'_{1z_1} = y'_{2z_2}$, в котором y'_{1z_1}, в свою очередь, также является функцией z_1. При переходе к системе координат OTP развертки координате z_1 соответствует независимая переменная p.

Построение на развертке сечений с постоянной гауссовой кривизной рассмотрим на примере, в котором в качестве развертывающейся поверхности взят прямой круговой конус (рис. 85) с основанием радиуса R.

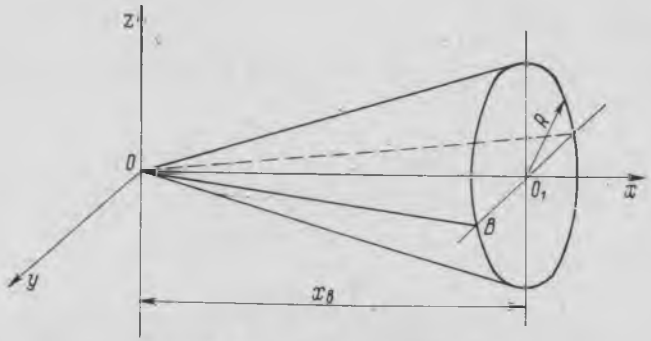

Рис. 85. Прямой круговой конус.

Уравнение конуса в данном случае имеет вид

$$x_в(z^2+y^2)-R^2x^2=0. \qquad (V.22)$$

а уравнение окружности основания

$$z^2+y^2=R^2.$$

Требуется найти уравнение этой окружности на развертке конуса. В данном случае кривизна окружности известна и равна $\frac{1}{R}$. Если бы сечение представляло собой не окружность, а любую другую кривую, то кривизна вычислялась бы по формуле

$$K=\frac{y''_{zz}}{\left(1+y'^2_z\right)^{3/2}}.$$

Для определения геодезической кривизны нужно найти $\cos\theta$, где θ — угол между радиусом O_1B и образующей поверхности OB. В данном случае косинус угла определяется просто по формуле

$$\cos\theta=\frac{R}{\sqrt{x_в^2+R^2}}.$$

Отсюда геодезическая кривизна равна

$$K_g = K\cos\theta = \frac{1}{R}\frac{R}{\sqrt{x_в^2+R^2}} = \frac{1}{\sqrt{x_в^2+R^2}},$$

где $x_в$ и R — постоянные величины.
Тогда

$$\int K_g(p)\,dp = \int \frac{dp}{\sqrt{x_в^2+R^2}} = \frac{p}{\sqrt{x_в^2+R^2}} + C_1.$$

Если начальные условия заданы в виде

$$t|_{p=0} = \sqrt{x_в^2+R^2}; \quad t'|_{p=0} = 0,$$

то $C_1 = 0$ и для определения t получается уравнение

$$t = \int \frac{\left(\frac{p}{\sqrt{x_в^2+R^2}}\right)^2 dp}{1-\left(\frac{p}{\sqrt{x_в^2+R^2}}\right)^2} + C_2, \tag{V.23}$$

откуда

$$t = \sqrt{x_в^2+R^2-p^2} + C_2. \tag{V.24}$$

При заданных начальных условиях произвольная постоянная тоже равна нулю. Тогда уравнение окружности основания прямого кругового конуса на его развертке переходит в уравнение

$$t = \sqrt{x_в^2+R^2-p^2}$$

или

$$t^2+p^2 = x_в^2+R^2, \tag{V.25}$$

где p меняется от $-R$ до R. Развертка конуса показана на рис. 86.

В связи с тем что точное интегрирование возможно только в исключительных случаях и невозможно при задании поверхности в виде системы уравнений, для практического использования на базе точного решения разработан метод приближенного определения координат t, p точки развертки, которая соответствует точке поверхности $M(x, y, z)$. Цель разработки такого метода заключается в том, чтобы одновременно с составлением таблицы плазовых ординат рассчитывать координаты соответствующей точки на развертке.

Приближенный метод применим для любых видов поверхностей с нулевой гауссовой кривизной. Он основан на допущении, что геодезическая кривизна на элементарном участке сечения постоянна. Для достижения необходимой точности при расчете приходится учитывать это обстоятельство путем выбора соответствующего осреднения значений кривизны на каждом элементарном участке.

Пусть уравнение поверхности задано в виде системы

$$\left.\begin{aligned} f_1(y_1, z_1)&=0;\\ f_2(y_2, z_2)&=0;\\ \frac{x-x_1}{x_2-x_1}&=\frac{z-z_1}{z_2-z_1};\\ y'_{1z_1}&=y'_{2z_2};\\ y&=y_1+(y_2-y_1)\frac{x-x_1}{x_2-x_1}. \end{aligned}\right| \qquad (V.26)$$

Первые два уравнения определяют в неявном виде граничные сечения развертываемого участка поверхности. Если это

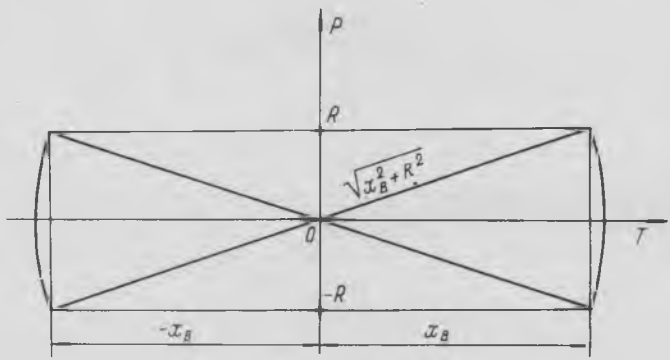

Рис. 86. Развертка прямого кругового конуса.

уравнения шпангоутов, аппроксимированных с помощью трансформированной верзиеры, то коэффициенты этих уравнений задаются в виде массивов A_i $(i=1, 2, 3, \ldots, 10)$, и B_i. Решение этой системы дает ординаты y любой точки поверхности в системе координат судна $OXYZ$. В процессе решения этой системы можно получить все данные для построения развертки и сразу получить координаты точки $M(p, t)$ на развертке для соответствующей точки $M(x, y, z)$ поверхности.

На рис. 87 показана схема построения участка развертки $M_{1i}M_{1(i+1)}M_{2(i+1)}M_{2i}$. В соответствии с принятым допущением участки сечений x_1 и x_2 заменяются дугами окружностей.

Пусть первое и второе уравнения системы представляют собой уравнения шпангоутов в виде

$$\left.\begin{aligned} F_1 &= A_1 y_1^3 + y_1^2 (A_2 z_1 + A_3) + y_1 (A_4 z_1^2 + A_5 z_1 + A_6) + \\ &\quad + A_7 z_1^3 + A_8 z_1^2 + A_9 z_1 + A_{10} = 0; \\ F_2 &= B_1 y_2^3 + y_2^2 (B_2 z_2 + B_3) + y_2 (B_4 z_2^2 + B_5 z_2 + B_6) + \\ &\quad + B_7 z_2^3 + B_8 z_2^2 + B_9 z_2 + B_{10} = 0. \end{aligned}\right\} \quad (V.27)$$

В процессе определения ординат y_2 второго шпангоута определяются координаты y_1 и z_1 точки на первом шпангоуте, через

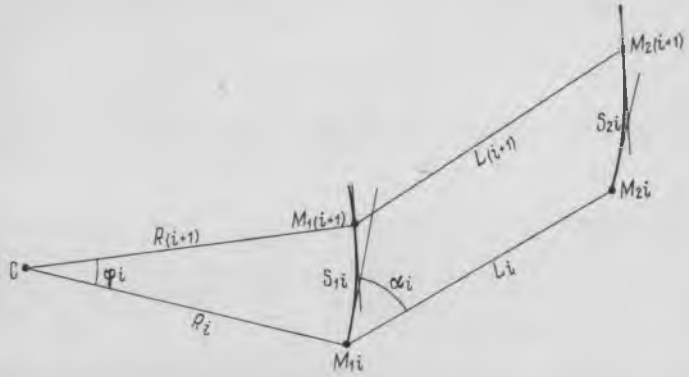

Рис. 87. Расчетные величины развертываемого элемента поверхности.

которую проходит соответствующая прямолинейная образующая. Для построения развертки одновременно определяются значения геодезической кривизны K_{g_1} и K_{g_2} по формуле (V.21) в каждой из этих точек.

Для определения геодезической кривизны K необходимо знать значения первой и второй производной в этих точках. Так как уравнения шпангоутов заданы в неявном виде, производные определяются по формулам

$$\left.\begin{aligned} \frac{dy_1}{dz_1} &= -\frac{F'_{1z_1}}{F'_{1y_1}}; \\ \frac{dy_2}{dz_2} &= -\frac{F'_{2z_2}}{F'_{2y_2}}; \\ \frac{d^2y_1}{dz_1^2} &= \frac{F''_{1y_1z_1}F'_{1z_1} - F''_{1z_1z_1}F'_{1y_1}}{(F'_{1y_1})^2}; \\ \frac{d^2y_2}{dz_2^2} &= \frac{F''_{2y_2z_2}F'_{2z_2} - F''_{2z_2z_2}F'_{2y_2}}{(F'_{2y_2})^2}. \end{aligned}\right\} \quad (V.28)$$

Одновременно определяются разности

$$\left.\begin{aligned}\Delta x&=x_2-x_1;\\ \Delta y&=y_2-y_1;\\ \Delta z&=z_2-z_1\end{aligned}\right\} \qquad (V.29)$$

и длина L прямолинейной образующей между точками M_1 и M_2 по формуле

$$L=\sqrt{\Delta x^2+\Delta y^2+\Delta z^2}. \qquad (V.30)$$

Угол α определяется как угол между векторами касательной и прямолинейной образующей, проходящей через точку M_1.

Вектор касательной равен

$$\mathbf{K}=y'_{1z_1}\mathbf{j}+\mathbf{k}, \qquad (V.31)$$

а вектор прямолинейной образующей имеет вид

$$\mathbf{L}=(x_2-x_1)\,\mathbf{i}+(y_2-y_1)\,\mathbf{j}+(z_2-z_1)\,\mathbf{k}. \qquad (V.32)$$

Угол α определяется по формуле

$$\alpha=\arccos\frac{(z_2-z_1)+y'_{1z_1}(y_2-y_1)}{\sqrt{1+y'^2_{1z_1}}\sqrt{(x^2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}}. \qquad (V.33)$$

Расчет координат точек M_1 и M_2 выполняется от основной плоскости до палубы. При этом z_1 меняется через равные интервалы Δz_1, а z_2 определяется по условию параллельности касательных в точках M_1 и M_2, и интервалы Δz_2 получаются различными. Для построения развертки необходимо знать длину дуг шпангоутов между соседними точками. Точки обозначаются: M_{11}, M_{12}, M_{13}, ..., M_{1i}, M_{1i+1}, ..., M_{1n} — точки на первом шпангоуте; M_{21}, M_{22}, M_{23}, ..., M_{2i}, M_{2i+1}, ..., M_{2n} — точки на втором шпангоуте.

В связи с тем что шпангоуты задаются в неявном виде, длина их не может быть получена путем интегрирования, поэтому длины дуг приходится определять как длину вписанной ломаной линии. Для этого расстояние между двумя соседними точками на каждом шпангоуте делится в направлении оси $0Z$ на десять равных частей. Тогда длина дуги между точками M_{1i} и M_{1i+1} определяется по формуле

$$S_{1i}=\sum_{n=1}^{10}\sqrt{(\delta y_1)_n^2+(\delta z_1)^2}, \qquad (V.34)$$

где

$$(\delta y_1)_n=y_{1n+1}-y_{1n};$$

$$\delta z_1=\frac{z_{1i+1}-z_{1i}}{10}.$$

В каждой точке разбиения шпангоута между M_{1i} и M_{1i+1} для $z_1 = z_{1i} + n\delta z_1$, где $n = 1, 2, \ldots, 10$ по уравнению шпангоута определяются ординаты y_1, по которым вычисляются δy_1.

Аналогично вычисляются длины дуг второго шпангоута

$$S_{2i} = \sum_{n=1}^{10} \sqrt{(\delta y_2)_n^2 + (\delta z_2)^2}, \qquad (V.35)$$

где

$$(\delta y_2)_n = y_{2n+1} - y_{2n};$$

$$\delta z_2 = \frac{z_{2i+1} - z_{2i}}{10}.$$

Угол φ_i определяется как произведение длины дуги на кривизну по формулам

$$\left.\begin{aligned} \varphi_{1i} &= S_{1i} K_{g_1 i}; \\ \varphi_{2i} &= S_{2i} K_{g_2 i}, \end{aligned}\right\} \qquad (V.36)$$

где $K_{g_1 i}$ и $K_{g_2 i}$ — кривизна в точках M_{1i} и M_{2i} соответственно (см. рис. 87), а S_{1i} и S_{2i} — длины дуг между точками $M_{1i} - M_{1i+1}$ и $M_{2i} - M_{2i+1}$.

Построение развертки выполняется в системе координат OTP. Эту систему удобно расположить таким образом, чтобы сечения шпангоутов находились на таком же расстоянии от миделя, как на теоретическом чертеже. Основная линия судна должна совпадать с координатной линией OP. Тогда плоская часть днища, естественно, совместится с плоскостью развертки. Первая прямолинейная образующая, для которой определяются координаты точек M_1 и M_2 в системе координат развертки OTP $M_1(p_1, t_1)$ и $M_2(p_2, t_2)$, должна принадлежать плоской части днища. От нее начинается расчет координат точек сечений. Положение первой прямолинейной образующей на развертке соответствует начальным условиям, которые должны быть заданы при решении дифференциального уравнения.

Для перевода координат точек в систему OTP необходимо точно определить начальный угол наклона первой прямолинейной образующей к основной линии α_1. Такой же угол эта образующая составляет с координатной осью развертки OP.

Из рис. 88 видно, что если M_1M_2 — первая прямолинейная образующая, то координаты точек M_1 и M_2 на ней определяются следующим образом. Пусть x_1 — абсцисса левого граничного шпангоута, а x_2 — абсцисса второго граничного шпангоута. Тогда в системе координат $O^1P^1T^1$, у которой осью O^1P^1 служит первая образующая, координаты точки M_1 равны:

$$p_1^1 = x_1; \quad t_1^1 = 0, \qquad (V.37)$$

а координаты точки M_2

$$p_2^1 = x_1 + L_1; \quad t_2^1 = 0, \tag{V.38}$$

где L_1 — длина первой образующей.

Координаты последующих точек первого и второго граничных шпангоутов определяются как проекции на оси O^1P^1 и O^1T^1

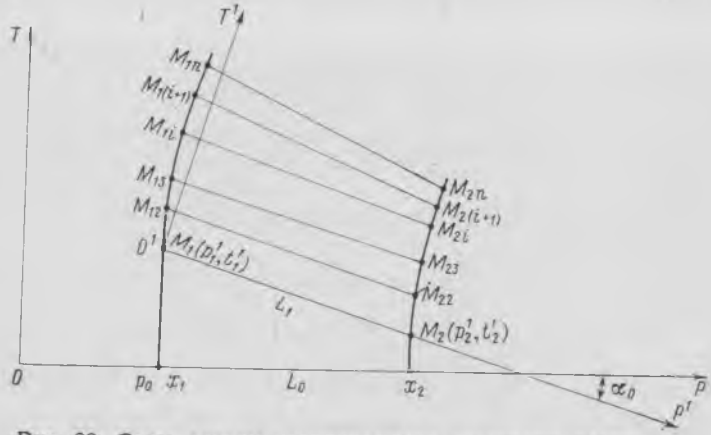

Рис. 88. Связь между координатными системами развертки.

по формулам

$$\left.\begin{aligned} p_{i+1}^1 &= p_i^1 + \frac{R_i}{\sqrt{K_{i+1}^2+1}} - \frac{R_i}{\sqrt{K_i^2+1}}; \\ t_{i+1}^1 &= t_i^1 + \frac{R_i K_{i+1}}{\sqrt{K_{i+1}^2+1}} - \frac{R_i K_i}{\sqrt{K_i^2+1}}, \end{aligned}\right\} \tag{V.39}$$

где K_i и K_{i+1} — угловые коэффициенты радиусов кривизны R_i по отношению к первой прямолинейной образующей. Они определяются по формулам

$$\left.\begin{aligned} K_i &= \operatorname{tg}\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2} + \sum_{n=1}^{i} \varphi_n\right); \\ K_{i+1} &= \operatorname{tg}\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2} + \sum_{n=1}^{i+1} \varphi_n\right). \end{aligned}\right\} \tag{V.40}$$

Перевод координат в систему OPT (рис. 88) выполняется по формулам

$$\left.\begin{aligned} p_i &= p_0 + p_i^1 \cos\alpha_0 + t_i^1 \sin\alpha_0; \\ t_i &= t_0 - p_i^1 \sin\alpha_0 + t_i^1 \cos\alpha_0, \end{aligned}\right\} \tag{V.41}$$

где α_0 — угол между осями O^1P^1 и OP.

При расчете координат точек шпангоутов на развертке из всех углов α_i используется только α_1, а из длин прямолинейных образующих $M_{1i}M_{2i}$ — только L_1, поэтому все последующие значения L_i применяются для проверки точности построения развертки. В качестве контрольной величины удобно использовать расстояние между соответствующими точками M_{1i} и M_{2i}, равное

$$\Delta L_i = L_i - \sqrt{(p_{1i}^1 - p_{2i}^1)^2 + (t_{1i}^1 - t_{2i}^1)^2}. \qquad (V.42)$$

Точность построения развертки зависит от количества точек, которыми разбивается сечение, а следовательно, чем больше может быть взято расчетных точек, тем выше точность построения. Количество расчетных точек определяется памятью ЭВМ. Например, память ЭВМ «Мир-1» позволяет на каждом сечении брать по 15 расчетных точек.

На рис. 89 показаны шпангоуты с абсциссами x_1 и x_2, которые являются опорными для данной оконечности. На ЭВМ получены координаты концов прямолинейных образующих, проходящих на первом шпангоуте с равным интервалом по высоте. Все промежуточные практические и теоретические шпангоуты получаются пропорциональным делением расстояний между концами образующих.

По приведенной выше схеме рассчитывают координаты концов образующих в системе развертки OPT и наносят на чертеж в виде сетки для построения сечений шпангоутов и ватерлиний (рис. 90). Координаты точек диаметрального батокса, теоретических или практических шпангоутов и ватерлиний рассчитывают на ЭВМ и также наносят на чертеж. Если использовать метод пропорционального деления, то точки сечений попадут на имеющуюся сетку из прямолинейных образующих поверхности, нанесенную заранее. На рис. 90 показаны для примера z_n ватерлиния и x_j шпангоут, а также диаметральный батокс.

Для определения на ЭВМ координат p и t точки с заданными значениями x, y, z, принадлежащей поверхности корпуса, необходимо определить координаты концов прямолинейной образующей, проходящей через эту точку на корпусе, а следовательно, и на развертке. На корпусе концами прямолинейной образующей являются точки $M_1(x_1, y_1, z_1)$ и $M_2(x_2, y_2, z_2)$, из которых первая лежит на первом опорном шпангоуте, а вторая — на втором. При определении координат любой точки $M(p, t)$ на развертке могут быть использованы два способа. Первый способ заключается в определении координат p_1, t_1 и p_2, t_2 по приведенной схеме, т. е. в последовательном построении точек опорных сечений на развертке от начальной прямолинейной образующей до искомой. Второй способ проще. Его суть заключается в том, чтобы использовать имеющуюся сетку развертки, состоящую из шпангоутов и прямолинейных образующих. На такой развертке рядом с номерами точек на концах образующих нужно

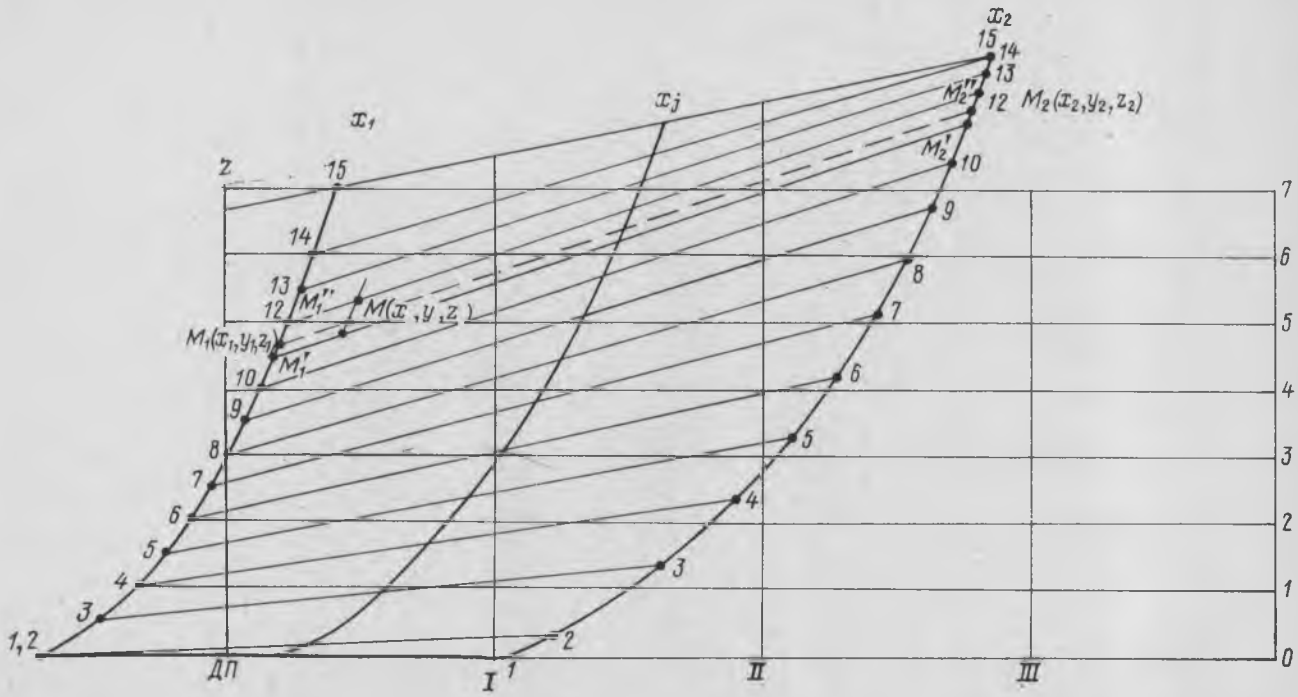

Рис. 89. Положение расчетных прямолинейных образующих на проекции «корпус».

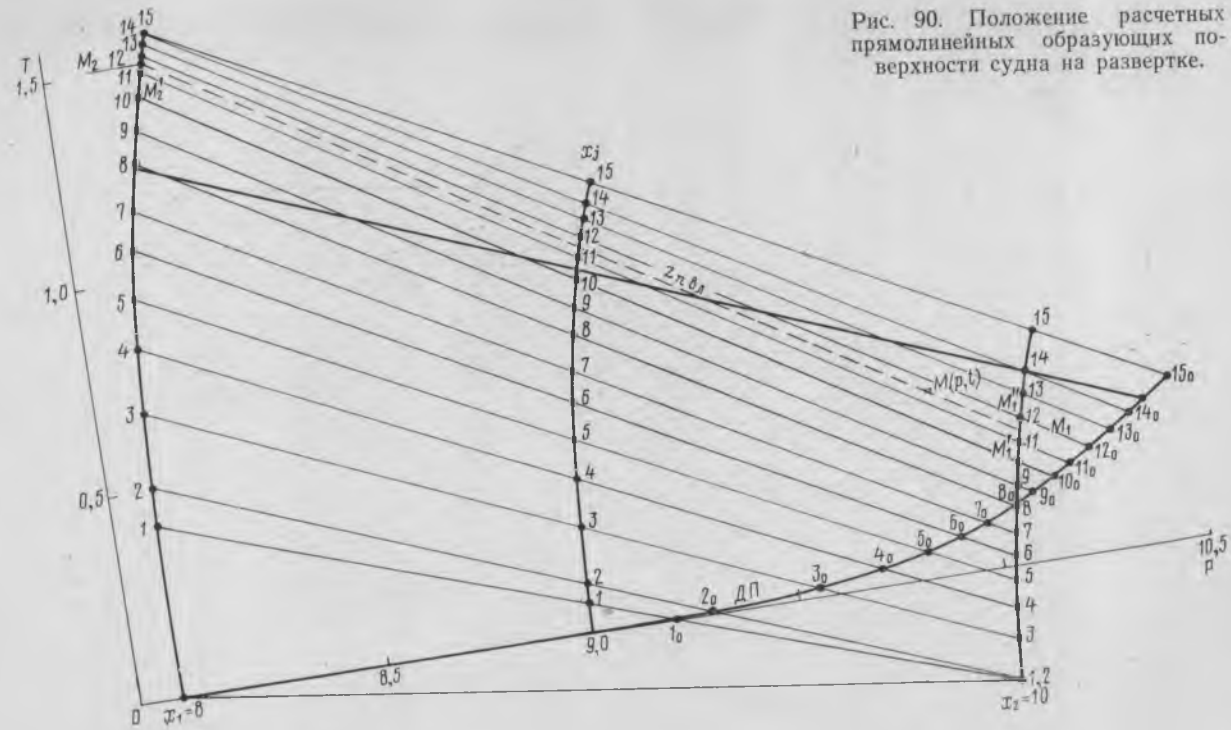

Рис. 90. Положение расчетных прямолинейных образующих поверхности судна на развертке.

проставить соответствующие им координаты x, y, z корпуса. Тогда, определив для заданной точки координаты концов проходящей через нее прямолинейной образующей, можно найти положение точки на развертке интерполированием.

Например, на развертке (рис. 90) нужно найти точку корпуса с координатами $M(x, y, z)$, через которую проходит образующая с концами в точках $M_1(x_1, y_1, z_1)$ и $M_2(x_2, y_2, z_2)$. Эта образующая проходит между *11* и *12* прямолинейными образующими на развертке. Определение положения этой образующей показано на следующем примере.

Пусть точка M имеет координаты $M(9{,}8;\ 0{,}18;\ 0{,}5)$, а координаты концов проходящей через нее прямолинейной образующей $M_1(10;\ 0{,}075;\ 0{,}47)$ и $M_2(8;\ 1{,}115;\ 0{,}825)$. Соответствующие концы одиннадцатой образующей имеют координаты $M'_1(10;\ 0{,}066;\ 0{,}45)$ и $M'_2(8;\ 1{,}108;\ 0{,}8)$, а координаты концов двенадцатой образующей $M''_1(10;\ 0{,}085;\ 0{,}5)$ и $M''_2(8;\ 1{,}125;\ 0{,}844)$. Координаты точек M'_1, M'_2, M''_1, M''_2 на развертке подсчитаны на ЭВМ и равны соответственно $M'_1(10{,}076;\ 0{,}296)$, $M'_2(8{,}13;\ 1{,}49)$, $M''_1(10{,}089;\ 0{,}348)$, $M''_2(8{,}14;\ 1{,}54)$. Для определения положения прямолинейной образующей, проходящей через заданную точку, на развертке можно воспользоваться следующими формулами.

Пусть $M_1(p_1, t_1)$ соответствует концу образующей на первом шпангоуте x_1, а $M_2(p_2, t_2)$ — концу образующей на шпангоуте x_2. Тогда координаты этих точек связаны с координатами соседних образующих формулами

$$\left.\begin{aligned}
p_1 &= p'_1 + (p''_1 - p'_1)\frac{z_1 - z'_1}{z''_1 - z'_1};\\
t_1 &= t'_1 + (t''_1 - t'_1)\frac{z_1 - z'_1}{z''_1 - z'_1};\\
p_2 &= p'_2 + (p''_2 - p'_2)\frac{z_2 - z'_2}{z''_2 - z'_2};\\
t_2 &= t'_2 + (t''_2 - t'_2)\frac{z_2 - z'_2}{z''_2 - z'_2}.
\end{aligned}\right\} \qquad (V.43)$$

После определения координат p_1, t_1, p_2, t_2 легко найти p и t искомой точки $M(x, y, z)$ по формулам

$$\left.\begin{aligned}
p &= p_1 + (p_2 - p_1)\frac{x - x_1}{x_2 - x_1};\\
t &= t_1 + (t_2 - t_1)\frac{x - x_1}{x_2 - x_1}.
\end{aligned}\right\} \qquad (V.44)$$

Для рассматриваемого примера, соответствующего рис. 90, $p_1 = 10{,}082$.

Для точки M координаты на развертке определяются по формулам (V.43) $p = 9{,}887$; $t = 0{,}441$.

Точка $M(p, t)$ показана на рис. 90. Она расположена на образующей, выделенной штриховой линией, концы которой находятся в точках $M_1(p_1, t_1)$ и $M_2(p_2, t_2)$.

Из примера видно, что при необходимости найти на готовой развертке промежуточную точку нужно подсчитать ее координаты по приведенным формулам. Для этого достаточно, чтобы на чертеже развертки вместо номеров точек были записаны их координаты в общесудовой системе координат $OXYZ$. Координаты p и t снимаются с чертежа развертки с помощью масштабов на осях OP и OT.

Приведенная на рис. 90 развертка построена по расчетным координатам. Таблица, содержащая координаты точек на развертке, одновременно включает координаты этих же точек в системе координат судна $OXYZ$. При составлении таблицы в каждой ее строке указываются координаты x, y, z, p, t. В этой же строке можно для удобства указать значения тех же координат в масштабе чертежа. Таблица содержит данные по практическим и теоретическим шпангоутам. По этой таблице для всех развертывающихся участков корпуса легко построить развертку с нанесением шпангоутов, ватерлиний, линии палубы и диаметральной линии, а также всех прямолинейных образующих поверхности корпуса.

Следует заметить, что полученное теоретическое решение, алгоритм для ЭВМ и программы могут быть использованы для построения развертки не только наружной обшивки судна с РО, но и для развертки любых листовых конструкций.

Для построения развертки листов наружной обшивки на неразвертывающихся участках корпуса можно воспользоваться методом Э. А. Шелковниковой и В. Н. Никитина. При использовании этого метода следует только учесть особенности аналитического задания шпангоутов и ватерлиний судов с РО.

§ 18

Конструкция и набор корпуса судна с РО

Конструкция и набор корпуса судов с развертывающейся наружной обшивкой могут быть такими же, как у обычных судов. В этом случае технологические преимущества при постройке судна будут заключаться только в сокращении трудоемкости изготовления листов наружной обшивки. Например, для малых судов можно набор расположить по прямолинейным образующим. У конструктора появится возможность поискать новые варианты при разработке набора. Если продольный набор

в оконечностях судов с РО направить не по ватерлиниям, а по прямолинейным образующим, то сборка секций получается менее трудоемкой. Прямолинейные образующие составляют с ватерлиниями небольшие углы, поэтому можно надеяться, что при расположении продольного набора по образующим общая прочность не пострадает, хотя вопрос этот не исследовался.

Второе изменение в общепринятой конструкции для определенных типов судов может быть сделано в направлении поперечного набора. Если поперечный набор направить по линиям максимальной кривизны, то он получится ортогональным к обшивке и к продольному набору. Стенки поперечного набора при этом получатся изогнутыми, но их изгибание будет получаться

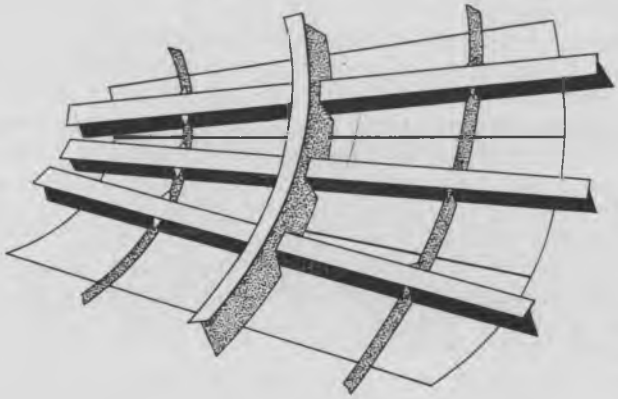

Рис. 91. Секция с ортогональным набором.

без натяга, так как нормали к линиям кривизны развертывающихся поверхностей тоже образуют развертывающуюся поверхность. Это позволяет изготовлять набор из полос любой ширины. Установка набора по месту не потребует малковки, а разметка линий их соединения с обшивкой может быть выполнена на ЭВМ одновременно с расчетом развертки наружной обшивки.

Для реализации преимуществ ортогонального набора следует решить вопрос об углах между стенками и обратными полосами шпангоутов и продольных связей. Если обратные полосы приваривать под прямым углом, то их плоскости окажутся параллельными наружной обшивке, так как весь набор составляет с касательными плоскостями к поверхности корпуса в местах приварки прямые углы. Такой набор на секции, выполненной из развертывающихся поверхностей, показан на рис. 91. Стенки продольных связей плоские с прямыми кромками, а стенки поперечных связей имеют криволинейные кромки (как у обычных судов), но устанавливаются с отклонениями от плоскости шпангоута. Если развертку стенок выполнять на ЭВМ, то их раз-

метка не вызовет затруднений. Несколько сложнее получается с приваркой обратной полосы. В процессе сварки стенки набора с обратной полосой и стенка и полоса будут изгибаться и примут такую форму, какую они должны иметь при установке на место. Конструкция становится не плоской, а объемной. Размеры оснастки также могут быть рассчитаны на ЭВМ.

Отличие изготовления ортогонального набора от обычного заключается в том, что нельзя снять шаблоны с корпуса теоретического чертежа, а нужны расчеты на ЭВМ или специальные графические построения. Если поперечный набор не имеет обратной полосы или выполняется из полособульбового материала, то ортогональный набор может быть изогнут в процессе приварки к обшивке. В этом случае предварительная обработка заключается только в разметке и обрезке листов.

Заранее трудно сравнить трудоемкость изготовления ортогонального набора с обычным. У ортогонального набора меньше малковочных работ, значительно легче изготовление и установка продольного набора, но оснастка при изготовлении поперечного набора может получиться более сложной. Кроме того, для освоения конструкции корпуса с ортогональным набором требуется разработка новой технологии.

Расположение стыков и пазов на развертывающейся наружной обшивке можно выбрать более рационально, чем на обычной обшивке с двоякой кривизной. Двоякая кривизна обшивки при обычной форме обводов достигается путем обрезки листов по кривым линиям, поэтому кромки всех листов получаются криволинейными. Если обшивка развертывающаяся, то все стыки и пазы получаются прямыми. Криволинейными получаются только те кромки листов наружной обшивки, которые прилегают к палубе и проходят по диаметральному батоксу.

Приведенные в предыдущем параграфе алгоритмы построения развертки на ЭВМ позволяют внести принципиальные изменения в решение задачи о разметке пазов и стыков. Разметку проще в этом случае выполнять не на проекции «корпус» теоретического чертежа судна, а прямо на точной развертке наружной обшивки, построенной по расчетным данным. По сетке на развертке, состоящей из прямолинейных образующих и практических шпангоутов легко разметить линии стыков и пазов с учетом габаритов листового материала. Листы можно расположить на развертке всей наружной обшивки таким образом, чтобы довести до минимума отходы. Разметка пазов и стыков на развертке значительно проще, чем на «корпусе», так как вместо пространственной задачи решается плоская.

По сетке развертки, кроме стыков и пазов, легко разметить линии набора. Если набор направлен по шпангоутам и ватерлиниям, то на развертке он оказывается практически размеченным, так как развертка строится по практическим шпангоутам, координаты которых рассчитываются на ЭВМ. Если же набор

выполняется ортогональным, то продольный набор направлен по прямолинейным образующим, которые представляют собой сетку развертки, а поперечный набор должен быть размечен по сетке развертки таким образом, чтобы его линии проходили ортогонально к прямолинейным образующим.

Интерес представляет еще одна задача, связанная с особенностями развертывающейся наружной обшивки. Если кривизна обводов судна в оконечностях значительна, то при ортогональном наборе увеличивается участие обшивки в прочности перекрытия. Оценить степень влияния обшивки в этом случае трудно без специального теоретического или экспериментального исследования.

§ 19

Технологические особенности постройки корпуса судна с РО

Применение развертывающихся поверхностей при проектировании обводов судов целесообразно только в том случае, если их проектирование и постройка обойдутся дешевле, чем обычных судов. Если же преимущества судов с РО не реализуются на всех стадиях проектирования, а технология постройки корпуса останется такой же, как у обычных судов, то нет смысла отказываться от привычных обводов.

Преимущества, которые необходимо использовать с самого начала, заключаются в том, что разработка обводов и вся плазово-технологическая подготовка выполняются на ЭВМ. Если работа на ЭВМ освоена конструктором-проектировщиком, то при создании обводов может быть выполнено согласование нескольких вариантов обводов с оценкой остойчивости и сравнением сопротивления воды движению судна. Такое проектирование ускоряет разработку обводов, так как позволяет сделать предварительное сравнение различных вариантов и сократить объем испытаний в опытовом бассейне.

Большим преимуществом в плазово-технологической подготовке производства, кроме согласования обводов на ЭВМ, является возможность получить точную расчетную развертку наружной обшивки. Получение развертки листов наружной обшивки на ЭВМ дает значительный экономический эффект. Если использовать преимущества точной развертки судов с РО, то экономический эффект увеличится. Развертка наружной обшивки судов с РО строится для больших участков поверхности корпуса, а не для отдельных листов, за счет чего упрощается и сокращается необходимая документация. При выполнении согласования обводов на ЭВМ, в отличие от обычных обводов, для судов с РО таблица плазовых ординат составляется в координатной системе судна *OXYZ* и в плоской системе координат развертки ОРТ. Для максимального использования преиму-

ществ такой плазовой книги нужно выполнять разбивку корпуса на секции одновременно с согласованием обводов на ЭВМ.

Информация для цехов получается в виде таблиц. При использовании в цехах ЭВМ информация может выдаваться в виде перфолент для маркировочных устройств. Точные расчеты всех кромочных линий листов позволят автоматизировать резку криволинейных секций. Панели секций можно собирать в горизонтальном положении с применением автоматической сварки. Если принята ортогональная конструкция набора, то приварку продольных связей можно также производить в горизонтальном положении (рис. 92).

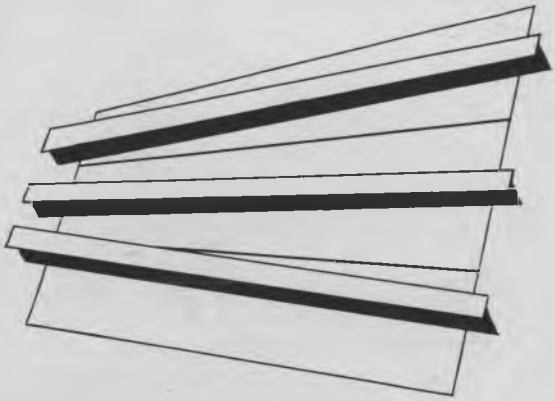

Рис. 92. Подготовка секции с ортогональным набором к сборке.

Конструкция постелей для сборки секций должна быть штыревой. В этом случае по расчетным ординатам, полученным в системе *OXYZ*, штыри устанавливают по обводу судна. Тогда готовая панель, будучи помещенной на постель, под влиянием собственного веса или при помощи грузов примет точную форму обвода корпуса. Практика мирового судостроения показала, что применение гибочных устройств при постройке корпусов судов с РО требуется только для той части наружной обшивки, которая расположена у форштевня или в корме.

Разметка линий шпангоутов может быть выполнена на панели до ее изгибания. После укладки панели по форме обводов линии поперечных связей могут быть еще раз проверены. Если шпангоуты проходят по плоским кривым, то проверка может быть выполнена с помощью световых лучей. Если же принят ортогональный набор, то проверяться должны углы между линиями поперечных связей и продольными балками. Эти углы должны быть прямыми.

Именно при сборке секций цех реализует преимущества обводов с РО, так как повышается точность и качество секции при максимальной автоматизации. Кроме того, именно при подготовке листов наружной обшивки, деталей набора, сборке и проверке секций облегчается применение электронно-вычислительных устройств в судокорпусных цехах.

На рис. 93 показана геометрия постели для секционной сборки. По сравнению с обычными обводами геометрия постели для сборки секций с развертывающейся наружной обшивкой обладает значительными преимуществами: после установки штырей в расчетные положения можно по прямолинейным образующим проверить точность постели. С помощью натянутых нитей

Рис. 93. Геометрия постели для секций корпуса судна с развертывающейся обшивкой.

можно устанавливать штыри в нужное положение, а проверять по координатам криволинейных сечений. Возможность осуществления двойного контроля компенсирует повышенные требования к точности. Геометрия развертывающихся поверхностей позволяет сократить работы по изготовлению оснастки. Особого внимания потребует только та оснастка, которая нужна для неразвертывающихся участков корпуса.

Следует заметить, что, не имея достаточного опыта постройки судов с РО, трудно предусмотреть все технологические особенности постройки.

В связи с тем что обшивка принимает нужную форму за счет упругости и пластичности металла, повышаются требования к точности изготовления набора. Если при маркировке и изготовлении набора не использовать вычислительную технику, то преимущества обводов с РО могут обернуться недостатками при малейшем нарушении технологии. Для избежания трудностей, сопутствующих внедрению нового, необходимо, наряду с созданием комплекса программ, связанных с плазово-технологической подготовкой производства, разработать новую технологию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты сравнительных модельных испытаний серий обычных обводов и обводов из развертывающихся поверхностей, приведенные в гл. II, показывают, что даже корпуса судов со сложными обводами можно проектировать на 95% из развертывающихся поверхностей, не опасаясь за гидродинамическое качество.

Обводы судов с РО легче проектировать с помощью ЭВМ, чем обычными способами, так как такие обводы не допускают местных изменений формы, необходимость в которых возникает иногда в процессе проектирования. В гл. III приведены алгоритмы задания обводов, согласования их с помощью ЭВМ, описаны особенности расчетов по теоретическому чертежу судов с РО.

С другой стороны, наличие математической модели обводов с РО и свойства развертывающихся поверхностей облегчают проведение теоретических исследований, связанных с формой обводов. Это видно по исследованиям, приведенным в гл. IV, где решается вопрос о степени влияния кривизны поверхности на сопротивление воды.

Для облегчения плазово-технологической подготовки производства (в гл. V) приведен алгоритм получения ординат развертки наружной обшивки с помощью ЭВМ. Это позволяет одновременно с плазовой таблицей получать ординаты сечений на развертке наружной обшивки, а затем работать не с растяжкой, а с точной разверткой обшивки.

Результаты исследования класса развертывающихся поверхностей, аналитическое задание и алгоритм получения ординат развертки могут быть использованы везде, где применяются конструкции из листовых материалов, например, в автомобильном, авиационном и железнодорожном строительстве.

Приведенные в книге решения относятся к вопросам проектирования обводов из развертывающихся поверхностей. Для реализации преимуществ обводов с РО в процессе плазово-технологической подготовки производства и в процессе постройки корпуса судна с РО необходимы новые технологические решения. Получение экономического эффекта от применения развертывающихся поверхностей зависит от обеспечения комплексами программ и использования ЭВМ на всех стадиях проектирования и постройки корпуса, а также от организационно-технологических мероприятий, разработанных применительно к обводам с РО.

Приведенные в книге методы и результаты исследований помогут конструкторам при проектировании обводов учитывать технологичность конструкции корпуса будущего судна в соответствии с современными требованиями технологов.

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авдуевский В. С.** Приближенный метод расчета трехмерного ламинарного пограничного слоя. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1962, № 2.

2. **Антимонов К. И.** Теория Мичелля и ее приложение к расчету волнового сопротивления судов. Труды ВНИТОСС, т. I, 1935, вып. 4.

3. **Ашик В. В.** Проектирование судов. Л., Судостроение, 1975.

4. **Басин А. М.** Судно наименьшего волнового сопротивления на мелководье. Труды ЛКИ, 1940, вып. V.

5. **Березин Г. Г.** Плазовые работы и вычислительная техника.— Судостроение, 1969, № 1.

6. **Березин Г. Г., Малков О. Д.** и др. Совершенствование плазовых работ и программирование технологических процессов.— Судостроение, 1970, № 7.

7. **Богданов Б. В.** Морские и рейдовые баржи. Л., Судпромгиз, 1963.

8. **Брайловский А. А.** Выбор упрощенных обводов для морской баржи.— Морской флот, 1947, № 3.

9. **Брегман В. И.** Решение задач статики корабля на ЭВМ. Л., Судостроение, 1966.

10. **Ван-Ламмерен, Троост, Конинг.** Сопротивление, пропульсивные качества и управляемость судов. Л., Судпромгиз, 1957.

11. **Власов В. Г.** Интегральное интерполирование и интерполирование по начальным и конечным производным. Собрание трудов, т. 5, Л., Судпромгиз, 1959.

12. **Войткунский Я. И.** Сопротивление воды движению судов. Л., Судостроение, 1964.

13. **Войткунский Я. И., Першиц Р. Я., Титов И. А.** Справочник по теории корабля. Л., Судпромгиз, 1960.

14. **Глозман М. К., Васильев А. Л.** Технологичность конструкций корпуса судна. Л., Судостроение, 1971.

15. **Голубева О. В.** Исследование движений жидкости по криволинейным поверхностям. Ученые записки МОПИ, т. XVIII, 1951 (Труды кафедр физ.-мат. ф-та, вып. 2).

16. **Горшков А. С.** Применение развертывающихся поверхностей при проектировании мелких судов.— Судостроение, 1951, № 6.

17. **Готман А. Ш.** Способ построения обводов корпуса судна из разворачивающихся на плоскость поверхностей. А. с. № 133771.— Бюллетень изобретений, 1960, № 22.

18. **Готман А. Ш.** Проектирование хорошо обтекаемых судовых обводов из развертывающихся поверхностей.— Судостроение, 1974, № 8.

19. **Ермаш М. Л., Иванов И. П., Нейман П. З.** Клеенная древесина в катеростроении. Л., Судпромгиз, 1959.

20. **Жигулина С. И., Ничипоров М. Н., Савранский А. З.** Опыт согласования обводов корпуса судна на ЭВМ. Труды НКИ, Николаев, 1972, вып. 53.

21. **Жигулина С. И., Ничипоров М. Н.** К вопросу об аппроксимации теоретических линий корпуса судна. Труды НКИ, Николаев, 1973, вып. 66.

22. **Засс В. М.** О влиянии форм обводов на сопротивление при движении по малым рекам.— Судостроение, 1940, № 8, 9.

23. **Ивченко В. М., Первов В. А.** Бульбообразная форма кормовых обводов одновинтовых транспортных судов.— Судостроение, 1960, № 6.

24. **Ильичев А. Т.** О выборе технологичных форм обводов корпуса судна.— Судостроение, 1965, № 10.

25. **Калихман Л. Е.** Пространственный пограничный слой. Труды ЦАГИ, 1939, вып. 371.

26. **Карпов А. Б.** Аналитический метод проектирования судовой поверхности. Труды Горьковского политехнического института им. Жданова, т. IX, 1954, вып. 1.

27. **Карпов А. Б.** Аналитическое проектирование обводов корпуса судна.— Судостроение, 1970, № 2.

28. **Келдыш М. В.** Теория волнового сопротивления в канале конечной глубины. Труды конференции по теории волнового сопротивления. ЦАГИ, 1937.

29. **Кен Н. К.** Обводы корпуса рыболовных траулеров.— Советское судостроение, 1932, № 7.

30. **Ковтун А. Д., Ничипоров М. Н., Фатеев Н. В.** Развертывание листов наружной обшивки на ЭВМ. Труды НКИ, Николаев, 1972, вып. 53.

31. **Костюков А. А.** Аналитические методы вычисления волнового сопротивления на глубокой воде. Изв. АН СССР, ОТН, 1955, № 8.

32. **Костюков А. А.** Теория корабельных волн и волнового сопротивления. Л., Судпромгиз, 1959.

33. **Кочин Н. Е.** О волновом сопротивлении и подъемной силе погруженных в жидкость тел. Труды конференции по теории волнового сопротивления. Собрание сочинений, т. II, АН СССР, 1949.

34. **Кривцов Ю. В.** К вопросу об обводах речных пассажирских судов. Судоходство и судостроение, 1932, № 4, 5.

35. **Крысов Н. А.** Иностранная практика массовой постройки судов.— Судостроение, 1935, № 9.

36. **Курдюмов А. А.** Теория построения судовой поверхности. Доклады АН СССР, т. LV, 1947, № 2.

37. **Малиновская В. И.** О замене некоторых поверхностей двоякой кривизны развертываемыми (применительно к судостроению). Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Киев, 1963.

38. **Монж Г.** Приложение анализа к геометрии. М.—Л., ОНТИ, 1936.

39. **Никитин А. К.** О волнах на поверхности вязкой жидкости. Уч. записки Кабардино-Балкарского гос. университета, сер. физ.-мат. наук, Нальчик, 1961, вып. 13.

40. **Никитин В. Н., Ларионова Г. С., Мосалева Е. Б.** Развертывание листов наружной обшивки на ЭВМ методом наименьших площадей.— Судостроение, 1973, № 12.

41. **Ничипоров М. Н.** Аналитический метод согласования обводов корпуса судна. Труды НКИ, Николаев, 1969, вып. 28.

42. **Ногид Л. М.** Проектирование формы судна и построение теоретического чертежа. Л., Судпромгиз, 1962.

43. **Оборотов И. П.** Гравитационные волны на поверхности вязкой жидкости конечной глубины.— Океанология, 1963, вып. 3, № 4.

44. **Павленко Г. Е.** Геометрический анализ и проектирование форм корабля.— Морской сборник, 1926, № 6.

45. **Павленко Г. Е.** Об упрощенных формах судов. М., Речиздат, 1948.

46. **Павленко Г. Е.** Сопротивление воды движению судов. М., Морской транспорт, 1956.

47. **Первов В. А.** Математические преобразования судовой поверхности.— Судостроение, 1972, № 5.

48. **Пикин Ю. Д., Тимошин Ю. С.** Расчет волнового сопротивления судов на электронно-вычислительной машине. Доклады к научн. конференции (Крыловские чтения), 1965, вып. 64.

49. **Пятецкий В. Е.** Исследование обтекания форм упрощенных обводов грузовых судов для ограниченного фарватера. Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук, Киев, 1965.

50. **Пьятецкий В. Ю.** Судна спрощених форм для обмеженого фарватеру. Киев, АН УССР, 1962.

51. **Рейнов М. Н.** Автоматизация проектирования теоретического чертежа.— Судостроение, 1971, № 4.

52. **Риммер А. И.** Организация и подготовка производства в судостроении. Л., Судостроение, 1968.

53. **Романенко Л. Л., Щербаков Л. С.** Моторная лодка. (Пособие для любителей). Л., Судостроение, 1959.

54. **Рыжов Н. Н.** Аппроксимация сложных поверхностей развертывающимися поверхностями. Труды ВЗЭИ, М., 1958, вып. 13.

55. **Самаркин Л. А., Тонкодуб В. А. и Хазанов М. А.** Некоторые упрощения обводов без изменения основных размерений судов. Труды ЛКИ, Л., 1955, вып. 15.

56. **Сизов В. Г.** К теории волнового сопротивления судна на тихой воде. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1961, № 1.

57. **Солодкин Е. Е., Гиневский А. С.** Влияние поперечной кривизны поверхности на характеристики турбулентного пограничного слоя и осесимметричных тел и каналов. Труды ЦАГИ, 1958, вып. 715.

58. **Сретенский Л. Н.** Теоретическое исследование о волновом сопротивлении. Труды ЦАГИ, 1937, вып. 319.

59. **Сретенский Л. Н.** О волнах на поверхности вязкой жидкости. Труды ЦАГИ, 1941, вып. 541.

60. **Файзулин Д. Г.** Проблемы создания алгоритмического языка судостроительной техники.— Судостроение, 1973, № 10.

61. **Федяевский К. К.** Пограничный слой и лобовое сопротивление тел вращения при больших числах Рейнольдса. Труды ЦАГИ, 1934, вып. 179.

62. **Ханович И. Г.** Проектирование судовой поверхности. Л.—М., ОНТИ, Госстройиздат, 1933.

63. **Ханович И. Г.** Анализ и проектирование формы судовой поверхности. Л.—М., Госстройиздат, 1933.

64. **Ханович И. Г.** Пограничный слой и сопротивление. Л.—М., ОНТИ НКТП СССР, 1936.

65. **Ханович И. Г.** О влиянии кривизны на трение. Труды ВНИТОСС, т. II, 1937, вып. 3.

66. **Ханович И. Г.** Сопротивление воды движению корабля. М., Воениздат, 1946.

67. **Хаскинд М. Д.** Общая теория волнового сопротивления при движении тела в жидкости конечной глубины.— Прикладная математика и механика, т. IV, 1945, вып. 3.

68. **Черкасов Л. В.** О волнах на поверхности жидкости. Изв. АН СССР, ОТН, 1959, № 2.

69. **Яковлев И. А.** Кривые для образования непрерывных судовых обводов.— Советское судостроение, 1932, № 7.

70. **Barthel F.** Hydroconic—Schiffsform für Fischereifahrzeuge.—Hansa—Schiffahrt Schiffbau Hafen, vol. 95, Hamburg, 1958, N 4.

71. **Berger S. A., Webster W. C.** and others. Mathematical ship loftung.— J. Ship. Res., vol. 10, 1966, N 4.

72. **Davidson R.** A new approach to the analysis and design of the bulbous bow.— Internat. Shipbuild. Progr., vol. 13, 1966, N 146.

73. **Emerson A.** Hull form and ship resistance.— Trans. N. E. Coast Inst. Eng. and Shipbuild., vol. 87, 1971, N 5.

74. **Ferris L. W.** Developable surfaces.— Journal of the American Society of Naval Engineers, vol. 73, 1961, N 2.

75. **Gadd G. E.** A comparison of some model and full scale hull boundary layer measurements.— Trans. N. E. Coast. Inst. Eng. and Shipbuild. vol. 90, 1973, N 2.

76. **Gadd G. E.** The approximate calculation of turbulent boundary layer development on ship hulls.— Trans. Roy. Nav. Archit., vol. 113, 1971, N 1.
77. **Guilloton R. A.** Further Notes on the Theoretical Calculation of wave Profiles and of the Resistance of Hulls.— Trans. of the Inst. of Nav. Archit., vol. 88, 1946.
78. **Guilloton R. A.** New Method of Calculating Wave Profiles and Wave Resistance of Ships.— Trans. of the Inst. of Nav. Archit., vol. 82, 1940.
79. **Grollius W.** Untersuchung des Strömungafeldes analytischer Schiffsformen auf flachem Wasser im Geschwindigkeitsbereich geringer Wellenbildung.— Schiff und Hafen, vol. 27, 1957, N 9.
80. **Hall E. H.** Curves of statical stability in the computer age. Ship and Boat Int., vol. 24, 1971, N 3, 4.
81. **Hatch G. N.** Conic boat.— Ship and boat builder, London, 1964, N 3—7.
82. **Havelock T.** Wave Resistance Theory and Its Application to Ship Problem. TSNAME, 1951.
83. Hydroconic construction progress.— The Shipbuilder and Marine Engine Builder, vol. 64, 1957, N 586.
84. **Inui T.** Wave-making Resistance of Ships travelling in a viscous fluid. Proceeding of the 7th Japan National Congress for Applied Mechanics, 1957.
85. **Kilgore U.** Developable Hull Surfaces.— Fishing Boats of the World, vol. 3, 1967.
86. **Knight G. R.** Will this Development Impruve Tugs? — Marine Engineering/Log, LXIII, 1958, N 3.
87. **Lap A. I. W.** Some applications of the threedimensional extrapolation of ship frictional Resistance.— Inter. Shipbuilding Progress, vol. 5, 1958, N 46.
88. **Lindblad A.** Some experiment with models of high speed cargo Liners. Göteborg, N. I. Cumpers Borhandel, 1960.
89. **Mac Callum K. G.** Mathematical design of hull surfaces.— Trans. Roy. Inst. Nav. Archit., vol. 114, 1972.
90. **Michell I. H.** The Wave-Resistance of a Ship.— Philosophical Magazine and Journal of Science, vol. XLV, 1898, 5th Series.
91. **Nakayama A., Patel V. C.** Calculation of the viscous resistance of bodies of revolution.— Hydronaut, vol. 8, 1974, N 4.
92. **Nolan T. J.** Computer — aided design of developable hull surfaces.— Mar. Technol., vol. 8, 1971, N 2.
93. **Perry A. E., Joubert P. N.** A Three-dimensional turbulent boundary layer.— J. of Fluid Mechanics, vol. 22, part 2, 1965.
94. **Sachdeva R. C., Preston J. H.** Theoretical calculation of boundary layers on ship hulls. Trans. N. E. Coast Inst. Eng. and Shippbuild, vol. 92, 1975, N 1.
95. **Taggart R., Magnusson E. F.** Mathematical derivation of destroyertype hulls.— J. Naval Engineers, vol. 79, 1967, N 1.
96. **Todd F. H.** Further Model Experiments on the Resistance of Mercantile Ship Forms — Cooster Vessel. TJNA, 1938.
97. **Webster W. G., Huang T. T.** Study of the boundary layer on Ship forms.— J. Ship. Res., vol. 14, 1970, N 3.
98. **Weinblum G.** Anwendung der Michelschen Widerstandstheorie. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesselschaft, 1930.
99. **Weinblum G.** Beitrag der Schiffstheorie zur Entwicklung des Schiffes.— Hansa, vol. 107, 1970.
100. **Wigley C.** The Effect of Viscosity on Wave Resistance.— Schiffstechnik, 1962, 46 Heft.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

ГЛАВА I. **ПРОЕКТИРОВАНИЕ УПРОЩЕННЫХ ОБВОДОВ СУДОВ С РО** 5

§ 1. Особенности хорошо обтекаемых, скуловых и упрощенных обводов . . . . . —

§ 2. Методы проектирования остроскуловых обводов судов с РО 12

§ 3. Методы аппроксимации обычных обводов развертывающимися поверхностями 26

§ 4. Оценка гидродинамических потерь и экономических преимуществ корпусов с упрощенными обводами . . 29

ГЛАВА II. **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБВОДОВ СУДОВ С РАЗВЕРТЫВАЮЩЕЙСЯ ОБШИВКОЙ БЕЗ ПОТЕРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА** 33

§ 5. Аналитическое исследование класса развертывающихся поверхностей . . . . . —

§ 6. Метод построения теоретического чертежа судна с РО 46

§ 7. Метод проектирования хорошо обтекаемых обводов судов с РО 53

§ 8. Результаты сравнительных модельных испытаний судов с РО 60

ГЛАВА III. **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБВОДОВ СУДОВ С РО НА ЭВМ** 76

§ 9. Аппроксимация линий теоретического чертежа . . . —

§ 10. Аналитическое задание поверхности корпуса с РО 86

§ 11. Согласование теоретического чертежа судна с РО на ЭВМ 96

§ 12. Расчет на ЭВМ кривых плавучести 107

§ 13. Особенности расчета остойчивости судов с РО на ЭВМ 114

ГЛАВА IV. **РАСЧЕТ СОСТАВЛЯЮЩИХ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ВЫБОР ОБВОДОВ СУДОВ С РО НА ЭВМ** 117

§ 14. Расчет волнового сопротивления судов с развертывающейся обшивкой . . . . . —

§ 15. Зависимость волнового сопротивления от коэффициентов уравнения поверхности корпуса судов с РО 128

§ 16. Расчет сопротивления трения судов с РО с учетом кривизны 149

ГЛАВА V. **ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА СУДОВ С РО** 164

§ 17. Построение развертки наружной обшивки судов с РО на ЭВМ . . . . . —

§ 18. Конструкция и набор корпуса судна с РО 181

§ 19. Технологические особенности постройки корпуса судна с РО 184

Заключение 187

Указатель литературы 188