Г962

А. М. ГУСЕВ

ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА ПУТЬ И УПРАВЛЯЕМОСТЬ СУДНА

АОС7114

БИБЛИОТЕКА
Новосибирского института
инженеров водного транспорта

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МОРСКОЙ ТРАНСПОРТ»
МОСКВА — 1954

Редактор *Ю. М. Крылов*
Рецензент *Л. К. Шар-Баронов*

Переплет художника *П. Б. Крайц*

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Водный транспорт — одна из важных отраслей народного хозяйства страны — не может развиваться без развития судостроения и совершенствования кораблевождения.

Требования практики определили задачи, стоящие перед исследователями в различных областях морских наук, и, в частности, указали, что необходимо исследовать влияние ветра на движение судна.

Всестороннее исследование этого влияния в практике кораблевождения позволит строить более совершенные суда, увеличить точность, безопасность и экономичность плавания.

За последние годы работа в области исследования влияния ветра на движение судна несколько продвинулась, причем приоритет разрешения основных разделов этой проблемы принадлежит советским ученым. Кроме трудов А. М. Гусева в этой области, необходимо указать на труды К. К. Федяевского, Ю. М. Крылова, Н. Н. Матусевича, в которых разрешалась частная задача: ветровой дрейф судна, движущегося прямолинейно с постоянной скоростью. Здесь мы не имеем возможности перечислить всех авторов, работавших в смежных областях, и авторов, чьи работы носили эмпирический характер. Материалы, собранные в этих работах, в значительной мере облегчили решение поставленной задачи.

Литература о влиянии ветра на движение судна пока еще крайне бедна. Две небольшие статьи, помещенные в Трудах Государственного океанографического института (серия V, вып. 8 и 9, 1946 г.), — это все, что издано непосредственно по данному вопросу.

Настоящая книга должна в какой-то мере заполнить существующий пробел в литературе. Малое число опубликованных работ указало на необходимость издать в настоящее время пособие, достаточно полно освещающее данный вопрос. Нельзя было ограничиться изложением только практических выводов.

Учитывая непрерывно растущий уровень технических знаний практиков-судоводителей, представлялось целесообразным кратко изложить также историю исследований, ход исследований, обобщить результаты экспериментальных и натурных наблюдений,

вскрыть физический смысл явления, указать пути дальнейших исследований для совершенствования полученных практических выводов. Такое пособие позволит практикам подходить к разрешению задачи с более глубоким знанием дела, а не механически выполнять готовые рекомендации. Кроме того, оно позволит привлечь внимание к творческой, новаторской работе, необходимой для дальнейшего всестороннего развития этой области исследований.

Желание сделать книгу доступной широкому кругу читателей привело к необходимости вести изложение материала, ориентируясь на специалиста со средним образованием. Только в небольшом разделе, касающемся общих уравнений движения судна, пришлось отойти от этой установки. Практические выводы изложены по возможности в более простой форме, с тем чтобы они были доступны судоводителям как большого, так и малого тоннажа. Эти выводы помещены в конце соответствующих разделов, чтобы избежать повторений, обязательных в случае выделения всех выводов в самостоятельную главу.

В книге по возможности использована вся известная нам литература по данному вопросу.

Исследование движения судна — одна из очень трудных задач гидроаэромеханики, так как в данном случае имеет место движение тела на границе раздела двух сред — воды и воздуха. Разобраться в задаче о влиянии ветра на движение судна без знания хотя бы основ гидроаэромеханики — затруднительно. Это привело к необходимости включить в книгу вспомогательную главу (I), в которой излагаются некоторые вопросы гидроаэромеханики.

Читатель, знакомый с основами гидроаэромеханики, может без ущерба опустить эту главу.

Задача по созданию предлагаемого пособия оказалась не легкой. Автор будет благодарен за критические отзывы о книге.

ВВЕДЕНИЕ

Действие ветра на судно во время его движения вызывает три явления: судно смещается, разворачивается и кренится. Два последних явления возникают вследствие того, что сила давления ветра на надводную часть судна обычно приложена не к центру тяжести и, следовательно, имеет кренящий и разворачивающий судно моменты. Смещение, т. е. дрейф, судна либо уменьшает скорость движения, либо увеличивает. Это зависит от направления ветра по отношению к судну. Разворот судна происходит в двух направлениях — по ветру и на ветер, т. е. судно может уваливать или приводиться к ветру. Это зависит от того, где приложена сила действия ветра: к носу или к корме от центра тяжести, что в свою очередь зависит от расположения надстройки. Там, где больше площадь парусности, там будет находиться и точка приложения силы давления ветра. Описанные явления возникают вследствие прямого действия ветра на судно.

Но ветер влияет на движение судна и косвенным образом: через волнение и ветровое течение. Действительно, вызываемое ветром течение смещает судно, что изменяет его абсолютную скорость,— скорость не относительно воды, а относительно грунта. С другой стороны, ветер вызывает волнение, которое также влияет на движение судна. Непрерывные удары волн в борт судна и волновое давление заставляют судно смещаться в определенную сторону. Это явление называется волновым дрейфом судна. Вследствие волнения возникает качка судна. Качка судна и волнение увеличивают сопротивление движению судна, а это приводит к снижению скорости его движения.

Одно из следствий действия ветра на судно, как уже говорилось выше, — дрейф судна. Словом «дрейф» очень часто даже специалисты обозначают совершенно различные явления или явления, происходящие от нескольких причин. Так, например, дрейфом нередко называют и движение вмерзшего в лед судна, и движение его под действием ветра или течения с застопоренными машинами, и отклонение судна на ходу от линии заданного курса под действием одной из этих же причин или суммарного действия их. При этом часто не различают и того, каким течением сносится судно: ветровым или течением иного происхождения, не связанным с действием ветра.

Для внесения ясности в этот вопрос условимся обозначать словом «дрейф» одно совершенно определенное явление, а именно: смещение судна или любого другого плавающего предмета под действием ветра, давящего на его надводную поверхность.

В настоящей книге основное внимание будет уделено результатам изучения дрейфа судна в движении и с остановленными машинами — «на стопе» и разворота судна под действием ветра, приводящего к неравномерности рыскания, а в определенных условиях и к потере управляемости. Кроме изложения результатов изучения этих действий ветра, будут даны практические советы для учета этих явлений в условиях плавания.

Вопрос о ветровом крене в обычных условиях плавания самоходного судна большого практического значения не имеет. Исследование качки судна — самостоятельная область исследований, и в настоящей книге она не будет затронута. Снижение скорости движения при волнении имеет практическое значение. Теоретическое изучение этого вопроса очень сложно, а на практике снижение скорости весьма просто и достаточно точно учитывается по показаниям лага. Краткое описание этих явлений будет дано в соответствующих разделах книги.

Смещение судна ветровым течением имеет большое значение в практических вопросах судовождения. Особенно это касается глубокосидящих судов с малоразвитыми надстройками и низким бортом.

Смещение таких судов ветровым течением может оказаться бóльшим, чем дрейф. Следовательно, в определенных условиях снос судна дрейфовым течением нельзя не учитывать. При этом можно считать, что судно сносится течением со скоростью, равной скорости течения.

В настоящее время существует теория дрейфовых течений, объясняющая многие особенности их, но практический расчет все же делается пока по эмпирическим формулам, составленным на основании обработки материала наблюдений в море. Задача о дрейфовых течениях не связана непосредственно с судном, имеет самостоятельное значение и поэтому в этой книге рассматриваться не будет. Однако для практических нужд штурманов в соответствующем разделе будут приведены формулы для приближенного расчета течения по известным значениям скорости и направления ветра.

Качка мало влияет на дрейф судна. Влияние ее на скорость движения учитывается показаниями лага. Это явление имеет самостоятельное значение и подробно разработано в трудах советских ученых. Вопросы качки в данной книге не затрагиваются.

История исследования дрейфа судна тесно связана с историей развития кораблестроения. В парусном флоте движителем судна были паруса, и само явление дрейфа использовалось для передвижения. При этом сила давления ветра на паруса использовалась для передвижения, а момент этой силы — для разворотов судна. Борьба велась за отыскание средств и способов наивыгоднейшего

использования силы давления ветра и ее момента для перемещения в желаемом направлении при любых курсовых углах ветра и улучшения поворотливости судна. В этом стремлении усовершенствовалось парусное вооружение, увеличивалась подводная часть судна за счет увеличения площади киля. Угол дрейфа таких судов, т. е. угол между направлением истинного движения и курсом судна, возникающий вследствие бокового смещения судна под действием ветра, был велик и исчислялся десятками градусов.

Так как углы дрейфа парусных судов были большие, то не представляло особых затруднений определять их для внесения поправки к курсу судна при счислении. Способ определения угла дрейфа по отклонению кильватерной струи удовлетворял в то время практиков, так как и судовождение не отличалось тогда большой точностью.

Паровые суда, вытеснившие со временем парусный флот, были, как правило, глубокосидящими с небольшой относительно площадью надводной части. Влияние ветра на движение таких судов резко снизилось, и дрейф их стал настолько мал, что его при существовавшей в то время точности плавания не имело смысла учитывать. О дрейфе на некоторое время забыли. Только спустя значительный промежуток времени, в годы последних двух десятилетий, вопрос о дрейфе судна вновь появился на повестке дня.

Конструкция судна непрерывно менялась, а стремление увеличить скорость привело к тому, что современные суда стали относительно мелкосидящими и плоскодонными, в то время как надводная часть их мало изменилась. Суда стали вновь более подвергнуты влиянию ветра, и дрейф их стал вновь значительным.

Наряду с этим постепенно увеличивалась и точность судовождения. Потребовался более точный учет дрейфа. Это вновь вызвало интерес к изучению дрейфа. Но так как угол дрейфа современных судов все же значительно меньше углов дрейфа парусников, то потребовались и новые, более точные способы их определения. Существовавший ранее способ определения дрейфа по отклонению кильватерной струи оказался непригодным из-за малой точности. Оказалось невозможным довольствоваться и поправками на угол дрейфа, вносимыми на глаз на основании опыта штурмана, долго плававшего на данном судне. Такие поправки, естественно, недостаточно точны и не всегда надежны. Кроме того, следует помнить, что такой опыт появляется лишь с годами при длительном плавании на одном судне. Такой опыт трудно передать и невозможно совершенствовать.

До последнего времени не было работ, в которых давались бы физические объяснения причин дрейфа, асимметричного ветрового рыскания и формулы для вычисления величины смещения судна, вызванного действием ветра. Но были попытки создать на основании обобщения собранных во время плаваний наблюдений приближенные формулы для расчета суммарного сноса судна ветром и течением. Такие попытки неизбежно приводили к неудачам, так

как невозможно в одной формуле объединить несколько явлений, протекающих по различным физическим законам.

С появлением парового флота внимание исследователей в этой области в первое время было направлено в основном на выяснение влияния ветра и вызванного им волнения на снижение скорости движения судна. Среди работ в этой области можно назвать работы и теоретического характера, и экспериментального, и натурного в естественных условиях плавания.

Детальные исследования дрейфа самоходных судов впервые были проведены в СССР. Начало этих работ относится к 1953 году. Исследования эти складывались из специально организованных наблюдений, проводимых на различных судах, сбора и обобщения материала наблюдений штурманов во время различных плаваний, лабораторных экспериментов и теоретических обобщений.

Наблюдения, проведенные на судах, позволили углубить наши знания о влиянии ветра на движение судна. Была обнаружена причина давно известного, но необъяснимого на первый взгляд явления — дрейфа судна «на ветер». Причина дрейфа на ветер кроется в том, что ветер и дрейф, создавая постоянно действующий на судно вращающий момент, заставляют его рыскать несимметрично, т. е. отклоняться от курса в сторону действия разворачивающего момента на больший угол и на больший промежуток времени. А так как при определенных условиях судно под действием ветра стремится развернуться на ветер, то неравномерность рыскания может привести к результирующему смещению судна на ветер. Это послужило толчком для изучения ветрового рыскания судна, потери управляемости судна при ветре и рыскливости судна, как явления, сопутствующего дрейфу и в значительной мере зависящего от ветра и дрейфа. В результате всех работ по исследованию дрейфа и рыскания, кроме всего, были сконструированы приборы для определения угла дрейфа и регистрации ухода судна с линии заданного курса вследствие дрейфа и асимметричного рыскания.

Дрейф судна, как известно, можно характеризовать либо скоростью, т. е. скоростью смещения судна под действием ветра, либо углом между курсом и истинным направлением движения судна. Если вторая характеристика — угол дрейфа более удобен для учета влияния ветра на движущемся судне, то первая, и только первая пригодна для учета дрейфа судна с остановленными машинами.

Знать эти две характеристики дрейфа судна штурману необходимо при определении по счислению и при определении места судна, дрейфующего с остановленными машинами — «на стопе», когда знание скорости и направления дрейфа является иногда единственным средством для нахождения положения судна. Знать эти характеристики штурману необходимо и для других целей, а именно: для вычисления поправки на дрейф к избранному курсу и для предвычисления места судна, дрейфующего «на стопе».

Наряду со способами определения места по счислению имеются и другие способы — абсолютные, т. е. способы, дающие возможность определять место судна не относительно подвижной воды, что имеет место при счислении, а относительно некоторой неподвижной точки на суше. В таких случаях знание дрейфа судна не требуется. Определение места судна по береговым предметам — обсервация, относящаяся к абсолютным методам, отличается большой точностью. Но этот способ пригоден лишь вблизи берегов и ограничен видимостью. Уже небольшой туман снижает точность и нередко исключает возможность применения этого способа. Астрономическое определение места судна даже при большом опыте штурмана дает точность в одну милю. Но такая точность далеко не везде является достаточной. Кроме того, астрономическое определение места судна значительно ограничивается видимостью и облачностью.

Определение места судна радиометодами свободно от целого ряда ограничений (видимость, в какой-то мере расстояние). Большие достижения в области радиолокации уже сейчас используются для нужд судовождения, а в дальнейшем открывают огромные перспективы для развития точных методов радионавигации. Крупным недостатком определения места радиометодами судна является невозможность автономных, не зависящих от специальных установок на берегу, определений.

Это, конечно, не значит, что некоторые из описанных способов непригодны в практике судовождения. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, и в определенной обстановке они могут заменять или дополнять друг друга. Но это в свою очередь подтверждает значимость, казалось бы, теперь примитивного способа определения места судна по счислению. Очевидно, что этот автономный метод, не ограниченный расстоянием и условиями видимости, сохранит свое значение и в будущем, а следовательно, сохранится и необходимость определения дрейфа, не говоря уже о других сторонах влияния ветра на движение судна. Ко всему сказанному следует добавить, что вычисление поправок на дрейф к курсу судна и предвычисление положения судна, дрейфующего с остановленными машинами, останутся необходимыми и в будущем независимо от того, каким способом будет определяться место судна.

Зададимся теперь следующим вопросом: насколько необходимо учитывать влияние, оказываемое ветром на судно? На этот вопрос легко ответить, сопоставив точность, с которой ведется прокладка и выдерживается курс судна по приборам, с величиной значения поправок на влияние ветра.

Современные приборы позволяют, как известно, учитывать курс судна с точностью до десятой доли градуса. С такой же примерно точностью определяется и поправка на девиацию. Какова же величина поправок на ветер? Оказывается, что эти поправки уже при незначительных скоростях ветра превышают указанную величину точности, с которой ведется счисление. Так, например, по тща-

тельным специально проведенным наблюдениям во время плавания на различных судах разного тоннажа эти поправки имели следующие значения: при скоростях движения судна, изменяющихся в пределах от 4 до 12 узлов, и скоростях ветра 2—8 *м/сек* с курсовыми углами 30—90° угол дрейфа изменялся в пределах от 0,7 до 6,2°; вычисленная для этих же условий поправка на зарыскивание изменялась в пределах от 0,2 до 1°, наконец, поверхностное ветровое течение, замеренное вертушкой в районе наблюдений, в зависимости от направления его по отношению к курсу сносило суда на величины, характеризующиеся углами от 0,5 до 2°.

Уход судна с курса вследствие зарыскивания, вызванного ветром, при определенных условиях может достигать и значительно бóльших величин. Так, например, во время одного наблюдения при ветре бакштаг со скоростью 5 *м/сек* судно упорно смещалось на ветер. Следовательно, уход судна с линии заданного курса вследствие неравномерного рыскания превышал величину собственно дрейфа, так как иначе судно смещалось бы по ветру. Подсчитанный уход с курса вследствие зарыскивания оказался в упомянутом случае равным 2,5°. Такие случаи подтверждаются и опытом штурманов. Основываясь на этом опыте, штурман при определенных для своего судна направлениях ветра (обычно бакштаг) не вносит поправку на дрейф, считая, что она будет компенсирована стремлением судна привестись к ветру.

Итак, рассматривая три поправки на влияние ветра: собственно дрейф, уход с курса вследствие ветрового зарыскивания, снос судна ветровым течением, приходим к убеждению, что все они даже при незначительном ветре превышают величину существующей точности определения места судна счислением. Значение всех этих поправок имеет один и тот же порядок, они измеряются единицами и десятыми долями градуса. Следовательно, ни одной из этих поправок пренебрегать нельзя.

Поскольку современная прокладка при плавании ведется с точностью 0,1° и с этой же точностью вносятся поправки на девиацию и склонение, очевидно, что и поправка на влияние ветра должна определяться с такой же точностью. Этого, конечно, нельзя достичь старыми способами определения угла дрейфа. К сожалению, такую точность пока не обеспечивают и новые, более совершенные способы, хотя, правда, она близка к требуемой.

При тщательном соблюдении всех правил определения угла дрейфа новые расчетные способы позволят определять эти углы с точностью 0,5—0,7°.

Поправки на влияние ветра могут иметь различные знаки (плюс или минус), т. е. они прибавляются к значению курса судна или вычитаются. Знак поправки на дрейф будет зависеть от того, в какую сторону смещается судно: в сторону правого или левого борта.

В первом случае поправку на дрейф надо вводить со знаком минус, т. е. ее надо вычитать из заданного курса; во втором слу-

чае — со знаком плюс, т. е. надо увеличивать заданный курс на величину поправки (рис. 1).

Вводить поправку на уход с курса вследствие несимметричного ветрового рыскания и сноса ветровым течением несколько сложнее.

Дело в том, что если направление собственно дрейфа всегда совпадает приблизительно с направлением ветра, т. е. ветер с любым курсовым углом одного борта вызывает смещение судна в

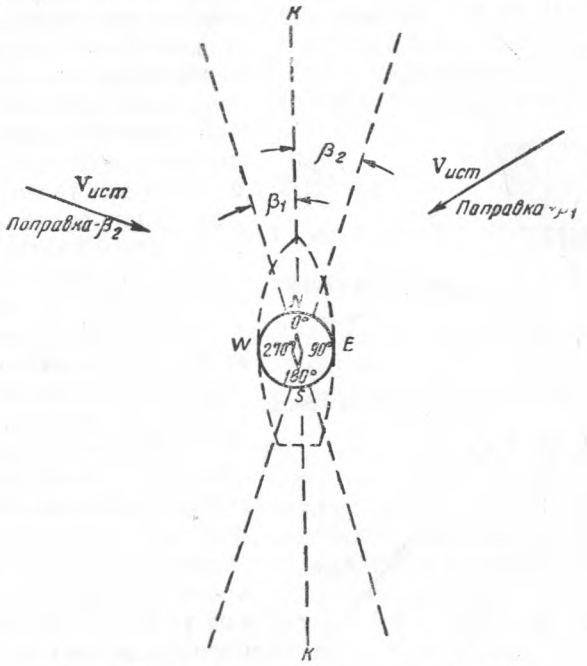


Рис. 1. Введение поправки на дрейф судна

сторону другого борта, то уход с курса и снос течением могут быть при этом и в сторону наветренного борта. Уход с курса вследствие рыскания объясняется способностью судна в одних случаях приводиться к ветру, в других случаях уваливать. В случае сноса это объясняется тем, что дрейфовое течение на поверхности по своему направлению, как правило, не совпадает с направлением ветра, а отклоняется вправо от него, что и может при определенных условиях вызвать снос судна на ветер (рис. 2). На этом рисунке приняты следующие обозначения для поправок к курсу в угловом измерении: β — поправка на ветровой дрейф, β' — поправка на асимметричное рыскание, β'' — поправка на течение. Индексы *I, II* указывают, к каким случаям действия ветра и течения эти поправки относятся.

Таким образом, если направление ухода с курса вследствие ветрового зарыскивания и направление сноса течением совпадают с направлением дрейфа, то обе эти поправки вносятся с тем же знаком, что и поправка на дрейф. В том же случае, когда направление сноса и ухода с курса, с одной стороны, и направление дрейфа, с другой — не совпадают, поправки на снос и уход с курса должны иметь знак, противоположный знаку поправки на дрейф.

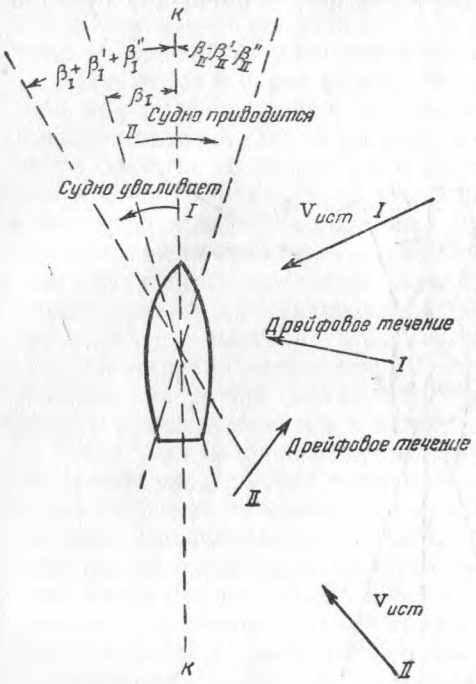


Рис. 2. Введение поправок на дрейф, дрейфовое течение и рыскание судна

Кроме дрейфовых течений, судно подвержено действию градиентных течений, приливо-отливных течений и течений другого происхождения. Как правило, эти течения имеют незначительные скорости. В отдельных же случаях эти течения, особенно приливо-отливные, в определенные моменты могут достигать больших скоростей (например, приливо-отливные течения в горле Белого моря). Тогда, зная скорость и направление течений по атласам и картам, следует поступать так же, как при внесении поправки на течение ветрового происхождения.

Так как описание этих течений выходит за рамки данной книги, — в дальнейшем изложении мы на них останавливаться не будем.

Прямое и косвенное влияние ветра неодинаково на суда различного тоннажа. Это различие в действии объясняется не только тем, что суда малого тоннажа, как правило, имеют отношение площади надводной части к площади подводной части больше, чем у судов большого тоннажа, что делает малые суда более подверженными действию ветра. Это различие определяется также и влиянием волнения.

В тех случаях, когда размеры волны равны размерам судна или превышают их, что чаще случается для судов малого тоннажа, судно совершает значительные вертикальные перемещения и режим действия ветра становится непостоянным, так как судно находится то на гребне, то у подошвы волны. Это усложняет характер дрейфа, делая его непостоянным. Усложнение возникает и за счет того, что волновым дрейфом, т. е. смещением судна, проис-

ходящим вследствие давления волны на один борт, в таких случаях не всегда можно пренебрегать. Точно так же волнение усложняет и характер рыскания судна малого тоннажа. Если у судов большого тоннажа рыскливость в значительной мере определяется вращающим моментом силы давления ветра, то у судов малого тоннажа основная роль может принадлежать волнению. Волнение, направленное под любым углом в скулу такого судна, вызывает нарушение правильности рыскания и резко увеличивает его.

Для того чтобы иметь возможность с достаточной точностью определять поправки, учитывающие влияние ветра на движение судна, потребуется провести немало исследований, а на практике на судах придется производить новые дополнительные наблюдения, связанные иногда с довольно сложными маневрами судна, и устанавливать новые приборы.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ГИДРОАЭРОМЕХАНИКИ

§ 1. ПРЕДМЕТ ГИДРОАЭРОМЕХАНИКИ

1. Гидроаэромеханикой называют науку, занимающуюся исследованием законов равновесия, движения газов и жидкостей и взаимодействия их с телами, находящимися в состоянии покоя или в движении.

Гидроаэромеханика не изучает движение отдельных молекул жидкостей и газов, а рассматривает жидкости и газы как сплошную среду, состоящую из бесконечного числа однородных частиц, непрерывно заполняющих данный объем. Поэтому, говоря о взаимодействии жидкости и газов с телами, мы в данном случае имеем в виду тела, размеры которых достаточно велики.

Принципиальным отличием жидкостей и газов от твердых тел является их способность растекаться в значительных пределах и отсутствие трения покоя, т. е. способность начать двигаться под действием сколь угодно малой силы. Эти принципиальные особенности жидкостей и газов не позволяют применять при исследовании их движения законов механики твердых тел.

Наряду с отмеченным общим свойством жидкостей и газов между ними имеются и существенные различия. Основное из них — сжимаемость. Сколько бы мы ни увеличивали давление, стремясь сжать данный объем жидкости, он останется практически неизменным (при давлении в 1000 *атм* объем жидкости изменяется лишь на 5% своей первоначальной величины). Наоборот, газы способны изменить свой объем уже при незначительном давлении и могут быть сжаты до очень малого объема.

Если газ поместить в некоторый сосуд, то он заполнит весь его объем, при этом давление газа соответственно изменится. Жидкость, помещенная в сосуд, заполняет лишь часть его и образует свободную поверхность.

Движения жидкостей и газов имеют очень много общего, и поэтому их обычно изучают совместно, объединяя в одну область исследований — гидроаэромеханику. Но такое объединение допустимо лишь в определенных пределах, а именно: пока можно считать газы также несжимаемыми, как и жидкости. Такое допущение можно принимать при условии умеренных скоростей движения газов и при умеренном распространении движущегося газа по высоте. Для характеристики применимости этого допущения можно привести такие цифры. При движении слоя воздуха толщиной 100 *м* со скоростью до 50 *м/сек* изменение объема при обычной температуре не превышает 1%. Следовательно, для таких условий движения воздух можно считать несжимаемым. При скоростях движения 150 *м/сек* изменение объема достигает 10%, а при скоростях движения, близких к скорости звука и превышающих 300 *м/сек*, объем изменяется на еще более значительную величину. Вот почему исследования движений в газах со скоростями, близкими к звуковым, обособлены в специальный раздел — газовую динамику.

Исходя из того, что движение жидкости возникает от приложения сколь угодно малой силы, предложено такое определение жидкости: жидкость есть тело, в котором в состоянии равновесия всякое сопротивление деформации, т. е. изменению формы, равно нулю. Это определение справедливо и для газов.

Однако, коль скоро движение началось, в жидкости возникает сопротивление этому движению. Эта характеристика жидкости называется вязкостью.

Вязкость разных жидкостей и газов различна и зависит от внешних условий, в частности от температуры.

При теоретическом решении ряда задач гидроаэромеханики вязкостью и сжимаемостью жидкости или газа пренебрегают. Такую условную жидкость или газ называют идеальными.

В гидроаэромеханике часто слово «жидкость» применяется как собирательное понятие, при этом имеют в виду и жидкости и газы. Так поступим и мы при дальнейшем изложении материала, когда будем касаться общих для жидкостей и газов вопросов.

2. Гидроаэромеханика подразделяется на теоретическую и экспериментальную. Теоретические исследования в силу сложности движений жидкости имеют дело по существу не с самим явлением, а с его физической моделью, так как приходится итти на ряд допущений, т. е. учитывать лишь основные факторы, определяющие то или иное движение, и отбрасывать второстепенные. Теоретические исследования, опираясь на основной закон явления, позволяют предвидеть характер его изменения, обобщить однородные явления и дать способы расчета явления, необходимые для практики.

Сложность явлений, изучаемых гидроаэромеханикой, не позволила теории разрешить еще целый ряд важнейших задач. Этим объясняется широкое развитие в гидроаэромеханике экспериментального метода исследований.

Экспериментальным, опытным, путем в натуре или лаборатории явление можно исследовать во всем его сложном виде. Теорией при этом пользуются для наиболее правильного выбора пути опытных исследований или для обобщения полученных результатов наблюдений.

Таким образом, теория и опыт как два метода идут рука об руку в процессе исследования.

При экспериментальных исследованиях иногда удобнее и целесообразнее исследовать явление не в целом, а по частям. При правильной постановке эксперимента это иногда оказывается допустимым. Так, например, при исследовании движения судна сопротивление воды и воздуха изучается раздельно. Раздельно определяются и две составляющие общего сопротивления воды движению судна: волновое сопротивление и сопротивление остаточное.

При определении общего сопротивления движению судна сопротивления корпуса, крупных и мелких надстроек, такелажа и выступающих частей ниже ватерлинии рассчитывают раздельно и затем суммируют. Иногда отдельно от корпуса судна исследуется и работа органа управления — руля.

Сложность проведения экспериментальных исследований в натуре, с одной стороны, и большие размеры тел, движущихся в воде и воздухе (корабли, самолеты), с другой — заставляют исследовать их модели, размеры которых значительно меньше натуральных. Но не всякая модель во всем подобна натуре. Поэтому в экспериментальной гидроаэромеханике важное место занимает раздел, именуемый теорией подобия. Именно в этом разделе мы находим ответ на вопрос, какой должна быть модель, как поставить эксперимент, чтобы полученные результаты можно было перенести на натуру.

Огромное значение этого раздела станет очевидным, если мы вспомним большую роль экспериментальной гидроаэромеханики в решении ряда задач и доведении их до практических выводов, а также несравненное удобство, дешевизну, а иногда и единственную возможность изучения того или иного явления путем моделирования.

3. Люди с древнейших времен интересовались вопросами движения жидкости и движения различных предметов в воде и в воздухе. Этот интерес обуславливался их практической деятельностью, направленной на покорение сил природы. Из истории известно, что первые наблюдения за режимом рек проводились более 4 тысяч лет назад.

Из истории также известно, что целый ряд практических вопросов механики жидкости разрешали строители гидротехнических сооружений в России — «водные люди» — еще в VIII веке.

За 250 лет до нашего летосчисления, т. е. более чем 2200 лет назад, был написан первый крупный труд по механике жидкого тела — трактат греческого математика и механика Архимеда «О плавающих телах».

Вероятно, что и до этого были работы, обобщавшие наблюдения, но сведения о них до нас не дошли.

В XV веке нашей эры появился труд по механике жидкости «О движении и измерении воды», написанный великим художником и ученым Леонардо да Винчи (1452—1519).

В XVI и XVII веках появились работы Галилея (1564—1642) об основных законах плавания тел и работа Паскаля (1623—1662) о давлении, действующем на тело, погруженное в жидкость. Ньютон (1642—1727) открыл закон о квадратичной зависимости сопротивления воды, оказываемого движению тела, от скорости этого движения.

Все же это были хоть и крупные, но отдельные работы. Наука о механике жидкости как самостоятельный раздел была создана в первой половине XVIII века в России. Основоположниками ее были действительные члены Российской Академии наук М. В. Ломоносов (1711—1765), Л. Эйлер (1707—1783) и Д. Бернулли (1700—1782).

Русские ученые разработали основы гидроаэромеханики, что и предопределило дальнейшее развитие ее, осуществленное в последующем в трудах М. В. Остроградского, Н. П. Петрова, Н. Е. Жуковского, С. А. Чаплыгина и А. Н. Крылова. Большой вклад в развитие учения о жидкостях и газах сделал Д. И. Менделеев.

Советские ученые, сохраняя лучшие традиции своих великих предшественников, подняли гидроаэромеханику еще на более высокий уровень развития, поставив ее на первое место в мире.

§ 2. ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И СОПРОТИВЛЕНИЕ, ОКАЗЫВАЕМОЕ ЖИДКОСТЯМИ ДВИЖЕНИЮ ТЕЛ

1. Под действием сил в подвижных и неподвижных жидкостях возникают напряжения. Силами, действующими на жидкость, являются сила тяжести, сила давления (например, атмосферное давление), сила трения, молекулярная сила и др.

Напряжением называется равнодействующая всех внутренних сил в жидкости. В отличие от массовых сил, например силы тяжести, напряжение, давление и трение являются силами поверхностными. Эти силы относятся к некоторой площади и измеряются в килограммах на квадратный метр ($кг/м^2$). Напряжение внутри неподвижной жидкости называют гидростатическим давлением, а внутри движущейся жидкости различают гидростатическое и гидродинамическое давления.

2. Гидростатическое давление учитывает только силы давления частиц друг на друга и обуславливается действием силы тяжести. Оно определяется весом столба жидкости, находящегося над уровнем, где производится измерение.

Жидкость обычно характеризуется объемным весом γ или массовой плотностью ρ.

Объемным весом называют вес единицы объема жидкости:

$$\gamma = \frac{G}{V} \; кг/м^3, \tag{1}$$

где:

G — вес тела в *кг*;

V — объем тела в $м^3$.

$G=Mg$, где g — ускорение силы тяжести в $м/сек^2$.

Массовой плотностью жидкости называется отношение массы тела к его объему:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{G}{gV} \; кг\,сек^2/м^4. \tag{2}$$

Для дистиллированной воды при температуре 4° объемный вес равен 1000 $кг/м^3$. Отсюда плотность дистиллированной воды, если принять $g=9{,}81$ $м/сек^2$, будет равна $\rho_0=101{,}9$ $кг\,сек^2/м^4$.

Плотность морской воды зависит, кроме температуры, также и от солености.

Жидкость, плотность которой одинакова по всей толще ее, называется однородной; жидкость с переменной плотностью — неоднородной.

Из сказанного становится очевидным, что гидростатическое давление на некоторой глубине жидкости зависит от плотности и характера распределения плотности по глубине.

Плотность воды в силу ее малой сжимаемости незначительно зависит от температуры. Воздух сравнительно легко поддается сжатию, и поэтому плотность его следует определять по следующей формуле:

$$\rho = 0{,}125 \frac{P}{760} \frac{273+15}{273+t}, \tag{3}$$

где:

P — давление воздуха в *мм* рт. ст.;

t — температура.

Итак, давлением называется сила, действующая по нормали на единицу площади. Одновременно давление является мерой напряжения внутри жидкости. Каковы же единицы измерения давления? Нормальное давление всей толщи воздуха, находящегося над землей, уравновешивается 760 *мм* рт. ст. Такое давление принято называть атмосферой. В переводе на килограммы 1 *атм* равна 1,0332 $кг/см^2$. В отличие от этой единицы давления, именуемой физической атмосферой, в технике применяется техническая атмосфера, равная 1 $кг/см^2$. Часто величину давления измеряют в миллиметрах ртутного или водяного столба. 1 *мм* рт. ст. соответствует давлению 13,6 $кг/см^2$, 1 *мм* вод. ст.—1 $кг/см^2$. Следовательно, одна техническая атмосфера соответствует давлению водяного столба высотой 10 *м*.

БИБЛИОТЕКА Новосибирского института

Величина атмосферного давления изменяется от высоты над уровнем моря; она также зависит от характеристики массы воздуха над данной точкой на земной поверхности, т. е. от температуры и влажности воздуха.

Гидростатическое давление характеризуется некоторыми свойствами. Если поместить какое-нибудь тело в жидкость, то давление в любой его точке будет перпендикулярно поверхности этого тела в данной точке и направлено внутрь объема его.

3. Рассмотрим напряжения, возникающие в движущейся жидкости. Если в движущейся жидкости поместить перпендикулярно направлению ее движения неподвижное препятствие в виде площадок, то движение жидкости изменится и скорость уменьшится. Кинетическая энергия движущейся жидкости проявит себя в виде давления на эту площадку, которое называется динамическим.

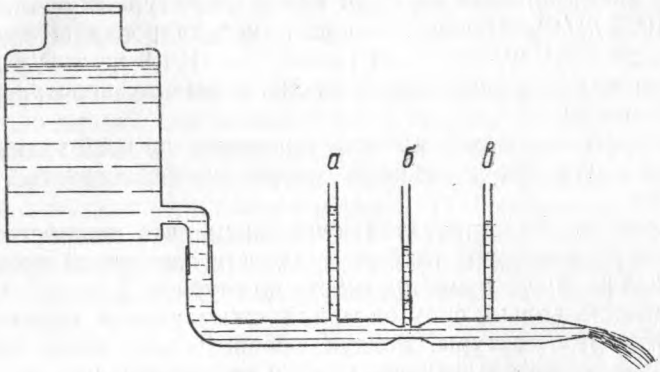


Рис. 3. Давление в движущейся жидкости

Представим себе теперь, что жидкость движется в трубе с переменным сечением, как показано на рис. 3. Будем считать жидкость несжимаемой и исследуем давление, которое она оказывает на стенки трубы. Давление это может быть оценено высотой столба жидкости в трубках *а, б, в,* соединяющихся с жидкостью, текущей по основной трубе. Давление на стенки трубы в узкой части будет меньше, чем в широкой части трубы. Если бы мы при этом замерили каким-нибудь путем скорость в различных местах трубы, то определили бы, что скорость в местах с узким сечением больше, чем в местах, где сечение трубы больше.

Хотя исследуемое давление и связано с движением жидкости, все же его принято называть статическим. Следовательно, статическое давление уменьшается в тех местах движущейся жидкости, где скорость больше, и увеличивается в местах с пониженной скоростью. Эта особенность зависимости давления от скорости является весьма важной и находит широкое применение при решении прикладных задач гидроаэромеханики.

4. Давление, как уже говорилось, можно оценить величиной столба какой-либо жидкости, уравновешивающего давление в данной точке. Таким образом U-образная трубка, заполненная жидкостью, служит образцом простейшего манометра — прибора для измерения давления—и в различных видоизменениях является основной частью многих манометров. Если соединить U-образную трубку одним концом с объемом, в котором измеряется давление, по разности отсчетов в двух коленах и известной плотности жидкости в манометре можно определить искомое давление (рис. 4, *а*). При этом необходимо, чтобы плотность жидкости в манометре значительно превышала плотность жидкости, давление которой измеряется. Для увеличения точности жидкостного манометра одно из колен трубки делают наклонным. Тогда одно и то же изменение давления вызовет большее перемещение жидкости в наклоненном колене трубки манометра (рис. 4, *б*).

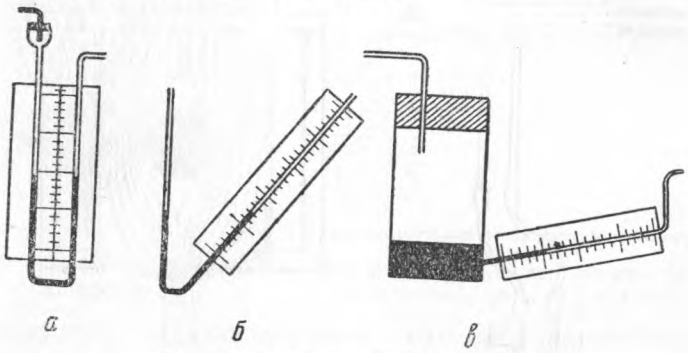


Рис. 4. Различные типы манометров

Неудобства, связанные с необходимостью отмечать при наблюдениях уровень в двух коленах трубки, привели к реконструкции ее. Колена трубки стали изготовлять различного сечения, так чтобы изменением уровня в одном из них можно было пренебречь и считать его за нулевой (рис. 4, *в*). При измерении небольших давлений в таких манометрах используется обычно спирт, а при измерении значительных давлений — ртуть.

Для измерения динамического давления или, как его иначе называют, скоростного напора существуют специальные трубки.

Такая трубка с присоединенным к ней манометром изображена на рис. 5.

Если поместить трубку в поток со скоростью V, то на отверстие A будет действовать полное давление, т. е. статическое и динамическое. Если бы правое колено манометрической трубки M было открыто, то величина этого давления характеризовалась бы некоторой разностью уровней. На отверстия $Б$ и $Б_1$ действует только статическое давление. Если теперь соединить трубку $б$ с правым коленом манометра, то разность уровней в двух коленах

уменьшится на величину, соответствующую величине статического давления. Разность уровней h будет характеризовать динамическое давление или скоростной напор. Такая трубка часто используется для измерения скорости потока или скорости движения тела в жидкости.

5. Рассмотрим более подробно движение жидкостей. Выясним прежде всего, каковы будут те траектории, по которым движутся частицы жидкости в трубах при обтекании какого-либо тела, находящегося в потоке. Нас будут интересовать только установившиеся течения жидкостей, т. е. такие течения, в которых скорости (в разных точках потока) не изменяются во времени.

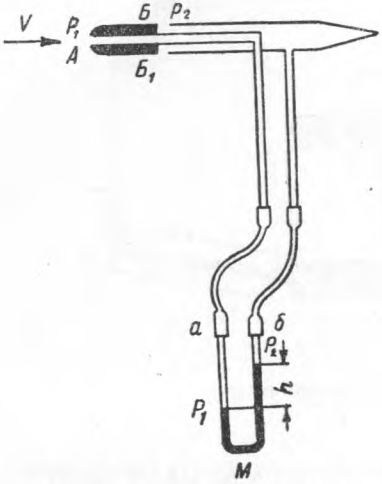


Рис. 5. Прибор для определения скоростного напора

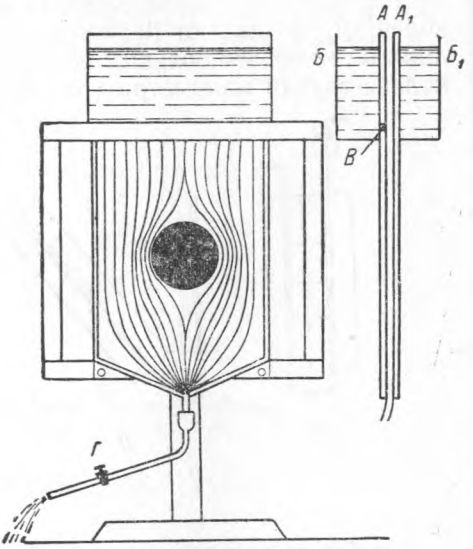


Рис. 6. Прибор для демонстрации структуры течения жидкости

Для наблюдения траекторий движения частиц воды пользуются прибором, изображенным на рис. 6. Прибор представляет собой два стекла AA_1 в оправе, помещенные близко друг от друга, к верхним частям которых приделаны сосуды с водой $ББ_1$. Сосуды в нижней части соединяются с пространством между стеклами отверстиями B, причем отверстия эти размещены не друг против друга, а в шахматном порядке. Нижние концы стекол срезаны под острым углом. Вода, протекающая между стеклами, отводится через шланг $Г$. В один из сосудов наливается чистая вода, в другой — раствор марганцевокислого калия. Уровень раствора должен быть несколько ниже уровня чистой воды.

Если открыть зажим шланга $Г$ и предоставить жидкостям возможность стекать из сосудов между стеклами, то по истечении некоторого времени, когда уровни в двух сосудах сравняются, будет

наблюдаться картина, изображенная на рис. 6. Как видим, в начале траектории частицы жидкости будут иметь вид параллельных линий; встретив препятствие в виде круглого диска, они плавно обогнут его и затем постепенно начнут сближаться по мере подхода к выходному отверстию.

Если на пути потока поместить под некоторым углом пластину, то будет наблюдаться картина, изображенная на рис. 7.

Видимые струйки показывают направление движения частиц жидкости. Такое движение, когда отдельные струи идут, не перемешиваясь, называется ламинарным или слоистым течением.

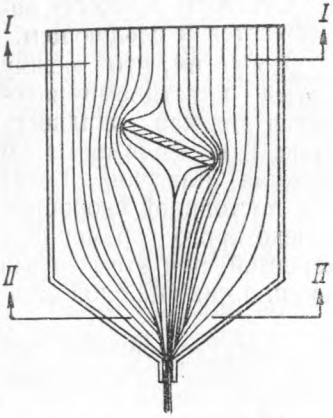


Рис. 7. Обтекание пластины жидкостью

6. При установившемся течении масса жидкости, проходящая между стеклами прибора в различных его сечениях (*I—I*, *II—II*), не может

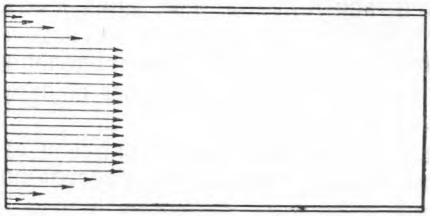


Рис. 8. Распределение скоростей течения вязкой жидкости в трубе

ни уменьшаться, ни накапливаться, иначе не будет соблюдаться постоянство по времени скоростей движения в различных точках.

Масса жидкости, прошедшая за единицу времени через сечение *I—I*, равна площади сечения *I—I* F_1, умноженной на скорость течения v_1 и плотность ρ, т. е.

$$m_1 = F_1 v_1 \rho_1.$$

Соответственно для сечения *II—II* можно записать

$$m_2 = F_2 v_2 \rho_2.$$

По условию установившегося течения $m_1 = m_2$, следовательно,

$$F_1 v_1 \rho_1 = F_2 v_2 \rho_2. \qquad (4)$$

Для несжимаемой жидкости, когда $\rho_1 = \rho_2$, будем иметь следующее равенство:

$$F_1 v_1 = F_2 v_2, \qquad (5)$$

которое будет справедливо и для неустановившегося течения.

Уравнения (4) и (5) называются уравнениями неразрывности. Они показывают, что скорость течения в приборе (см. рис. 7) или вообще в трубе с переменным сечением будет больше там, где площадь сечения меньше. В таких местах и траектории движения частиц в силу неразрывности жидкости сгущаются.

7. Если бы жидкость была идеальной, то скорость движения ее по всему сечению потока была бы одинаковой. При движении вязкой жидкости слой, прилегающий непосредственно к стенке, прилипает к ней и в жидкости устанавливается определенное распределение скоростей. На рис. 8 показано распределение скоростей при движении жидкости в трубе. Слой жидкости от стенки до того уровня, величина скорости от которого становится неизменной, называют пограничным слоем. Аналогичный слой жидкости возникает и при обтекании тела потоком вязкой жидкости *аа* (рис. 9).

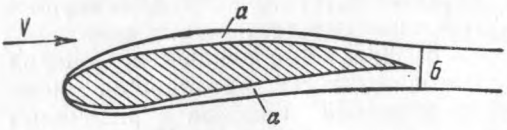


Рис. 9. Пограничный слой у профиля крыла

Сущность вязкости заключается в следующем.

Допустим, что между двумя пластинами находится вязкая жидкость (рис. 10). Если при этом нижняя пластина будет находиться в покое, а верхняя двигаться с постоянной скоростью v, то вследствие вязкости по истечении некоторого времени в жидкости установится распределение скоростей, при этом самый верхний слой будет двигаться со скоростью v, а нижний слой останется неподвижным.

Промежуточные слои, скользя друг по другу, приобретут скорости, пропорциональные расстоянию от неподвижной пластины. Таким образом, скорость слоя, находящегося от нижней пластины на расстоянии y, будет равна

$$u=v\frac{y}{a}, \qquad (6)$$

где a — расстояние между пластинами.

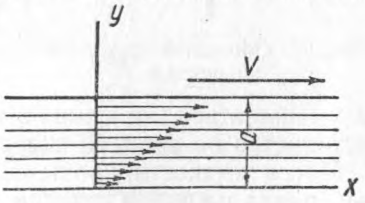


Рис. 10. К определению силы трения

Трение в данном случае будет проявляться как сила, тормозящая движение верхней пластины. Эта сила пропорциональна градиенту скорости, т. е. изменению значения скорости v, наблюдаемому на протяжении единицы длины в направлении, перпендикулярном направлению движения пластины. Сила трения, приходящаяся на единицу длины, называется касательным напряжением. Как о том говорит самое название силы, она направлена вдоль площадки. Величину ее можно выразить следующей формулой:

$$\tau=\mu\frac{v}{a}. \qquad (7)$$

μ называют коэффициентом внутреннего трения, коэффициентом вязкости или просто вязкостью.

Коэффициент вязкости μ, как это видно из формулы (7), имеет размерность *кг сек.м*^{2}.

Отношение коэффициента вязкости к плотности жидкости $\frac{\mu}{\rho}$ называется коэффициентом кинематической вязкости и обозначается через ν. Этот коэффициент употребляется при сопоставлении сил вязкости, зависящих от μ, с силами инерции, зависящими от массовой плотности ρ. Размерность коэффициента кинематической вязкости такова:

$$\nu = м^2/сек^2.$$

Явление вязкости обуславливается молекулярным строением вещества. Молекулы жидкостей и газов находятся в непрерывном беспорядочном движении. Представим себе жидкость, скорость движения которой по слоям различна. Очевидно, что средняя скорость молекул в слое с большей скоростью будет увеличена за счет скорости поступательного движения. Следовательно, молекулы, попадающие из слоя с большей скоростью потока в слой с меньшей скоростью, будут ускорять его движение, а молекулы, попадающие из слоя с меньшей скоростью в слой с большей скоростью, будут замедлять его.

Таким образом, посредством перемещающихся из слоя в слой молекул происходит как бы сцепление одного слоя воды с другим. В этом и заключается физическая сущность вязкости жидкостей.

Коэффициент вязкости обычно определяют опытным путем. Величина его зависит от температуры. Приведем значения μ для воды и воздуха при различных температурах.

Среда	$t=0°$	$t=20°$	$t=60°$	$t=100°$
Вода	$1{,}79\cdot10^{-2}$	$1{,}01\cdot10^{-2}$	$0{,}48\cdot10^{-2}$	$0{,}28\cdot10^{-2}$
Воздух	$1{,}73\cdot10^{-4}$	$1{,}86\cdot10^{-4}$	$2{,}1\cdot10^{-4}$	$2{,}3\cdot10^{-4}$

Цифры даны в системе CGS *(г·см·сек)*.

Слои вязкой жидкости точно так же, как и идеальной, при определенных условиях могут перемещаться, не перемешиваясь.

Такое движение называется ламинарным движением вязкой жидкости.

8. Ламинарные течения наблюдаются, как правило, лишь в случае небольших скоростей. При определенной скорости правильная слоистая структура потока изменяется. Наряду с главным движением вдоль оси канала возникают поперечные перемещения жидкости, носящие беспорядочный характер. Такая форма течения называется турбулентной. Именно с такими течениями приходится, как правило, иметь дело в природе и технике. Ламинарные течения встречаются сравнительно редко. Моменту перехода течения в

трубах от ламинарного режима к турбулентному соответствует определенное значение некоторого соотношения, а именно: $\frac{vl}{\nu}$, где $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, l — характерный линейный размер обтекаемого тела или размер трубы. Это соотношение называется числом Рейнольдса и обозначается Re. Критическое Re, при котором ламинарное течение переходит в турбулентное, равно приблизительно 1400—1600. Искусственным путем критическое значение Re можно значительно увеличить.

Движение жидкости при Re, меньших единицы, называется ползущими течениями. В этих течениях основную роль играет вязкость жидкости. При очень больших значениях Re влияние вязкости становится малозаметным. Исследования движения жидкостей с малой вязкостью при движениях с очень большими числами Рейнольдса показали, что в таких случаях жидкость ведет себя вдали от стенок как жидкость идеальная. Но условия прилипания жидкости к стенке создают резко выраженный пограничный слой с большим значением градиента скоростей. Этот пограничный слой тем тоньше, чем меньше вязкость. Силы трения, развивающиеся в этом слое, весьма значительны и поэтому не могут быть отброшены при решении той или иной задачи.

9. Как уже говорилось, для упрощения теоретического решения ряда задач гидроаэродинамики реальные жидкости рассматриваются как идеальные. Такое допущение особенно удобно при решении задач, связанных с потенциальными потоками жидкости. Физически потенциальные течения характеризуются тем, что частицы жидкости в них движутся поступательно, не вращаясь вокруг своей оси. Течения, в которых частицы жидкости движутся вращательно, называются вихревыми.

В идеальной жидкости вихрь — вращательное движение некоторого объема жидкости — возникнуть не может, но коль скоро он есть, то должен существовать вечно, так как для возникновения его или затухания необходимо приложить к объему воды касательные усилия. В идеальной же жидкости такие силы отсутствуют. Но вихри всегда возникают при обтекании тел реальной жидкостью. Такие вихри мы видим срывающимися с края весла во время гребли. Оторвавшись от весла, они постепенно исчезают. Причиной их появления и исчезновения являются движение и вязкость жидкости.

Интенсивное появление вихрей в непосредственной близости от движущегося в жидкости тела объясняется наличием пограничного слоя, где в силу большой разницы в скоростях прилегающих друг к другу слоев жидкости развиваются большие касательные усилия внутреннего трения. В связи с этим пограничный слой часто называют слоем поверхностного завихрения.

10. Явления, происходящие при обтекании тел жидкостью,— весьма сложны, и при их изучении весьма удобно пользоваться не-

которыми вспомогательными теоретическими данными гидроаэродинамики.

Скорости вязкой жидкости в потоке и вокруг обтекаемого тела в различных точках различны как по величине, так и по направлению. Совокупность всех этих скоростей принято называть полем скоростей (рис. 11, *а*). Проведем через точку *А* линию, касательными к которой в любой точке будут служить направления скоростей движения жидкости в этих точках. Такую линию называют линией тока.

Линии тока, проведенные для всех точек, лежащих на некоторой кривой *АБ*, дают поверхность, именуемую поверхностью тока (рис. 11,*б*). Если взять замкнутый контур aa_1 и провести линии тока через все точки, то получится так называемая трубка тока. Содержащаяся в ней жидкость называется ниткой тока (рис. 11,*в*).

Если линия тока характеризует мгновенное состояние жидкости, то траектория частицы жидкости дает последовательные по времени положения ее в пространстве. Следовательно, траектории движения совпадают с линиями тока установившегося движения жидкости. Некоторые опыты позволяют видеть в жидкости линии тока. Результаты таких опытов приведены на рис. 6 и 7.

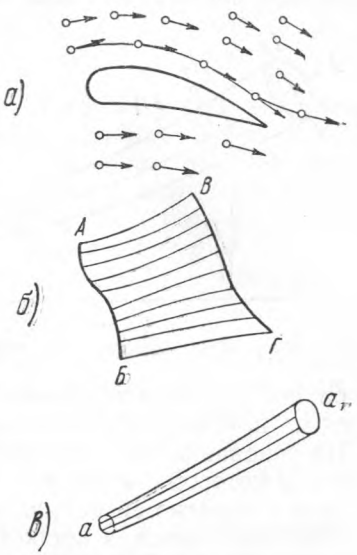


Рис. 11. Линия тока, поверхность тока и трубка тока

Для траекторий также вводятся понятия о поверхности траекторий и трубки траекторий. Жидкость, текущая внутри трубки траекторий, называется струйкой, а сама трубка — стенкой струйки.

Струйка является наиболее важным образом в гидроаэромеханике. При исследовании сложных задач обтекания потоки разбиваются на отдельные струйки. Применяя к отдельным струйкам два основных закона природы — закон сохранения материи и закон сохранения энергии, получают два основных уравнения всей гидроаэромеханики, а именно: уравнение неразрывности, рассмотренное нами выше, и уравнение Бернулли, которое рассматривается в следующем разделе.

Таким образом, сложная пространственная задача сводится к решению многих одномерных задач (для каждой струйки), что несравненно проще. Общий эффект определяется суммированием решений, полученных для каждой струйки. Каждую струйку при этом рассматривают как изолированную от других струек. Для

этого предполагается, что стенки такой трубки как бы затвердели и не имеют трения.

Наконец, обратимся еще к одному теоретическому образу гидроаэромеханики — линии отмеченных частиц. Линию отмеченных частиц можно получить, если сделать мгновенную фотографию дыма (в случае воздуха) или краски (в случае воды), медленно вытекающей из некоторого сопла и уносимой потоком. Линия отмеченных частиц совпадает с траекторией и линией тока только в случае установившегося движения.

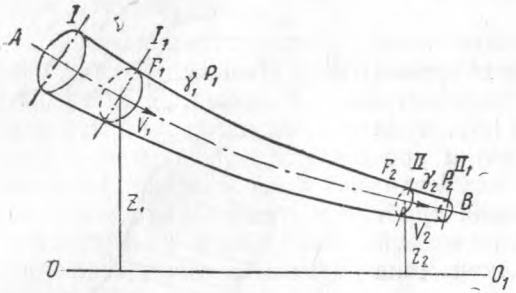


Рис. 12. К выводу теоремы Бернулли

В гидроаэромеханике для упрощения исследований принято обычно обращать движение. Вместо движущегося в натуре тела при исследовании рассматривают тело неподвижное, обтекаемое потоком жидкости, движущимся со скоростью, равной скорости движения тела в натуре. Этот прием основывается на принципе относительности для поступательного движения. На основании этого принципа мы можем сообщить телу и жидкости, в которой оно движется, скорость, равную скорости движения тела и обратно ей направленную. В этом случае тело в пространстве остановится, а жидкость будет его обтекать со скоростью его прежнего движения. Картина обтекания при этом не изменится.

11. Выведем одно из основных уравнений гидроаэромеханики — уравнение Бернулли в общей форме, т. е. для некоторой струйки любой жидкости (рис. 12). Вывод будет совершенно таким же, если вместо струйки будет взята реальная трубка некоторой формы.

Применим к выбранной струйке закон сохранения энергии. Напишем для сечений *I* и *II* условие неразрывности:

$$\rho_1 F_1 v_1 = \rho_2 F_2 v_2 = m, \tag{8}$$

где:

ρ — плотность;
F — площадь;
v — скорость.

Определим теперь, какая энергия поступила в участок трубки *I—II* через сечение *I*, и какая энергия вышла через сечение *II* за некоторый малый промежуток времени Δt.

За время Δt через сечение *I* пройдет столбик жидкости, равный $v_1 \Delta t$. Объем его будет $F_1 v_1 \Delta t$, а масса

$$\rho_1 F_1 v_1 \Delta t = m \Delta t.$$

Через сечение *II* за это же время пройдет масса

$$\rho_2 F_2 v_2 \Delta t = m \Delta t.$$

Посмотрим, из каких частей будет складываться энергия, внесенная в трубку через сечение *I*.

а) Движущаяся масса обладает кинетической энергией, величина которой равна половине произведения массы на квадрат скорости ее движения:

$$\frac{m \Delta t v_1^2}{2}.$$

б) Давление у сечения *I* равно p_1. Потенциальную энергию давления, равную работе частиц жидкости, лежащих слева от сечения *I*, можно вычислить таким путем. Работа есть произведение силы на путь. Сила давления в сечении *I*, равном вследствие малости Δt сечению I_1, равна $p_1 F_1$. Следовательно, потенциальная энергия определяется следующим выражением: $p_1 F_1 v_1 \Delta t$.

Если умножить и разделить это выражение на ρ_1 и подставить вместо $\rho_1 F_1 v_1 \Delta t$ $m \Delta t$, то получим $\frac{p_1}{\rho_1} m \Delta t$.

в) Потенциальная энергия веса вычисляется по выражению $z_1 g m \Delta t$. Эта энергия равна возможной работе веса жидкости, внесенной через сечение *I* в трубку. Вес жидкости равен массе $m \Delta t$, умноженной на ускорение силы тяжести g. z — высота центра тяжести сечения *I* над некоторой условной нивелировочной плоскостью OO_1.

г) Так как мы рассматриваем общую задачу, а следовательно, учитываем и сжимаемость жидкости, то необходимо определить и внутреннюю тепловую энергию. Она зависит от температуры и выражается в калориях на килограмм веса газа. В различных сечениях трубы температура жидкости может быть неодинаковой, следовательно, будут неодинаковы и величины этой энергии. Если в сечении *I* внутренняя энергия будет равна U_1, то через него пройдет тепловая энергия $U_1 g m \Delta t$. Для того чтобы перевести внутреннюю энергию из тепловых единиц в механические (в которых выражены все рассмотренные выше части энергии), надо разделить ее на механический эквивалент теплоты $A = \frac{1}{427} \left(\frac{кал}{кгм}\right)$. Тогда получим

$$\frac{U_1}{A} g m \Delta t.$$

Совершенно так же получаются выражения составных частей энергии и для сечения *II*:

$$\frac{m \Delta t v_2^2}{2}; \quad \frac{p_2}{\rho_2} m \Delta t; \quad z_2 g m \Delta t; \quad \frac{U_2}{A} g m \Delta t.$$

Если стенки трубки не имеют трения и не пропускают теплоты, то сумма всех энергий, внесенных через сечение *I* по закону сохра-

нения энергии должна равняться сумме энергий, вышедших через сечение *II*. Если на пути *I-II* будут иметь место потери на трение и теплоотдачу, то вошедшая энергия будет равна вышедшей плюс эти потери — κ.

Напишем это условие для двух сечений трубки, разделив предварительно все члены на $gm\Delta t$, тогда

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{g\rho_1} + z_1 + \frac{U_1}{A} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{g\rho_2} + z_2 + \frac{U_2}{A} + \xi, \qquad (9)$$

где

$$\xi = \frac{k}{g\, m\, \Delta t}.$$

Это выражение и является общим видом уравнения Бернулли для любой жидкости, в том числе для газов.

Каждый член уравнения (9) является энергией — в этом его физический смысл. Если же отнести все члены уравнения к весу, то размерность каждого из них будет линейной, т. е. выраженной в метрах. Поэтому члены уравнения Бернулли часто называют высотами:

$\frac{v^2}{2g}$ — скоростная высота,

$\frac{p}{g\rho}$ — пьезометрическая высота,

z — нивелирная высота,

ξ — высота потерь.

Для несжимаемой жидкости, когда $g\rho_1 = g\rho_2 = \gamma V_1 = U_2$ уравнение Бернулли запишется в следующем виде:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \xi. \qquad (10)$$

Если все составляющие части энергии отнести не к 1 *кг*, как это делалось при получении уравнения (9), а к 1 $м^3$, т. е. разделить на $\frac{m\Delta t}{\rho}$, то получим уравнение Бернулли (10) в следующем виде:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 + \gamma z_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2 + \gamma z_2 + \gamma \xi. \qquad (11)$$

Размерность членов этого вида уравнения Бернулли будет $кг/м^2$, т. е. размерность давления. Члены уравнения (11) поэтому носят иное наименование, а именно:

$\frac{\rho v^2}{2}$ — скоростной напор;

p — давление;

γz — гидростатическое давление;

$\gamma \xi$ — потерянный напор.

Сумму их называют полным напором. Следовательно, для несжимаемой жидкости теорема Бернулли формулируется так: полный напор вдоль струйки не меняется.

Если трубка расположена горизонтально, т. е. когда рассматриваются потоки, текущие в горизонтальной плоскости, или когда небольшой разностью высот можно пренебречь, уравнение Бернулли принимает еще более простой вид, которым обычно и пользуются на практике:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2 + \gamma \xi. \tag{12}$$

Если, наконец, пренебречь и величиной потерь $\gamma\xi$ в силу их малости, уравнение Бернулли можно записать так:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2 = H, \tag{13}$$

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}. \tag{14}$$

Уравнение неразрывности и уравнение Бернулли имеют многочисленные практические применения и служат для разрешения большого числа задач гидроаэромеханики. Эти уравнения уже по внешнему виду линий тока вокруг обтекаемого тела позволяют судить о режиме течения вокруг него и характере развивающихся при этом сил давления.

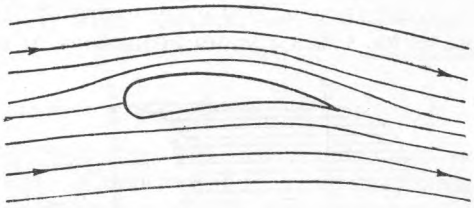


Рис. 13. Возникновение подъемной силы крыла

На рис. 13 изображена картина обтекания крыла установившимся потоком жидкости. Сгущение линий тока на верхней части крыла и разрежение их под крылом позволяют на основании уравнения неразрывности сказать, что скорость жидкости над крылом будет больше скорости под ним.

В свою очередь это различие в скоростях на основании уравнения Бернулли показывает, что давление под крылом будет больше, чем давление над ним. Этим обстоятельством и объясняется возникновение подъемной силы крыла. При обтекании реальной жидкостью различных даже симметричных профилей, поставленных под углом к потолку, сила, действующая на профиль, будет совпадать с направлением потока только при углах набегания 90 и 180°. Во всех остальных случаях повышенное давление под профилем приведет к тому, что суммарная сила будет отклонена несколько вверх вследствие наличия подъемной силы.

Учение о подъемной силе крыла было создано Н. Е. Жуковским и разработано его учениками. Оно является теоретической основой современной авиации.

Выводы из уравнения неразрывности и уравнения Бернулли позволяют дать простое объяснение стремлению кораблей, движущихся недалеко друг от друга, на параллельных курсах, сблизиться, что нередко приводило к авариям. Линии тока вокруг двух кораблей, идущих на параллельных курсах, изображены на рис. 14.

12. В случае прямолинейного движения тела в жидкости на него действует сила, направленная в сторону, противоположную этому движению. Эта сила называется силой сопротивления. Следовательно, чтобы тело могло двигаться, к нему должна быть приложена постоянная сила, именуемая движущей силой.

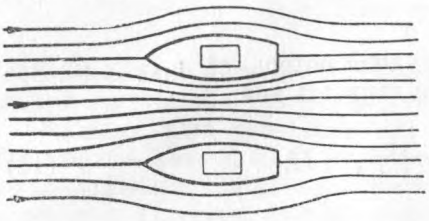


Рис. 14. Притягивание судов друг к другу

Экспериментом и теорией установлено, что сила сопротивления складывается из двух частей: сопротивления трения и сопротивления формы.

Сила сопротивления, зависящая от формы тела, связана с характером обтекания тела жидкостью и определяется как сумма всех давлений, оказываемых жидкостью на отдельные элементы его поверхности. Эту силу часто называют также сопротивлением давления. Сила трения возникает от скольжения жидкости по по-

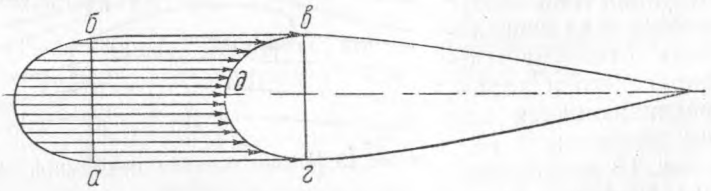


Рис. 15. Возникновение силы сопротивления

верхности тела. Местом ее возникновения является пограничный слой, в котором происходит быстрое изменение скоростей от нулевой на поверхности тела до величины скорости в свободном потоке.

Полная сила сопротивления направлена вдоль потока жидкости только в том случае, если обтекаемое тело симметрично и угол набегания потока равен 0. Будучи разложенной на две составляющие, эта сила во всех других случаях дает две силы: лобовое сопротивление, представляющее собой составляющую полного сопротивления по оси x, направленной вдоль потока, и подъемную силу, являющуюся составляющей полного сопротивления по оси y, перпендикулярной направлению потока.

13. Изложим теперь физическую сущность возникновения силы сопротивления. Рассмотрим для этого некоторое тело вращения, находящееся в потоке вязкой жидкости (рис. 15). Тело, находящееся в жидкости, замедляет скорость ее движения. Зная массу жидкости, которая приходит в соприкосновение с телом в течение одной секунды, а также степень замедления скорости движения жидкости у тела, можно определить силу действия жидкости на тело или силу сопротивления, умножив массу на изменение ско́рости, т. е. на ускорение (в данном случае ускорение со знаком минус — замедление движения).

Объем жидкости w, подходящей к поверхности тела за одну секунду, будет равен объему цилиндра *абвг*. Образующая цилиндра равна пути, проходимому потоком в одну секунду; основания имеют форму передней части тела *адв*. Легко показать, что объем такого цилиндра равен цилиндру, длина образующей которого остается такой же, как у цилиндра *абвг;* основания же равны площади s поперечного сечения тела в его наиболее широкой части *(вг)*.

Следовательно,

$$w = s\,v,$$

а масса подходящей к телу жидкости

$$m = \rho s v.$$

Именно так подошел к разрешению этого вопроса Ньютон. Но он предполагал, что, ударяясь о тело, частицы жидкости полностью теряют свою скорость, т. е. замедление равно v, и, умножив массу m на v, он получил

$$R = \rho s v v = \rho s v^2.$$

Дальнейшие исследования показали, что вывод Ньютона не соответствует действительности. Современная гидродинамика установила, что сопротивление является результатом давления и трения, развивающихся на всей поверхности тела при движении. Основное различие между старой и новой теорией заключается в том, что старая теория учитывала только ту часть поверхности тела, которая обращена к потоку или в сторону движения, и не учитывала характера обтекания тела струями жидкости и образования вихрей, в то время как новая теория показывает, что именно процессы, протекающие к кормовой части тела (уменьшение давления, срыв вихрей), в основном определяют силу сопротивления.

Но формула Ньютона станет соответствовать действительности, если в нее включить коэффициент a:

$$R = a\rho s v^2. \qquad (15)$$

Коэффициент a учитывает неполную потерю скорости при подходе к телу, подход ее к телу во всех точках поверхности, искажение поля скоростей в результате трения жидкости о поверхность, срыв вихрей, образование которых также требует определенной

энергии, выражающейся в виде некоторой части силы общего сопротивления жидкости движению тела, и, наконец, при экспериментальном определении коэффициента a,— силу трения.

С точки зрения современной гидроаэромеханики закон сопротивления жидкости движению тел содержит следующие общие положения: сопротивление определяется разностью давлений на поверхности тела и трением; в общем случае основную роль играют силы давления; разность давлений, которую относят обычно к площади поперечного сечения в наиболее широкой части тела, можно принять пропорциональной динамическому давлению (при скорости v динамическое давление равно $\frac{\rho v^2}{2}$).

Пропорциональность разности давления квадрату скорости потока легко показать, если воспользоваться уравнением Бернулли. Для простоты доказательства представим, что тело, изображенное на рис. 15, обтекается идеальной жидкостью. Пусть скорость потока далеко от тела, куда не распространяется вызванное им возмущение, равна v_0, а давление — p_0. Рассмотрим линию тока, подходящую к точке ∂ тела. Это — единственная точка, где скорость потока падает до нуля. Она называется критической точкой. Пусть давление в этой точке равно p_1. Тогда, если применить к этой линии тока уравнение Бернулли, оно запишется так:

$$\frac{p_1}{\rho} + 0 = \frac{p_0}{\rho} + \frac{v_0^2}{2},$$

откуда

$$p_1 - p_0 = \frac{\rho v_0^2}{2}. \tag{16}$$

Но не во всех точках тела, как уже говорилось, скорость падает до нуля. Поэтому определяемое сопротивление должно быть пропорционально некоторому числу — коэффициенту сопротивления, учитывающему характер режима обтекания данного тела. Обозначив $2a$ через C, запишем следующую формулу, обычно применяемую в современной гидроаэромеханике для определения силы сопротивления,

$$R = C s \frac{\rho}{2} v^2. \tag{17}$$

14. Исследования коэффициента C показали также, что он зависит от характера самого потока, увеличиваясь в случае турбулентного потока и уменьшаясь в ламинарном потоке. Вихреобразование, от которого зависит коэффициент C, определяется режимом течения в пограничном слое, причем возникновение турбулентности в пограничном слое уменьшает коэффициент сопротивления. Это объясняется тем, что турбулентность в пограничном слое приводит к смещению точки отрыва потока от поверхности тела, а следовательно, и образованию вихрей, на которое затрачивается

определенная работа, ближе к его кормовой части. Таким образом, поток будет прилегать к поверхности тела на большей ее части, вихрей будет образовываться меньше и уменьшится ширина вихревой зоны *б* за телом (см. рис. 9). Уменьшение количества вихрей указывает на уменьшение сопротивления, оказываемого жидкостью движущемуся в ней телу.

Но все, что связано с трением, вихреобразованием и характером потока, определяется размерами тела, скоростью потока и свойством жидкости, т. е. ее кинематическим коэффициентом вязкости. Отсюда можно сделать заключение, что коэффициент сопротивления, кроме формы тела и характера его поверхности, зависит также от Re. Зависимость эта, однако, будет неодинаковой для тел различной формы.

У тел, для которых сопротивление определяется в основном силами давления, т. е. у плохообтекаемых тел, зависимость C от Re будет незначительной. Если же решающая роль в определении сопротивления принадлежит силам трения, зависимость C от Re будет весьма заметной.

Коэффициент сопротивления C довольно просто получить опытным путем, как это обычно и делают. Для этого тело продувают в аэродинамической трубе или буксируют в лотке; при этом замеряют величину силы сопротивления. После этого, зная все величины, входящие в уравнение (17), определяют C для данного вычисленного значения Re. Но так как при несимметричном обтекании тела мы не знаем направления силы сопротивления, то обычно при продувках определяют не полную силу сопротивления, а ее составляющие по оси, совпадающей с направлением потока, и по оси, перпендикулярной потоку, т. е. определяют лобовое сопротивление и подъемную силу. Следовательно, по формуле (17) получают коэффициент лобового сопротивления $C_x = \frac{2R_x}{s\rho v^2}$ и коэффициент подъемной силы $C_y = \frac{2R_y}{s\rho v^2}$.

Складывая R_x и R_y геометрически, получают величину и направление силы R. Система координат, в которой ось ox совпадает со скоростью потока, называется скоростной или поточной. В некоторых задачах более удобно разложить вектор силы сопротивления, а следовательно, и коэффициента сопротивления, по другим осям координат. К таким осям относятся земные оси координат, когда ось y направлена отвесно вверх от поверхности Земли, а ось x в произвольную сторону горизонтально, и связанная система координат, когда ось x находится в плоскости симметрии тела, ось y направлена вверх, а ось z — перпендикулярно к плоскости симметрии. Естественно, что величины коэффициентов сопротивления вдоль разных осей будут различными. Зная углы между осями различных систем координат, пересчет коэффициентов, относящихся к одной системе на коэффициенты другой, легко осуществить с помощью простых тригонометрических соотношений.

15. Чтобы закончить раздел о сопротивлении жидкости движению тел, следует остановиться еще на одной составляющей сопротивления — волновом сопротивлении. Это сопротивление возникает при движении тел на границе раздела двух сред, например, воды и воздуха. Именно таково движение судна.

Судно, двигаясь на поверхности спокойной жидкости, образует систему поперечных и расходящихся волн, изображенную схематично на рис. 16. При установившемся движении и постоянной скорости судна эта система будет также постоянной. Для поддержания системы волн требуется затрата некоторого количества энергии, которая и представляет собой работу волнового сопротивления, преодолеваемого судном. Волновое сопротивление зависит

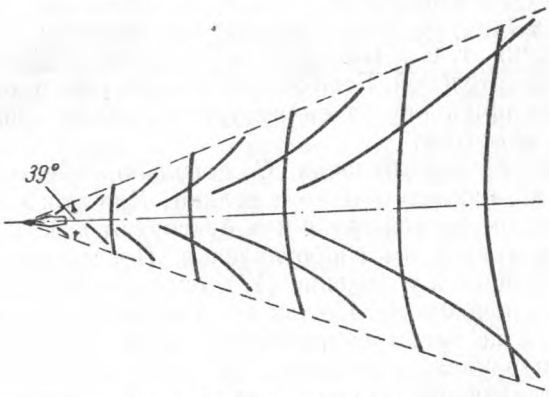


Рис. 16. Корабельные волны

от формы обводов судна, его размеров, плотности жидкости и скорости. Величина волнового сопротивления обычно вычисляется по следующей формуле:

$$R_w = C_w \rho l^2 v^2, \tag{18}$$

где:

l — длина судна;

C_w — коэффициент волнового сопротивления.

C_w — определяется экспериментально, для чего модель судна буксируется в бассейне. Этот коэффициент непостоянен и зависит от соотношения, называемого числом Фруда и обозначаемого Fr. Это соотношение записывается так:

$$\mathrm{F_r} = \frac{v}{\sqrt{gl}}. \tag{19}$$

Волновое сопротивление обычно не является основной частью общего сопротивления движению судна. Лишь при больших скоростях оно резко возрастает; при скоростях экономических оно составляет очень незначительную часть общего сопротивления.

§ 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ В ЖИДКОСТИ И ЗАКОНЫ ПОДОБИЯ

1. Основой всей экспериментальной гидроаэромеханики являются законы подобия. Именно эти законы дают основания для исследования движения тел в жидкости путем моделирования. Исследование движения путем эксперимента с моделью тела малых размеров имеет многочисленные преимущества по сравнению с исследованиями движения тела в натуре. Основные из них — это дешевизна и удобство. Если же иметь в виду изучение мореходных качеств больших океанских судов, то моделирование окажется единственным средством исследования.

На практике моделирование получило очень широкое развитие также и потому, что теоретический путь разрешения подобных задач представляет пока еще очень большие, а порой и непреодолимые трудности.

Принцип моделирования заключается в следующем. Буксировками модели в бассейне или продувками в аэродинамической трубе определяют описанным выше путем коэффициенты сопротивления и, пользуясь ими, по формулам (17) и (18) делают пересчеты для натурных размеров исследуемого тела. Но для такого пересчета надо быть уверенным в подобии модели с натурой. Следует помнить, что подобие, о котором идет речь, отнюдь не ограничивается геометрическим подобием.

2. Рассмотрим три вида подобия явлений: геометрическое, кинематическое и динамическое. Динамическое подобие является наиболее широким, охватывающим как кинематическое, так и геометрическое подобие.

Геометрическое подобие выражается формулой $l_1=\lambda l_2$, которая показывает, что все размеры модели необходимо изменить против соответствующих размеров тела натуральной величины в одинаковое число раз, обозначаемое через λ и именуемое модулем геометрического подобия.

В случае геометрического подобия тел понятие о модуле по существу совпадает с понятием о масштабе. Но понятие о модуле геометрического подобия тел, движущихся в жидкости, оказывается значительно шире понятия о масштабе. В этом случае геометрически подобными должны быть не только тела, но и траектории движения частиц жидкости. Таким образом, и для тела и для траекторий модуль геометрического подобия должен быть одинаковым.

Кинематическое подобие движения тел требует, кроме подобия форм тела и подобия линий тока, также постоянной пропорциональности в затрате времени на прохождение подобными точками соответствующих участков траектории движения. Последнее требование может быть выражено так: $\Delta t_1=\tau\Delta t_2$, где τ — коэффициент пропорциональности, называемый модулем временного подобия. Кинематическое подобие требует пропорциональности ско-

ростей в натуре и на модели, а также пропорциональности ускорений их. Эти два требования выражаются следующим образом:

$$\frac{\overline{v}_1}{\overline{v}_2} = \frac{\lambda}{\tau}; \quad \frac{\overline{w}_1}{\overline{w}_2} = \frac{\lambda}{\tau^2},$$

Черточка над v и w показывает, что требуется подобие не только по величине скорости и ускорения, но и по их направлениям.

Таким образом, в кинематически подобных системах скорости и ускорения сходственных точек в соответственные моменты времени параллельны между собой, одинаково направлены и находятся в постоянных соотношениях: $\frac{\lambda}{\tau}$ или $\frac{\lambda}{\tau^2}$. Кинематическое подобие требует также и подобия режима движения (установившегося, неустановившегося).

Для того чтобы две системы были динамически подобны, необходимо, кроме выполнения условий геометрического и кинематического подобия, также выполнение условий массового подобия. Массы точек в одной системе должны находиться в постоянном соотношении с массами точек другой системы, т. е.

$$M_1 = m\,M_2,$$

где m — модуль массового подобия.

Естественно, что подобными в таком случае должны быть и причины, порождающие движение, т. е. силы. Так как сила равна массе, умноженной на ускорение, то отношение величины сил, действующих в соответственные моменты времени на сходственные точки с подобными массами, должно равняться произведению из модуля массового подобия на модуль, характеризующий пропорциональность ускорений,

$$\overline{F}_1 = \frac{m\lambda}{\tau^2}\overline{F}_2. \qquad (20)$$

Силы должны быть параллельными и одинаково направленными.

Формула (20) лежит в основе закона моделирования движений тела в жидкости или жидкости в трубопроводах.

3. В двух подобных системах движения все силы должны быть пропорциональными. Но мы столкнулись бы с непреодолимыми препятствиями, если бы попытались добиться на модели подобия всех сил. Поэтому обычно из всех действующих сил выбирается преобладающая, и для нее создаются условия подобия. Такое неполное, или приближенное, подобие удовлетворяет запросам практики.

Следовательно, весьма существенным вопросом моделирования является выбор категории преобладающих сил в данном явлении.

Сопоставляя свободные потоки и потоки, которые обтекают находящееся в них тело, легко обнаружить основную характерную черту для последних — искривление линий тока. При движении

частиц жидкости по искривленным траекториям неизбежно развивается центробежная сила. Центробежная сила, как известно, может быть выражена так:

$$F_ц = \frac{\delta M\, v^2}{r},$$

где:

δM — масса жидкой частицы;

v — скорость этой частицы;

r — радиус кривизны траектории.

Запишем условие подобия для центробежных сил для модели и натуры, причем представим массы пропорциональными кубу линейного размера, умноженного на плотность жидкости. Для подобных систем это сделать возможно. Тогда

$$\frac{F_{ц(1)}}{F_{ц(2)}} = \frac{\rho_1 l_1^3 \dfrac{v_1^2}{r_1}}{\rho_2 l_2^3 \dfrac{v_2^2}{r_2}}.$$

Так как в геометрически подобных системах

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{r_1}{r_2},$$

то

$$\frac{F_{ц(1)}}{F_{ц(2)}} = \frac{\rho_1 l_1^2 v_1^2}{\rho_2 l_2^2 v_2^2}. \qquad (21)$$

Таково условие подобия для центробежных сил в движущейся жидкости. Если приравнять это условие отношению сил сопротивления $\frac{R_1}{R_2}$ в подобных движениях жидкости и обозначить $\frac{R}{\rho l^2 v^2}$ через k, то условие подобия для данного случая движения будет выглядеть так:

$$R = k \rho l^2 v^2. \qquad (22)$$

Следовательно, если мы опытным путем при любых ρ, l, v определим для геометрически подобной модели R_2 и разделим ее величину на $\rho_2 l_2^2 v_2^2$, то для получения силы R, которая будет иметь место в натуре, надо воспользоваться формулой (22), подставив туда найденный экспериментально безразмерный коэффициент k:

$$\left(\frac{R}{\rho l^2 v^2} = \frac{кг}{\dfrac{кг\ сек}{см^4} см^2 \dfrac{см^2}{сек^2}} = \frac{кг\ сек^2\ см^4}{кг\ сек^2\ см^4} = 1 \right).$$

Формулу (21) называют законом подобия Ньютона, а формулу (22) — квадратичным законом сопротивления. Но применение закона подобия Ньютона ограничено только случаями, когда при движении тел в жидкости силами вязкости и тяжести можно пренебрегать. К таким случаям относится движение в жидкости пло-

хообтекаемых тел, когда силы давления являются основными, определяющими величину сопротивления.

В том случае, когда силами вязкости пренебрегать нельзя, что имеет место для тел хорошо обтекаемой формы, условие подобия явления будет иным.

В соответствии с формулой (7) сила трения равна $Fmp = \mu \frac{v}{a} s$, где s — площадь поверхности тела. Следовательно, соотношение сил вязкости для двух геометрически подобных систем будет

$$\frac{F_{mp_1}}{F_{mp_2}} = \frac{\mu_1 v_1 l_1}{\mu_2 v_2 l_2}.$$

Приравняем это отношение отношению центробежных сил [формула (21)]:

$$\frac{\mu_1 v_1 l_1}{\mu_2 v_2 l_2} = \frac{\rho_1 l_1^2 v_1^2}{\rho_2 l_2^2 v_2^2}.$$

Произведя необходимое сокращение и заменив $\frac{\mu}{\rho}$ кинематическим коэффициентом вязкости υ, получим

$$\frac{v_1 l_1}{\nu_1} = \frac{v_2 l_2}{\nu_2}, \tag{23}$$

В условии подобия (23) величина $\frac{v_1 l_1}{\nu_1}$ является, как видим, уже встречавшимся нам ранее Re. Следовательно, для подобия двух систем движения при преобладающей роли сил вязкости, кроме кинематического подобия, необходимо, чтобы число Рейнольдса для модели и натуры было одинаковым. Только в этом случае коэффициент, полученный при опытах с моделью, может быть взят для расчетов силы сопротивления в натуре. Так как модель всегда меньше тела натуральной величины, то для сохранения постоянства Re необходимо увеличивать скорость продувки или уменьшать υ, т. е. брать для эксперимента иную жидкость.

Аналогичным путем можно получить условие и критерии подобия для моделирования движений, в которых основная роль принадлежит силам тяжести. Сила тяжести равна массе на ускорение g: $F_{тяж} = \rho l^3 g$. Напишем соотношение сил тяжести для геометрически подобных систем и приравняем его отношению центробежных сил

$$\frac{\rho_1 l_1^3 g_1}{\rho_2 l_2^3 g_2} = \frac{\rho_1 l_1^2 v_1^2}{\rho_2 l_2^2 v_2^2},$$

после сокращения, преобразований и извлечения корня получаем

$$\frac{v_1}{\sqrt{g_1 l_1}} = \frac{v_2}{\sqrt{g_2 l_2}} = \mathrm{Fr}. \tag{24}$$

Найденный критерий подобия именуется числом Фруда. Значки при g указывают на возможность моделирования при переменных значениях g. Величину g можно изменить, проводя эксперимент во вращающейся системе. При постоянных значениях плотности и ускорения силы тяжести скорость для модели определяется по следующему соотношению:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{g_1 l_1}}{\sqrt{g_2 l_2}} = \sqrt{\frac{l_1}{l_2}} = \sqrt{\lambda}.$$

Этим мы ограничимся при описании условий подобия для различных случаев движения тел в жидкостях. Критерия подобия Re и Fr совместно с условием подобия исходной категории сил оказывается достаточно для изучения движений, при которых жидкость может считаться несжимаемой.

Вывод условия подобия, учитывающего действие сил вязкости и тяжести, также необходим, так как при движении тел по свободной поверхности жидкости или вблизи нее, каковым является движение подводных и надводных судов, ни одной из этих сил в большинстве случаев пренебрегать нельзя. В этом случае масштаб моделирования и выбор скоростей для модели не могут быть произвольными, а определяются величиной отношения кинематических коэффициентов вязкости $\frac{\nu_1}{\nu_2}$. При этом оказывается, что если жидкость при моделировании будет такой же, как и в натуре, то размер модели должен быть равен натуральному размеру, т. е. моделирование в таких условиях невозможно. Такое моделирование оказывается возможным вести только в жидкостях менее вязких, а это сопряжено с трудностями, практически пока непреодолимыми. Вот почему для моделирования сопротивления плавающих тел разработан специальный приближенный метод.

4. В методе моделирования сопротивления плавающих тел удовлетворяются только условия подобия сил тяжести. В основе этого метода лежит допущение о том, что сопротивление трения, как дополнительная часть сопротивления, возникающего при движении тела по поверхности жидкостей, не нарушает ни величины остаточного сопротивления, ни закономерности, которой это сопротивление подчинено.

Тогда квадратичный закон сопротивления (18) может быть записан так:

$$R = R_в + R_{тр} = f(\mathrm{Fr})\,\rho\, l^2\, v^2 + R_{тр}, \qquad (25)$$

где:

$R_в$ — остаточное сопротивление (волновое сопротивление плюс сопротивление давления);

$R_{тр}$ — сопротивление трения;

$f(\mathrm{F}_r)$ — коэффициент, зависящий от Fr.

Для определения сопротивления трения независимо от определений остаточного сопротивления вводится еще одно допущение.

Предполагается, что при одном и том же Re сопротивление трения судна равно сопротивлению трения плоской доски, поверхность которой равна смоченной поверхности судна. Сопротивление движению плоских досок можно определить как теоретическим, так и опытным путем. Коэффициент сопротивления трения досок определяется буксировками их в бассейне. Пересчет на натуру, т. е. сопротивление трения судна, находят по формуле

$$R_{тр} = \frac{1}{2} C_{тр} \rho \Omega v^2, \qquad (26)$$

где:

$C_{тр}$ — коэффициент сопротивления трения, найденный опытами с досками, при условии равенства Re для доски и судна;

Ω — смоченная поверхность судна.

Коэффициент сопротивления для доски вычисляют после непосредственного определения силы $R_{тр}$ доски также по формуле (26). В этом случае Ω обозначает поверхность доски.

При буксировке досок волновым сопротивлением и сопротивлением давления, как малыми по сравнению с сопротивлением трения, пренебрегают.

Буксировки досок можно заменить продувками их в аэродинамических трубах, но для соблюдения Re приходится значительно увеличивать скорость потока. Это вызвано различными значениями кинематического коэффициента вязкости воды и воздуха.

Продувки досок иногда заменяют продувками моделей подводной части судна. Такие продувки имеют преимущества перед экспериментами с досками, так как они точно так же, как и эксперимент с досками, позволяют исключить сопротивление волнения и в то же время учесть влияние формы тела на величину сопротивления трения.

Порядок моделирования полного сопротивления плавающих тел следующий:

а) буксировочными испытаниями определяется полное сопротивление модели;

б) одним из перечисленных выше способов определяют сопротивление трения модели для скорости, равной скорости буксировки;

в) из полного сопротивления модели вычитают полученное сопротивление трения и находят остаточное сопротивление;

г) остаточное сопротивление модели пересчитывают для натуры, пользуясь законом подобия Фруда. При одинаковых в эксперименте и натуре жидкостях, ускорениях силы тяжести и числах Фруда можно показать, что остаточное сопротивление судна $R_{в(1)}$ определяется по формуле

$$R_{в_1} = \lambda^3 R_{в_2}$$

где:

$R_{в(2)}$ — остаточное сопротивление модели;

$\lambda = \frac{l_1}{l_2}$; $l_1\, l_2$ — характерные размеры, в данном случае—длина модели и судна;

д) пользуясь законом подобия для сил трения, величину сопротивления трения модели пересчитывают для определения сопротивления трения судна;

е) чтобы найти полную силу сопротивления судна, необходимо сложить остаточное сопротивление и сопротивление трения.

§ 4. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С МОДЕЛЯМИ

1. В предыдущих параграфах было показано, что коэффициенты сопротивления, необходимые для определения сил, действующих на движущееся в жидкости тело в натурных условиях, можно определить опытным путем на модели этого тела. Были показаны и те условия, которые необходимо создать при опыте, чтобы полученные на моделях коэффициенты можно было переносить на натуру.

Опишем теперь средства и методы, которые позволяют провести необходимые опыты.

Опыты с моделями проводятся в аэродинамических трубах или буксировочных бассейнах. В первом случае моделируемое движение обращается, т. е. тело, движение которого исследуется, закрепляется в трубе неподвижно, а жидкость (в данном случае воздух) заставляют двигаться относительно неподвижного тела. В буксировочных бассейнах модель, как и в натуре, движется в покоящейся жидкости (воде). И в том и в другом случае в условиях подобия тем или иным способом определяется сила сопротивления, действующая на модель. Определив ее по формулам (17), (18), вычисляют коэффициенты сопротивления.

Из самой постановки опытов очевидно, что рабочая часть бассейна должна быть значительной протяженности (размеры бассейнов достигают 500 *м* и более), рабочая же часть трубы в своем поперечном размере должна превышать размеры модели лишь настолько, чтобы вызванные моделью возмущения потока не доходили до стенок трубы или доходили, будучи значительно ослабленными, иначе на величине коэффициента сопротивления будет сказываться влияние стенок.

2. Обычно применяют три типа труб (рис. 17). Основные детали труб обозначены на рисунке буквами. Вентилятор *А*, создающий поток воздуха, приводится в движение элетродвигателем *Б*. Выпрямляющая решетка *В* состоит из коротких труб с параллельными стенками. Назначение ее — уничтожать вихри и создавать более равномерное поле скоростей в месте укрепления модели.

Проволочное сито *Г* предназначено для выравнивания продольных разностей скоростей. Конфузор *Д* служит для создания наиболее однородной и малозавихренной струи воздуха при разгоне ее от малых до рабочих скоростей на участке малой протяженности. Это обеспечивается уменьшением сечения конфузора в направлении потока. В рабочей части трубы *Е* укрепляется испытуемая модель. Поворотные решетки *Ж* уменьшают вихреобразование.

Трубы *I, II* существенно отличаются от трубы *III*. Они не замкнутые, труба *III* замкнутая, т. е. во время работы в ней циркулирует одна и та же масса воздуха. В трубах *I* и *III* рабочая часть открытая, рабочая часть трубы *II* находится внутри. Тип трубы *III* имеет ряд преимуществ экономических и эксплуатационных, так как не вызывает потоков в помещении, где установлена труба. Скорость потока в таких трубах определяется по разности давлений в двух сечениях трубы, применяя уравнение Бернулли. Скорость потока в трубе определяют также, измеряя скоростной напор или непосредственно с помощью различного рода крыльчатых анемометров.

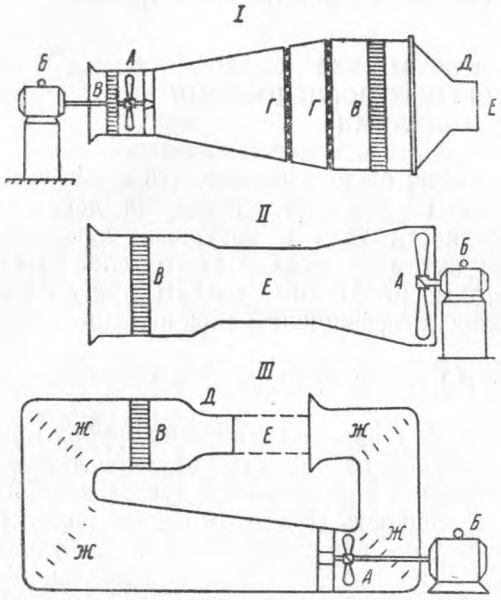


Рис. 17. Различные типы аэродинамических труб

Силу, действующую на модель, вернее, ее составляющие в скоростных осях координат, проще всего найти непосредственным измерением на весах. Для этого модель подвешивают на трех тросах в рабочей части трубы (рис. 18). Концы *А, Б, В* прикрепляют к рычагам трех весов. Для того чтобы создать натяжение тросов до продувки, к моделям подвешивают гири *Г* и *Д*. Модель обычно подвешивают так, чтобы составляющая силы, перпендикулярная потоку, была направлена вниз. До начала продувки все весы уравновешивают. Новое уравновешивание в момент продувки позволяет определить на весах *1* лобовое сопротивление или составляющую вдоль потока, на весах *2* и *3* подъемную силу или составляющую, перпендикулярную потоку. Отношение показаний на весах *2* и *3* позволяет определить положение суммарной силы, а следовательно, и ее вращающий момент.

Силу сопротивления можно определить и другим путем, а именно: измеряя давление и силу трения по всему контуру модели и затем суммируя их. Но этот способ кропотлив и достаточно сложен.

3. При продувке моделей в аэродинамических трубах для соблюдения натурных Re потребовалось бы создавать потоки, во много раз превышающие скорость движения в натуре (скорость должна быть больше натурной во столько раз, во сколько раз модель меньше натурных размеров тела). Это сопряжено с большими чисто техническими трудностями. Кроме того, при таких скоростях пришлось бы уже считаться со сжимаемостью воздуха. Поэтому при продувках моделей Re обычно не равны натурным. Это вполне допустимо, если изменение коэффициента сопротивления в зависимости от Re незначительно.

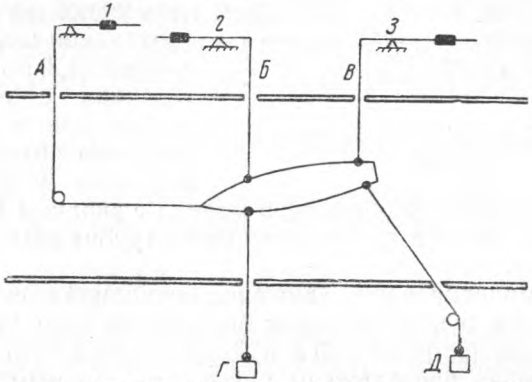


Рис. 18. Аэродинамические весы и способ подвески модели в трубе

При увеличении Re роль вязких сил, как уже говорилось, уменьшается. Это и дает возможность получать приближенное совпадение с натурой и при несовпадении Re. Но для этого надо продувать модель при различных скоростях, с тем чтобы иметь возможность убедиться, что наступили такие условия, когда коэффициенты сопротивления стали независимыми от Re. Такое обтекание тела называется автомодельным.

В случае, если надо получить более точные данные, увеличивают размер трубы и модели (в авиации вплоть до натурных).

Значение Re до натурных можно увеличить другими средствами. Для этого модель испытывают в воде или в сжатом воздухе, имеющих меньшие коэффициенты кинематической вязкости. Но испытания моделей в воде связаны с большими техническими трудностями, и поэтому обычно, когда идут по этому пути, пользуются сжатым воздухом. Давление в таких трубах достигает 20 *атм*. При скоростях продувки, равных натурным скоростям в воздухе, такое давление обеспечивает получение натурных чисел Рейнольдса для моделей, построенных в масштабе 1 : 20.

При моделировании в аэродинамических трубах движение тел, целиком погруженных в жидкость, кроме описанных выше, других затруднений не возникает. Но они появляются в том случае, когда приходится моделировать движение тела на границе раздела двух сред, например движение судна. Для продувки надводной части судна, а если пренебрегать волновым сопротивлением, то и подводной его части приходится строить модель с экраном, изображающим поверхность раздела. Исследование такой модели связано с рядом неудобств, и поэтому обычно прибегают к другому способу, а именно: продувают модель одной из частей судна (подводной или надводной), сочлененной по плоскости ватерлинии с ее зеркальным отображением. Легко показать, что обтекание каждой половины модели будет кинематически подобно обтеканию модели с экраном (рис. 19). Модели для продувки в аэродинамических трубах обычно изготовляют из дерева.

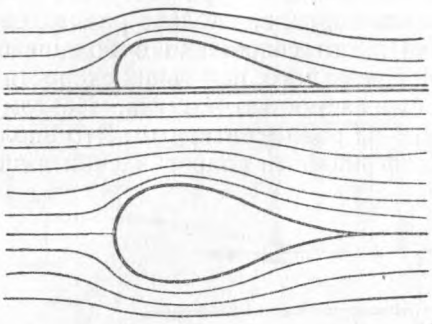


Рис. 19. Использование сдвоенных моделей

4. Для моделирования движения подводной части судов обычно пользуются буксировочными бассейнами (рис. 20). Длина таких бассейнов достигает 500 *м* и более, ширина — от 3 до 12 *м*. По краям бассейна расположены рельсы, по которым движется тележка. На этой тележке устанавливают весы принципиально та-

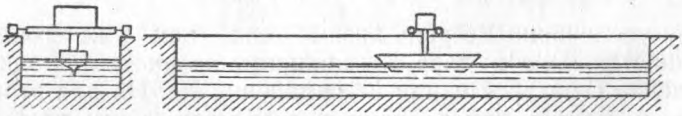


Рис. 20. Буксировочный бассейн

кого же типа, как и весы в аэродинамических трубах. К державкам, соединенным с коромыслами весов, крепится модель, которую можно установить под различными углами к движению и при различных углублениях. Скорость движения каретки замеряют в момент прохождения рабочего участка *AB*.

Чтобы учесть влияние винтов на величину силы сопротивления, пользуются самоходными моделями. Для буксировок модель изготовляют из парафина. Самоходные модели имеют деревянный каркас, облицованный толстым слоем парафина. Внутри каркаса устанавливается электродвигатель. В этом случае определяют непосредственно возможную скорость движения модели, а следовательно, при условии подобия — и судна.

Так как коэффициент волнового сопротивления очень сильно зависит от Fr, то при моделировании требуется точное соответствие его натурной величине.

При буксировке в воде модель приходится изготовлять довольно больших размеров, чтобы не требовалось значительного увеличения скорости движения против натурной. Это и приводит к необходимости строить бассейны больших размеров. По закону Фруда скорости у модели и натуры должны относиться как корень квадратный из отношения их размеров.

Парафин выбран для моделей как материал, легко поддающийся тонкой обработке.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ СУДНА И СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА СУДНО

§ 1. ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ СУДНА

Выражения для сил, действующих на судно, мы возьмем в виде, принятом в экспериментальной гидродинамике и аэродинамике,

$$A=C_{(\delta)}\frac{\rho}{2}SV^2; \qquad R=C_{0(\beta,i)}\frac{\rho_0}{2}S_0V_0^2. \tag{27}$$

В этих формулах A обозначает силу, действующую на надводную часть судна, т. е. силу давления ветра: буквой R обозначена сила, действующая на подводную часть судна, т. е. сила сопротивления воды движению судна. Другие буквы имеют следующие значения:

ρ — плотность воздуха, равная при 10° 0,127 $\frac{кг\cdot сек^2}{м^4}$;

ρ_0 — плотность воды, равная при 10° 102 $\frac{кг\cdot сек^2}{м^4}$;

S — площадь проекции надводной части судна на фиксированную плоскость в $м^2$;

S_0 — площадь проекции подводной части в $м^2$;

V — скорость ветра, ощущаемого на движущемся судне и складывающегося из истинного ветра и кажущегося ветра, возникающего вследствие движения судна (рис. 21);

V_0 — истинная скорость движения судна, т. е. скорость истинного смещения с учетом угла дрейфа;

$C_{(\delta)}$ — коэффициент сопротивления для надводной части судна;

$C_{0(\beta,i)}$ — коэффициент сопротивления для подводной части судна;

δ — курсовой угол кажущегося ветра;

β — угол дрейфа;

i — угол поворота пера руля.

Если скорость ветра и скорость движения судна измерять в δ *м/сек,* то силы A и R будут выражаться в *кг.*

Остановим теперь свое внимание на очень важных величинах—коэффициентах сопротивления и $C_{(\delta)}$ и $C_{0(\beta,i)}$. Что это за величины и как они определяются? Коэффициенты сопротивления определяют влияние всех особенностей форм, характер поверхности и особенности движения тела.

Коэффициент $C_{(\delta)}$ зависит от формы надводной части и от курсового угла ветра, что отмечено δ в скобках, так как в зависимости от курсового угла ветра будет обдуваться поверхность различной формы. Коэффициент $C_{0(\beta,i)}$ зависит от формы подводной части.

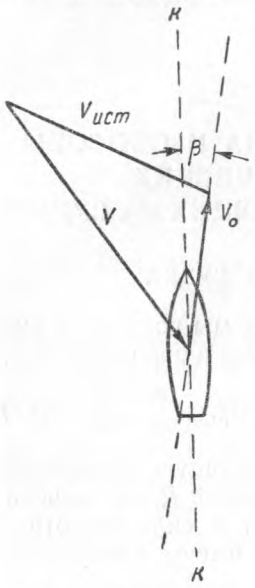


Рис. 21. Графическое определение кажущегося ветра

Вообще говоря, на величину этих коэффициентов влияет также скорость ветра или движения судна, так как при этом изменяется сила трения воздуха или воды о поверхность судна, входящая составной частью в общее сопротивление, которое оказывают воздух и вода движению судна. Но так как в исследуемой задаче и скорости ветра и скорости движения судна меняются в таких пределах, при которых эта зависимость изменяется незначительно, будем этим пренебрегать.

Коэффициенты сопротивления определяются экспериментальным путем. Для этого подводную и надводную части модели судна продувают в аэродинамических трубах или буксируют в специальных бассейнах. Если замерить с помощью весов силу давления потока воды или воздуха при продувках и буксировках модели и разделить полученное значение на квадрат скорости буксировки или квадрат скорости воздуха при продувке, а также соответственно на плотность воды или воздуха, на площадь поверхности надводной или подводной части модели, то получим величины, называемые коэффициентами сопротивления для модели. Если не учитывать той части сопротивления, которая связана с возникновением волны при движении судна или его модели, то оказывается одинаково возможным продувать в аэродинамических трубах или буксировать в лотке с водой надводную и подводную части судна. Так как буксировки под углом к диаметральной плоскости практически трудно осуществить, то при исследованиях обычно пользуются аэродинамическими трубами. Так как волновое сопротивление при нормальных ходах значительно меньше других составляющих сопротивления, то продувки подводной части судна в первом приближении оказываются достаточны-

ми для определения коэффициентов сопротивления. Для исследования случаев движения на больших скоростях и получения уточненных данных при определении коэффициентов сопротивления подводной части судна приходится проводить буксировку подводной части модели. Чем более обтекаемой будет форма тела, подверженная действию потока, тем меньше будет коэффициент сопротивления:

$$C_{(\delta)}=\frac{A}{\frac{\rho}{2}SV^2};\qquad C_{0(\beta,i)}=\frac{R}{\frac{\rho_0}{2}S_0V_0^2}. \tag{28}$$

В дальнейшем при всех расчетах, производимых для реального судна, пользуются значениями коэффициентов, полученных из экспериментов с моделями. Но для того чтобы такое перенесение было законным, требуется соблюдать некоторые условия: модель во всех основных чертах должна быть сходна с действительным судном, а при опытах величина $\frac{LV}{\nu}$, где L — длина модели, V —скорость продувок, ν — коэффициент кинематической вязкости, характеризующий среду, в которой движется тело, была приблизительно такой же, каковой будет эта величина для реального судна в действительных условиях его движения. Величина $\frac{LV}{\nu}$, как уже указывалось, называется числом Рейнольдса и обозначается через Re.

Таким образом учитывается зависимость коэффициента сопротивления от Re. Но практика показывает, что коэффициенты сопротивления заметно зависят от Re только в случаях хорошо обтекаемых тел и практически не зависят от этой величины, когда тело плохо обтекаемое. Так как подводная часть судна и тем более его надводная часть при движении с углом дрейфа при боковых ветрах представляют собой тела плохообтекаемые, то оказывается незначительной и зависимость их коэффициентов сопротивления от Re. Поэтому при использовании коэффициентов сопротивления, полученных экспериментально, для расчетов на практике достаточно, чтобы совпадал лишь порядок величины Re. В большинстве случаев это допустимо и для коэффициентов сопротивления при $\beta=\delta=0$.

При буксировках подводной части моделей судов подобие с действительностью сохраняется полное. Для того чтобы учесть наличие поверхности раздела при продувках, последние проводятся с экраном у модели, как это показано на рис. 22. Но продувки с экраном трудны в практическом отношении, и поэтому при определении коэффициентов сопротивления таким путем пользуются сдвоенными моделями (рис. 23). Оказывается, обтекание этой модели будет таким же, как если бы продувалась одна половина при наличии экрана.

Таким образом, мы видим, что в коэффициенте сопротивления сосредоточиваются все неизвестные зависимости силы, действую-

щей на тело сложной формы при движении его в воздухе или воде и зависящей от формы тела и характера движения. Возможность найти величину коэффициента сопротивления опытным путем и позволяет обойти трудность нахождения аналитического выражения этих зависимостей.

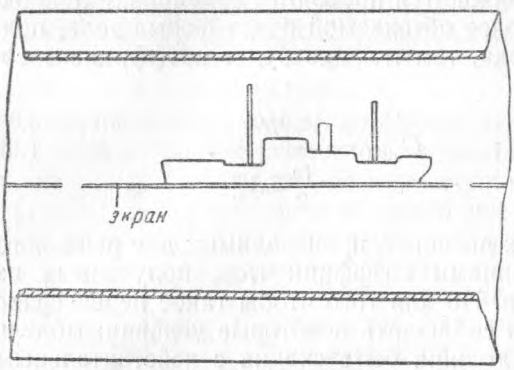


Рис. 22. Способ продувки модели с экраном

Но даже и при такой постановке решение общего случая движения судна, т. е. с переменными скоростями хода и на циркуляциях, требует целого ряда допущений.

Если не учитывать влияния всех видов качки судна на его движение, что в первом приближении возможно, то задача сведется к решению системы дифференциальных уравнений такого вида:

$$F - N_{x(i,\beta,\omega)} - X_{0(i,\beta,\omega)} - X_{(\delta)} - \frac{m_y V_0^2}{r}\sin\beta - m_x\frac{dV_0}{dt}\cos\beta = 0, \quad (29)$$

$$-N_{y(i,\beta,\omega)} + Y_{0(i,\beta,\omega)} - Y_{(\delta)} - \frac{m_x V_0^2}{r}\cos\beta + m_y\frac{dV_0}{dt}\sin\beta = 0, \quad (30)$$

$$[N_y l + Y_0 a]_{(i,\beta)} - \mathfrak{M}_\omega - Y_{(\delta)} b_{(\delta)} - I_z \varphi'' = 0, \quad (31)$$

$$\varphi = \psi + \beta, \quad (32)$$

$$r = \frac{ds}{d\psi} = V_0\frac{dt}{d\psi} = \frac{V_0}{\frac{d\psi}{dt}}. \quad (33)$$

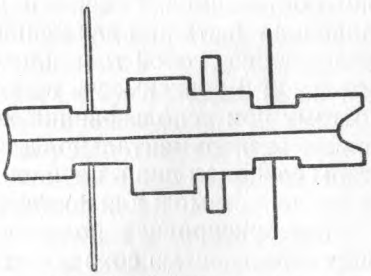


Рис. 23. Сдвоенная модель надводной части

Эти уравнения движения судна, как и всякие уравнения движения, составляются, исходя из того, что непрерывно изменяющиеся силы и моменты их, действующие на судно, в каждый сколь угодно малый момент времени, взаимно уравновешиваются и сумма их или их составляющих частей равна нулю. Таким образом, в общем случае движения активные силы и их моменты уравновешиваются силами и моментами сопротивления, силами и моментами инерции. Расположение сил, действующих на судно во время движения, изображено на рис. 24. Первое уравнение представляет собой равенство нулю суммы про-

екций всех сил на ось x. Ось x принята совпадающей с диаметральной плоскостью судна, и, следовательно, это уравнение характеризует движение судна вдоль диаметрали.

Второе — уравнение проекций сил на ось y, перпендикулярную диаметральной плоскости судна. Оно выражает движение судна в этом направлении. Вместе эти уравнения выражают движение центра тяжести судна параллельно водной поверхности по неко-

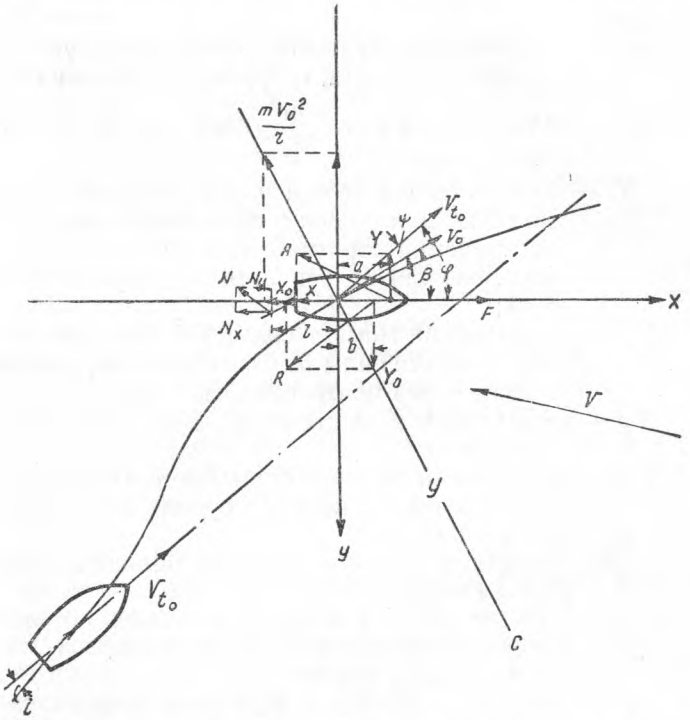


Рис. 24. Расположение сил, действующих на судно, в общем случае движения

торой кривой линии. Третье — уравнение вращающих моментов сил, действующих на судно, которые в сумме также равны нулю. Это уравнение выражает вращение судна вокруг оси, проходящей отвесно через центр тяжести судна.

Решение системы этих уравнений хотя и представляет определенные трудности, но при некоторых упрощающих допущениях и дополнительных уравнениях, связывающих угол дрейфа с углом поворота ψ, [уравнение (32)] и радиус циркуляции со скоростью движения [уравнение (33)], возможно.

Расшифруем обозначения, использованные при составлении этих уравнений.

F — сила упорного давления винта;

X — составляющая по оси x силы давления ветра;

X_0 — составляющая по оси x силы сопротивления воды, оказываемой корпусу судна (без руля);

N_x — составляющая по оси x силы, действующей на руль;

$\frac{mv^2}{R}$ — центробежная сила на циркуляции,

где:

$m_{x,y}$ — масса судна (включая присоединенную массу),

V_0 — скорость движения, r — радиус циркуляции;

$m\frac{dv_0}{dt}$ — сила инерции, где $\frac{dv_0}{dt}$ — изменение скорости, т. е. ускорение;

Y — составляющая по оси y силы давления ветра;

Y_0 — составляющая по оси y силы сопротивления воды, оказываемой корпусу судна (без руля);

N_y — составляющая по оси y силы, действующей на руль;

$N_y l$ — вращающий момент силы, действующий на руль, где l — плечо силы относительно оси, проходящей отвесно через центр тяжести судна;

Yb — вращающий момент силы давления ветра, где b — плечо силы;

$Y_0 a$ — вращающий момент силы сопротивления воды, действующей на корпус судна (без руля), где a — плечо силы;

$\mathfrak{M}$ — момент сопротивления воды вращательным движениям судна;

I_z — момент инерции относительно оси, проходящей отвесно через центр тяжести судна;

φ — угол поворота судна;

φ'' — изменение скорости разворота судна — угловое ускорение $\frac{d\omega}{dt}$, где ω — угловая скорость;

β — угол дрейфа судна.

Следует заметить, что силы сопротивления, действующие на корпус и руль судна, а следовательно, и каждая из составляющих X_o, Y_o, N_x, N_y включают две части: силу сопротивления, возникающую от поступательного движения судна, и силу сопротивления, возникающую от вращательных движений судна. Для простоты написания уравнений эти части объединены под одним обозначением. Знаки i, β, ω, помещенные в скобках, указывают на зависимость сил от этих величин.

Уравнения (29), (30), (31), (32), (33) являются достаточно общими и достаточно сложными уравнениями движения судна, решение которых позволяет дать ответ на большинство практически важных вопросов, связанных с движением судна. В настоящей

книге будут рассмотрены лишь некоторые частные случаи движения судна, общие же уравнения приведены для того, чтобы показать общие основы решения задач о движении судна, пути упрощения решений и способы перехода к частным задачам.

Одним из наиболее часто встречающихся, а следовательно, и наиболее важным в практическом отношении случаем является движение по заданному курсу с постоянной скоростью. Именно для такого случая движения судна определение поправки на дрейф наиболее важно.

Не менее важным частным случаем в изучении влияния ветра на движение судна является случай движения судна с остановленными машинами в период, когда скорость движения его стала постоянной. Но прежде чем дрейф с остановленными машинами достигает своего установившегося значения в течение какого-то промежутка времени, судно разворачивается по отношению к ветру до некоторого определенного угла. В течение этого промежутка изменяются и скорость дрейфа судна и величина курсового угла ветра. Изучение движения судна под действием ветра в этот период представляет также значительный практический интерес, так как позволяет определить время разворота судна до опасного положения во время сильного волнения — лагом к волне. Знать скорость разворота судна под действием ветра необходимо и при маневрировании судна на ограниченных акваториях: в портах, на рейдах, в каналах и узкостях. К этому вопросу очень близко примыкает и вопрос о потере управляемости судна на малых ходах при ветре, большое практическое значение которого очевидно.

В этой книге, кроме этих четырех частных случаев движения судна при ветре, будет рассмотрено также влияние ветра на характер рыскания судна. Это необходимо, так как неравномерное рыскание, возникающее при действии ветра на движущееся судно, приводит к уходу судна с линии заданного курса на величины, нередко превышающие величину дрейфа.

При решении этих частных случаев общую систему уравнений движения (29), (30), (31), (32), (33) удается упростить и решать отдельные уравнения ее, что значительно облегчает поставленную задачу.

Так, для решения первых двух вопросов: дрейф судна, находящегося в прямолинейном движении, и дрейф «на стопе», достаточно решить одно из двух первых уравнений или уравнение, объединяющее их в одно векторное уравнение.

Для выяснения же всех вопросов, связанных с разворотом судна под действием ветра, а к таким вопросам относятся и разворот судна под действием ветра при остановленных машинах, и потеря управляемости на малых ходах при ветре, и неравномерное ветровое рыскание судна, придется решать лишь одно третье уравнение системы — уравнение вращающих моментов сил, действующих на судно.

Но какую бы общую или частную задачу о движении судна мы ни решали, всегда понадобится определить величины гидродинамических сил, действующих на судно, а следовательно, и величины коэффициентов сопротивления, от которых эти силы зависят.

§ 2. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНА

1. Наиболее точно величина коэффициента сопротивления надводной части и его зависимость от курсового угла ветра определяется путем продувок модели судна. К настоящему времени мы располагаем продувками надводных частей довольно большого числа различных судов, но эти продувки в большинстве своем ограничивались только углом δ, равным 0, т. е. модель продувалась с носа, потоком, параллельным диаметральной плоскости. Имеющиеся круговые продувки моделей охватывают лишь небольшую группу судов различного типа. Материалы этих продувок позволяют составить представление об общем характере зависимости C от δ и дают возможность, хотя и очень приближенно, выбрать эти зависимости для судов наиболее распространенных типов.

При продувках обычно определяется не полный коэффициент сопротивления, а его составляющие по осям x и y — C_x, C_y. Ось x лежит в плоскости диаметрали, а ось y направлена нормально к ней.

Для получения значения полного коэффициента C достаточно воспользоваться формулой $C = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}$.

Перечень моделей, результаты исследований которых были использованы при разработке вопроса о вычислении угла дрейфа судна, приведен в табл. 1. В этот перечень включены все модели независимо от того, какая из их частей исследовалась: надводная, подводная или та и другая.

Таблица 1

№ п/п	Модель	Способ исследования и что исследовалось
1	Танкер (рис. 25)	Буксировка в воде опрокинутых и погруженных по ватерлинию моделей надводной части под углом от 0 до 180° и подводных от 0 до 10°
2	Быстроходный грузовой пароход (рис. 26)	
3	Лайнер (рис. 27)	
4	Современное быстроходное судно	Продувка в аэродинамической трубе сдвоенных моделей надводной части и подводной части под углом от 0 до 180° при различных положениях пера руля у подводной части
5	Схематизированные и полные модели (20) надводных частей различных речных судов (рис. 28)	Круговая (от 0 до 180°) продувка сдвоенных моделей и моделей с экраном

Продолжение

№ п/п	Модель	Способ исследования и что исследовалось
6	Модели (10) различных подводных частей речных судов (см. рис. 28)	Круговая и частичная, от 0 до 20°, продувка сдвоенных моделей в аэродинамической трубе
7	Бригантина (рис. 29)	Гидродинамические характеристики подводной части корпуса при углах набегания потока от 0 до 10—15° и различных положениях пера руля
8	Яхта (рис. 30)	
9	Парусно-моторная лодка: а) со швертом б) без шверта (рис. 31)	
10	Три схематизированные подводные части парусных судов (рис. 32).	Гидродинамические характеристики при различных углах набегания потока

Основные размеры перечисленных моделей морских судов (см. рис. 25, 26, 27) приводятся в табл. 2, 3 и 4.

Таблица 2

№ п/п	Модель	Максимальная длина в *м*	Максимальная ширина в *м*	Осадка в *м*
1	Танкер	5,3	0,67	0,33
2	Быстроходный грузовой пароход . .	5,4	0,67	0,18
3	Лайнер	5,1	0,57	0,23
4	Современное быстроходное судно	1,4	0,20	0,10

Размеры моделей (см. рис. 28) надводных частей речных судов даны в табл. 3.

Таблица 3

№ модели	$\frac{L}{B}$	$\frac{L_1}{B}$	$\frac{B}{H}$	$\frac{L}{H}$	$\frac{L_1}{H}$	Примечания
1						Основной вариант
2						В корме уступ надстройки в виде открытого балкона
3						Балкон в корме закрыт
4						Открытый балкон в корме на второй палубе
5	6,25	5,0	1,45	9,4	7,5	Двухостровное судно
6						Трехостровное судно
7						Трехостровное судно со сплошной тентовой палубой
8						Сквозной проход с борта на борт на второй палубе
9						Два сквозных прохода с борта на борт на второй палубе

Продолжение

№ модели	$\frac{L}{B}$	$\frac{L_1}{B}$	$\frac{B}{H}$	$\frac{L}{H}$	$\frac{L_1}{H}$	Примечание
10	6,25	5,0	2,0	12,6	10,0	По сравнению с моделью 1 уменьшена высота
11	6,25	5,0	8,0	50,0	10,0	То же по сравнению с моделями 1 и 10
12	11,2	—	1,8	21,0	—	Дублированная модель
13	12,5	—	1,1	13,9	—	То же
14	7,5	—	1,8	13,5	11,0	Речной колесный пароход
15	5,0	—	2,0	10,0	—	Речной колесный теплоход
16	10,0	—	1,6	6,2	—	Вариант теплохода для канала Москва-Волга
17	10,0	—	1,6	6,2	—	То же
18	7,5	—	1,2	9,0	—	» »
19	7,5	—	1,2	9,0	—	» »
20	8,7	—	1,0	8,3	—	» »

L — длина корпуса, L_1 — длина надстроек, H — углубление, B — ширина.

Размеры моделей (рис. 28) подводных частей речных судов приводятся в табл. 4.

Таблица 4

№ модели	$\frac{L}{B}$	$\frac{B}{H_0}$	$\frac{L}{H_0}$	ψ	Примечания
21	7,0	3,5	25,0	—	Дублированная модель
22	5,0	3,5	17,5	—	То же
23	7,0	1,15	8,0	—	» »
24	12,5	1,10	14,0	—	» »
25	9,0	1,10	10,0	—	» »
26	7,5	2,50	19,0	0,5	Санная корма с плоским дейдвудом
27	6,0	3,60	21,6	0,5	Нос-ложка и санная корма без плоского дейдвуда
28	6,0	2,50	15,0	0,5	То же, что и модель 26
29	7,1	4,10	29,1	0,8	Прямые штевни
30	7,1	4,0	29,1	0,85	Нос-ложка, санная корма

H_0 — осадка, ψ — коэффициент полноты.

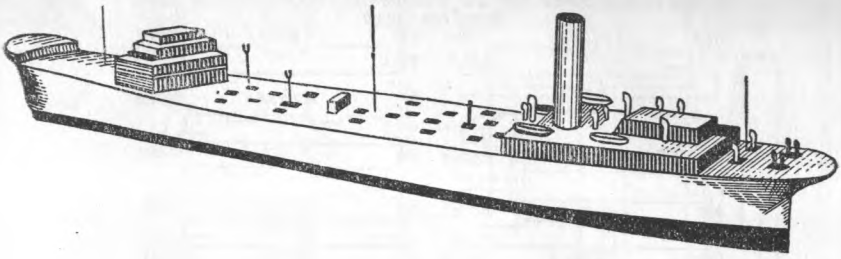


Рис. 25. Модель (970 *А*) надводной части судна, буксировавшейся в перевернутом положении (танкер)

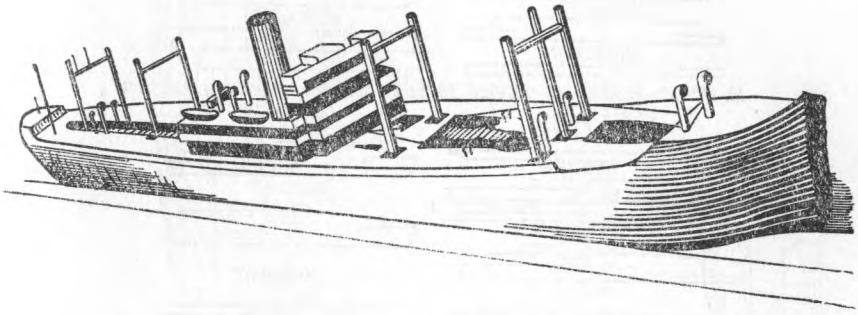


Рис. 26. Модель (1057 *А*) надводной части судна, буксировавшейся в перевернутом положении (быстроходный грузовой пароход)

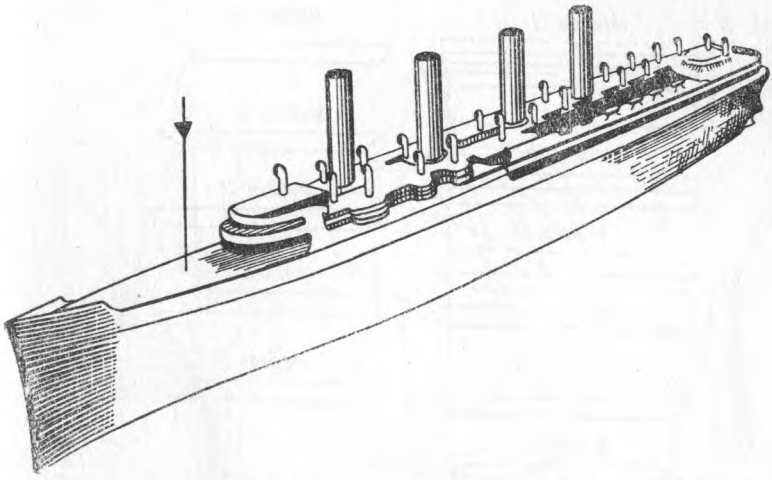


Рис. 27. Модель (1086 *А*) надводной части судна, буксировавшейся в перевернутом положении (лайнер)

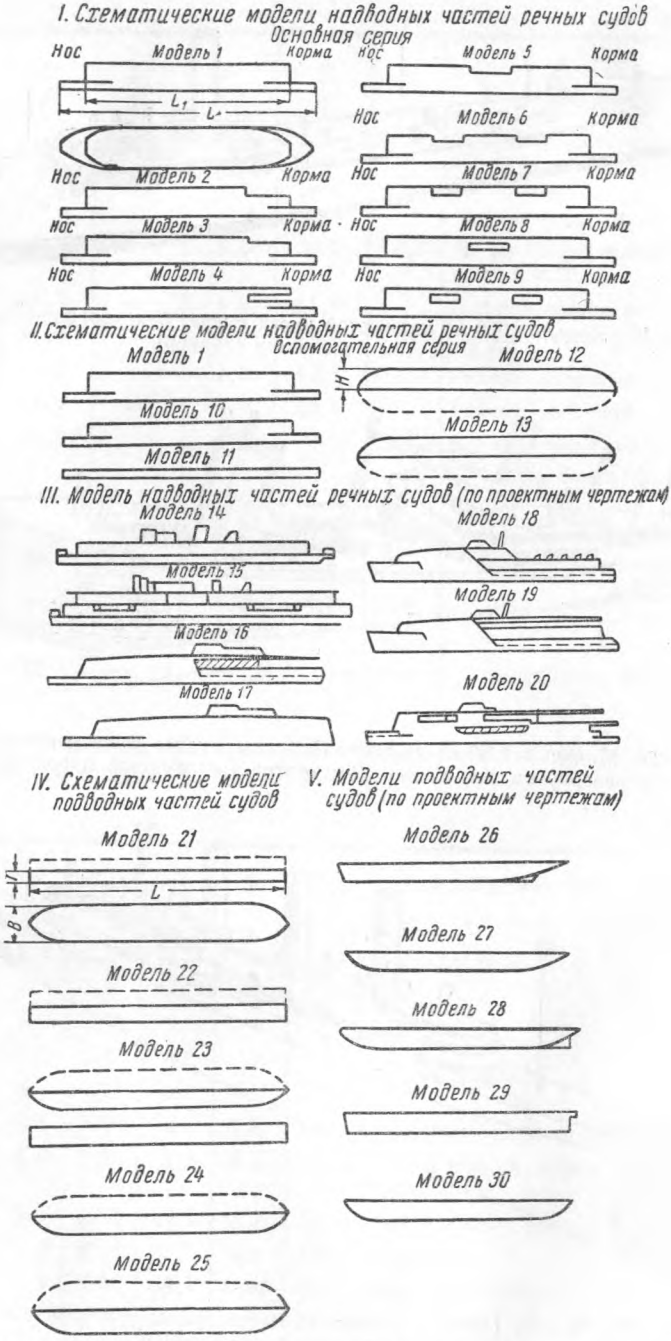


Рис. 28. Схематические модели подводных и надводных частей речных судов

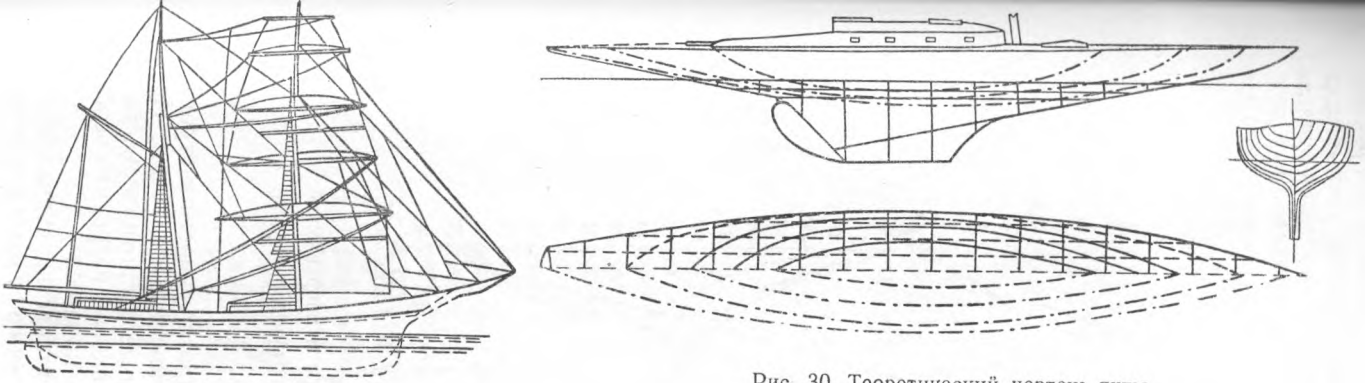


Рис. 30. Теоретический чертеж яхты

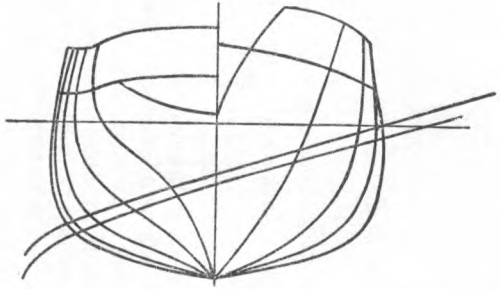


Рис. 29. Теоретический чертеж бригантины

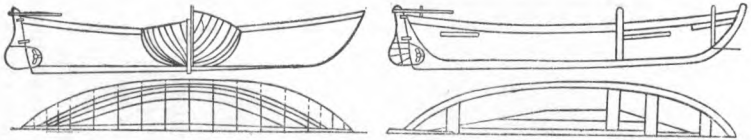


Рис. 31. Теоретический чертеж парусно-моторной лодки

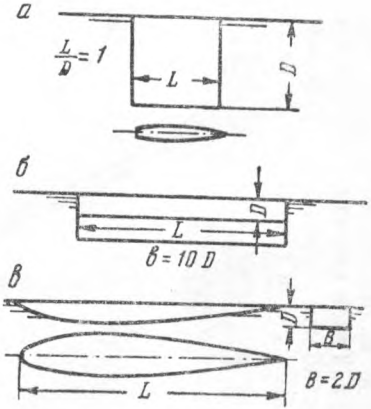


Рис. 32. Схематизированные модели подводных частей

Как видим, большое место занимают продувки моделей речных судов. Такое внимание к изучению влияния ветра на речные суда вызвано изменившимися требованиями, предъявляемыми к речным судам в связи с выходом их на обширные водохранилища, с дви-

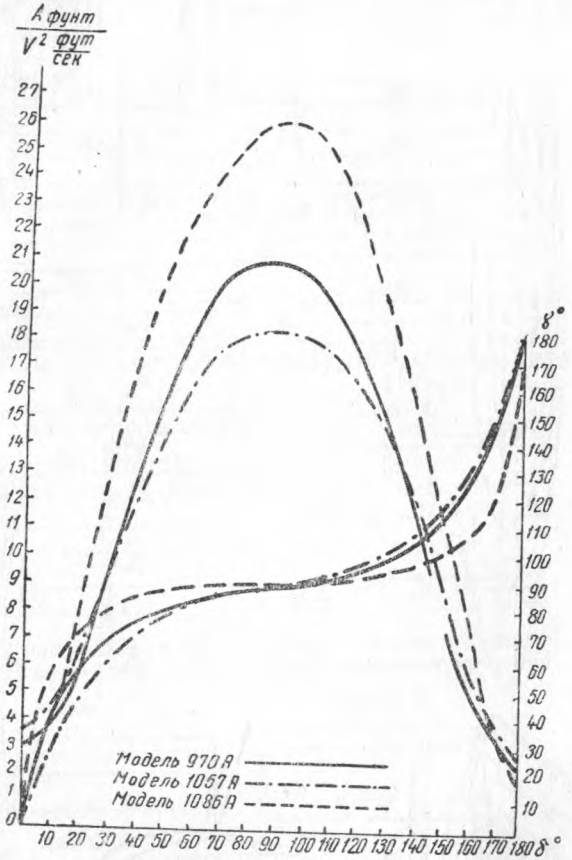


Рис. 33. Зависимость отношения $\frac{A}{V^2}$ и направления результирующей силы давления от курсового угла ветра

жением их по узким каналам большой протяженности и стремлением строить комфортабельные многопалубные пароходы. Цель этих исследований — определить воздушное сопротивление пароходов, дрейфа их и управляемость при боковом ветре, что особенно важно для случаев движения в узких каналах.

Зависимость аэродинамических характеристик судна от курсового угла ветра для трех первых по перечню судов и для речных

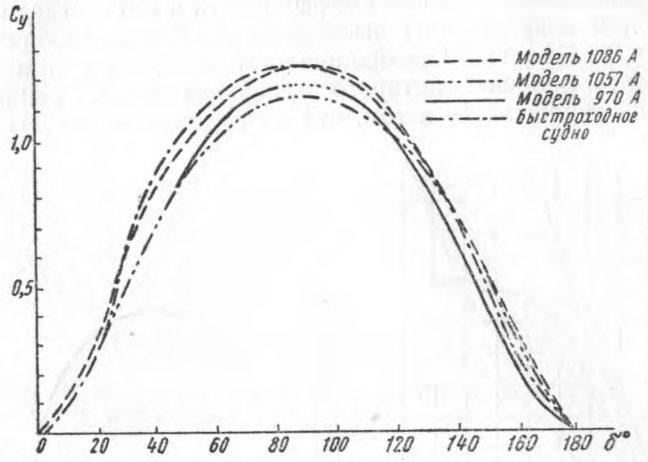


Рис. 34. Коэффициенты нормальных составляющих силы давления ветра в зависимости от курсового угла δ

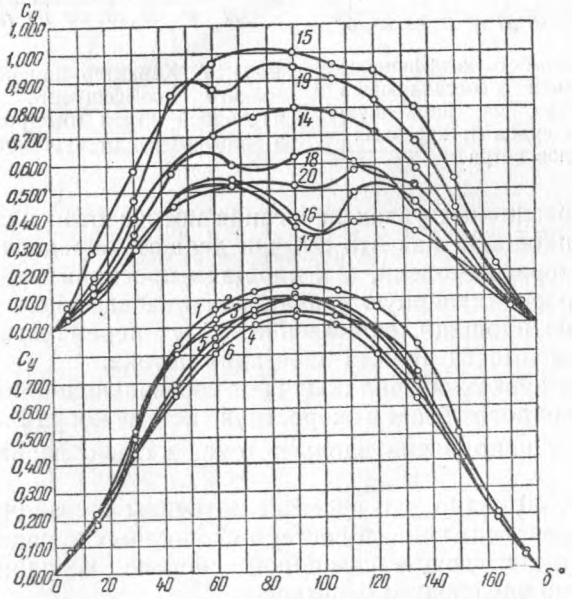


Рис. 35. Зависимости коэффициента поперечной составляющей давления ветра на надводную часть речных судов от курсовых углов ветра

судов изображена на рис. 33, 34, 35, 36. Зависимости коэффициентов сопротивления (полного коэффициента и его составляющей по оси y) для современного быстроходного судна изображены на рис. 37 и 38. На рис. 39 изображена кривая изменения полного коэффициента, величины которого вычислены иначе. Разница в вычислениях заключается в том, что сила давления воздуха на мо-

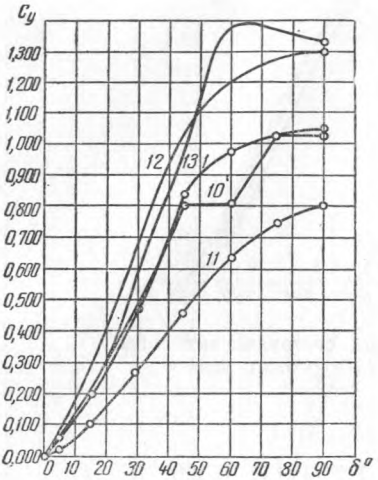


Рис. 36. Зависимость коэффициента поперечной составляющей давления ветра на надводную часть речных судов от курсовых углов ветра

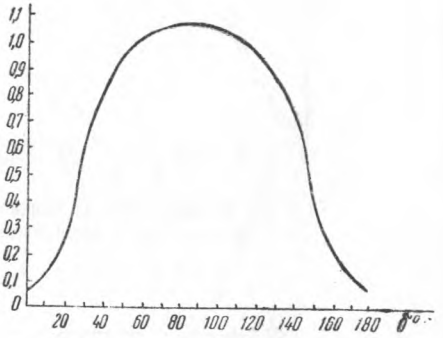


Рис. 37. Характер изменения величины полного коэффициента сопротивления надводной части (быстроходное судно) в зависимости от курсового угла ветра

дель при различных углах набегания потока относилась не к постоянной площади, как это обычно делают, определяемой основными размерами модели, а к площади проекции модели на плоскость, перпендикулярную направлению набегающего потока воздуха. Такие площади, естественно, будут переменными по величине в зависимости от угла набегания потока.

При продувках обычно получают составляющие полного коэффициента сопротивления в скоростной системе координат $C'_{x'}$, $C'_{y'}$, когда ось x направлена вдоль потока, а ось y перпендикулярно потоку.

На рис. 40 видно, что пересчет величины составляющих коэффициента сопротивления в системе скоростных координат в величины, соответствующие связанной системе координат, осуществляется по следующим формулам:

$$C_y = C^1_{y'}\cos\delta + C^1_{x'}\sin\delta,$$

$$C_x = -C^1_{y'}\sin\delta + C^1_{x'}\cos\delta.$$

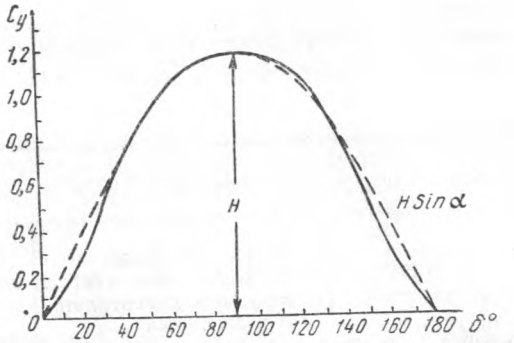


Рис. 38. Изменение осредненного для трех моделей (970А, 1057А, 1086А) значения C_y в зависимости от угла δ

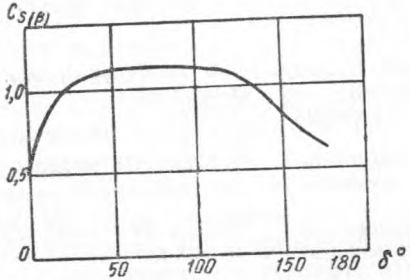


Рис. 39. Характер изменения величины полного коэффициента сопротивления, отнесенного к переменным площадям, в зависимости от δ

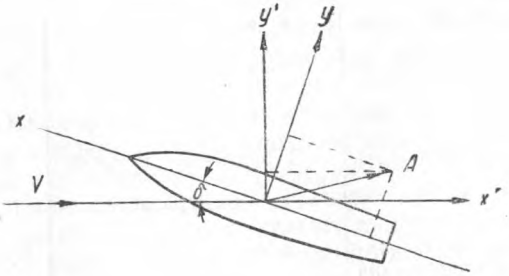


Рис. 40. Определение сил, действующих на судно, и коэффициентов сопротивления в скоростной и связанной системе координат

Эти формулы справедливы для углов δ в пределах от 0 до 90°. для углов от 90 до 180° у первых членов правой части знаки следует изменить на обратные.

Воспользовавшись материалом модельных испытаний, составим таблицу (табл. 5) значений $C_{(0°)}$ (полный коэффициент

Таблица 5

№ п/п	Тип судна	Степень схематизации	$C_{(0°)}$	$C_{(90°)}$
1	Танкер	Модель со всеми надстройками, без перил стоек, малых вентиляторов и такелажа	0,31	1,22
2	Быстроходный грузовой пароход	То же	0,47	1,20
3	Лайнер	» »	0,34	1,15
4	Современное быстроходное судно	» »	0,49	1,07
5	Океанский пассажирский пароход обычного типа	Выставочная модель	1,37	—
6	То же, с полуобтекаемыми надстройками	Без такелажа и мелких надстроек	0,74	—
7	То же, с обтекаемыми надстройками	То же	0,34	—
8	Океанский пассажирский пароход обычного типа	Выставочная модель	0,91	—
9	То же, с обтекаемыми надстройками различных типов	Модель без такелажа и мелких деталей	0,32—0,43	—
10	Океанский пассажирский пароход	То же	0,86	—
11	Морской пассажирский пароход	» »	0,64	—
12	Океанский пассажирский пароход	» »	1,03	—
13	Морское грузовое судно	» »	0,45	—
14	Морской грузо-пассажирский пароход	» »	1,24	—
15	Морской танкер с тремя надстройками	» »	1,30	—
16	Небольшое пассажирское судно	С рангоутом и антенной	0,51	1,13
17	То же	Без рангоута и мелких деталей	0,44	1,13
18	Речное судно с надстройками обычного типа	То же	0,68—0,72	0,75—1,06
19	Речное судно с надстройками обычного типа	Без рангоута и мелких деталей	0,40—0,50	1,00—1,10
20	Речное судно с обтекаемыми надстройками	То же	0,36—0,42	0,40—1,00
21	Пластины нормальные к потоку.	—	—	1,20—1,28

сопротивления при $\delta=0°$— ветер в нос судна) и $C_{(90°)}$ (полный коэффициент сопротивления при $\delta=90°$ — ветер в борт судна). При таких направлениях ветра величины $C_{(0°)}$ и $C_{(90°)}$ совпадают, естественно, со значениями составляющих коэффициента соответственно по осям x и y. Эти два коэффициента являются определяющими аэродинамическими характеристиками судна. Площади, к которым относились величины коэффициентов, характеризовались для $C_{(0°)}$ поперечными, а для $C_{(90°)}$ продольными размерами судна. К сожалению, для многих судов мы не располагали проекциями судна на диаметральную плоскость (силуэт) и плоскость, перпендикулярную ей.

Приведенные результаты продувок позволяют сделать следующие основные выводы о зависимости полного коэффициента сопротивления надводной части судна от курсового угла ветра $C_{(\delta)}$

Полный коэффициент сопротивления надводной части судна обычно значительно изменяется лишь в пределах изменения курсового угла ветра от 0 до 40—45° и от 125—135 до 180°. В пределах изменения δ от 40—45° до 125—135° величина $C_{(\delta)}$ изменяется незначительно и практически может быть принята постоянной.

Величина $C_{(90°)}$ для различных судов, исключая специальные типы, изменяется незначительно. Некоторое противоречие этому утверждению, наблюдаемое в таблице, где коэффициента $C_{(90°)}$ для различных судов изменяется в пределах от 0,4 до 1,13, объясняется тем, что величины их относились не к истинной площади силуэта суда, а к условным площадям, не сравнимым для различных судов. К сожалению, мы не располагали для некоторых из них ни силуэтом судна, ни размерами, по которым определялась эта условная площадь, что необходимо для соответствующего пересчета коэффициентов. Если бы такой подсчет произвести, то коэффициент $C_{(90°)}$ для большинства судов был бы близок к величине 1,2.

Величина коэффициента $C_{(0°)}$ для различных типов судов меняется значительно и зависит от форм надстроек (обтекаемые или необтекаемые) и от соотношения размеров надстроек и корпуса, который представляет собой обтекаемое тело. Так, например, при низком корпусе и высоких прямоугольных надстройках коэффициент возрастает и приближается к его значению для $C_{(90°)}$, так как удельный вес хорошо обтекаемого корпуса становится малым по сравнению с удельным весом плохо обтекаемых надстроек. Для хорошо обтекаемых низких надстроек при высоком корпусе коэффициент $C_{(0°)}$ имеет минимальное значение. Можно считать, что для большинства судов при обтекаемых надстройках и в случаях, когда основную роль играют не надстройки, а корпус, значения $C_{(0°)}$ колеблются в пределах от 0,32, до 0,50; плохо обтекаемым и высоким надстройкам при низком корпусе соответствуют коэффициенты, меняющиеся обычно в пределах от 0,6 до 0,8.

Сквозные проходы в надстройках увеличивают значения коэффициентов в промежуточных углах от 20 до 70° и от 110 до 160°. Худшая обтекаемость судна при углах продувки 180° (с кормы)

обычно увеличивает коэффициент $C_{(180°)}$ по сравнению с коэффициентом $C_{(0°)}$ на 20—30%.

Некоторые кривые изменения $C_{(\delta)}$ обнаруживают одно интересное явление. Оказывается, полный коэффициент сопротивления не всегда имеет наименьшее значение при $\delta=0°$. У некоторых судов этот коэффициент достигает минимума при $\delta=8—10°$, причем это наблюдается у судов с плохо обтекаемыми надстройками. Такой своеобразный ход кривой изменения коэффициента сопротивления можно объяснить только одной причиной, а именно: при курсовом угле ветра, равном 8—10°, прямоугольные надстройки становятся лучше обтекаемыми и вызывают снижение величины общего коэффициента (корпус плюс надстройка). При расчете дрейфа с этой особенностью вряд ли стоит считаться, поскольку эффект дрейфа при углах δ, меньших 10°, невелик. Кроме того, практически на судне δ удается определить с точностью не более 10—5°. К этому следует добавить и тот факт, что обычно и направление ветра непрерывно изменяется в пределах этой точности.

В заключение следует сказать, что величина нормальной составляющей коэффициента C_y, будучи равной при $\delta=90°$ величине $C_{(90°)}$, изменяется в зависимости от δ почти точно по синусоидальному закону для всех типов судов. Эта величина не требуется в способе определения угла дрейфа, который будет здесь изложен, но мы остановились на ней, так как она потребуется при исследовании рыскливости и поворотливости судна.

Приведенные результаты исследований лишний раз убеждают, нас в том, что при определении дрейфа судна желательно располагать результатами продувки его модели. Но так как в настоящее время имеются продувки лишь незначительного числа всех существующих типов судов, а также, если учесть, что штурман не имеет возможности осуществить подобное исследование в своей практической деятельности, следует либо рекомендовать способ выбора зависимости C от δ по имеющимся продувкам, либо способ определения этой зависимости наблюдениями на самом судне при осуществлении маневров.

Выбирая зависимость C от δ, штурман должен подобрать тип судна, наиболее близкий к типу своего судна, и воспользоваться определенной для него зависимостью. Если для исследованного и выбранного судна имеются только данные о значении $C_{(0°)}$ и $C_{(50°)}$, следует воспользоваться ими как определяющими характеристиками и построить искомую зависимость, руководствуясь приведенными выше данными о том, что полный коэффициент сопротивления $C_{(\delta)}$ практически постоянен в пределах от 40 до 135°, а $C_{(180°)}$ превышает $C_{(0°)}$ приблизительно на 20—30%. В промежуточных значениях от 0 до 40° и от 135 до 180° можно считать, что величина коэффициента изменяется линейно, т. е. графически участок этой зависимости в указанных пределах представляет собой прямую линию; по мере накопления материалов продувок такой выбор зависимостей для данного судна будет уточняться.

2. Изложим теперь способы определения значений коэффициентов сопротивления для надводной части, в основе которых лежат наблюдения на судне в натурных условиях. Преимущества таких способов заключаются не только в том, что штурман имеет возможность непосредственно для своего судна определить требующиеся для нахождения угла дрейфа характеристики и в случае значительного изменения в надстройках вносить необходимые коррективы, но и в том, что этот способ позволяет учитывать ряд условий, которые не могут быть учтены в условиях лабораторного эксперимента. К таким условиям относятся, в частности, неоднородность потока ветра по вертикали, возникающая вследствие трения воздуха о поверхность воды, и влияние волнения и волнового сопротивления при определении коэффициентов сопротивления для подводной части.

Остановимся прежде всего на описании способа определения полного коэффициента сопротивления $C_{(90°)}$. Оказывается, величину этого коэффициента мы сможем определить по величине угла ветрового крена при дрейфе с остановленными машинами. Но так как угол ветрового крена у самоходных судов невелик, то наблюдения следует производить при достаточно сильном береговом ветре в зоне, где волна не развилась еще до значительных размеров. Таким образом, удается избежать влияния на крен ветрового волнения.

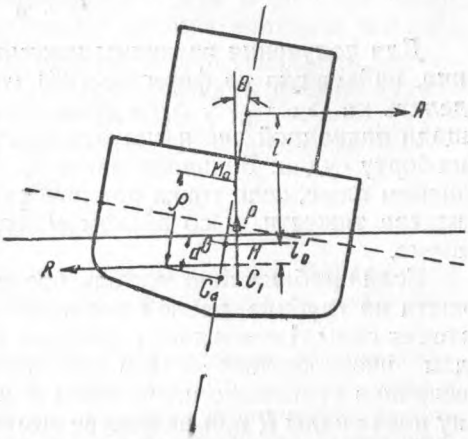


Рис. 41. Определение коэффициента сопротивления по углам ветрового крена судна

Ветровой крен дрейфующего судна будет определяться, как это видно из рис. 41, следующими величинами: метацентрической высотой, весом судна, кренящим моментом силы давления ветра на борт судна и кренящим моментом силы сопротивления воды движению судна. Так как при дрейфе с остановленными машинами судно ложится почти точно лагом к ветру, то величины сил A и R будут совпадать с величинами нормальных к диаметрали составляющих этих сил, определяющих величину крена. Кроме этого, если учесть, что наблюдение производится в момент, когда дрейф уже установился, силы A и R должны быть равны между собой.

Из рис. 41 видно, что для исследуемого случая движения можно записать следующее уравнение моментов:

$$(A\,l' + R\,l_0')\cos\Theta = P\,(\rho - a)\sin\Theta, \qquad (34)$$

где:

l' — кренящее плечо силы A;

l_0' — кренящее плечо силы R;

P — вес судна, равный его водоизмещению;

ρ — метацентрический радиус;

a — возвышение центра тяжести судна над центром величины;

θ — угол ветрового крена.

Если учесть, что $A=R$ и решить уравнение (34) относительно A, то мы получим следующую формулу:

$$A=\frac{P(\rho-a)}{l' \pm l_0'}-\operatorname{tg}\Theta. \qquad (35)$$

Для получения величины искомого коэффициента сопротивления, найденную по формуле (35) силу давления ветра надо разделить на $S_{(\delta)}\ {}^{\rho}/_{2}V^2$, $S_{(\delta)}$ в этом случае должно быть равным площади надводной части силуэта судна. V измеряется анемометром на борту судна. Величина плеча l_0 силы R входит в формулу со знаком плюс, если точка приложения силы R располагается ниже центра тяжести, и со знаком минус, когда эта точка находится выше.

Если приближенно считать, что сила R приложена к подводной части на глубине, равной половине осадки судна, а точка приложения силы A совпадает с центром площади силуэта его, то даже для низкобортных судов со слаборазвитыми надстройками величина кренящего плеча силы A в три раза превышает величину плеча силы R при равенстве самих сил.

Следовательно, для высокобортных судов с развитыми надстройками, величиной l_0' в некоторых случаях можно пренебречь. Тогда в формуле (35) l_0' из знаменателя исключается.

Описанный способ был проверен на практике.

Судно, характеризующееся следующими данными:

$$P=770\ \text{т},\ (\rho-a)=0{,}335\ \text{м},$$

$$l_0'=1{,}29\ \text{м},\ l'=3{,}5\ \text{м},\ S_{(90^\circ)}=306\ \text{м}^2$$

(площадь силуэта), дрейфовало под действием ветра, скорость которого равнялась 9 *м/сек*, развернувшись почти лагом (85°). Скорость дрейфа равнялась 0,45 *м/сек*, угол ветрового крена по кренометру был равен 2°.

Сила A, подсчитанная на основании приведенных данных по формуле (35), оказывается равной

$$A=\frac{770\,000\cdot 0{,}335}{3{,}5+1{,}29}\ 0{,}035=1890\ \text{кг}.$$

Чтобы определить величину $C_{(90°)}$, следует полученное значение силы A разделить на $\rho/_2\, S_{(90°)} V^2$:

$$C_{(90°)} = C_y = \frac{A}{\frac{\rho}{2} S_{(90°)}\, V^2} = \frac{2 \cdot 1890}{306 \cdot 0{,}127 \cdot 81} = 1{,}2.$$

Эта величина оказалась очень близкой к величине коэффициента $C_{(90°)} = 1{,}13$, полученного путем продувок модели судна, близкого по типу судну, на котором производилась проверка формулы (35).

Заметим кстати, что на основании этих же измерений можно определить и коэффициент сопротивления для подводной части судна. Для этого надо величину силы A, равную величине силы R, разделить на $\rho/_2\, S_{0\,(90°)} V_0^2$, т. е. на плотность воды, площадь диаметрали для подводной части и на квадрат скорости дрейфа судна.

Для испытываемого судна величина $C_{0\,(90°)}$ при $\rho/_2 = 51$, $V_0 = 0{,}45$ *м/сек*, $C_{0(90°)} = 186$ *м*^{2} оказалась по подсчетам равной

$$C_{0(90°)} = C_{0y} = \frac{1890}{186 \cdot 51 \cdot 0{,}2025} = 0{,}98.$$

Полученная же с помощью продувок для судна, близкого по типу к испытываемому, величина этого коэффициента оказалась 0,948.

3. Перейдем к описанию способов определения и поведения величины отклонения силы A от диаметральной плоскости судна в зависимости от угла набегания потока. Эта зависимость потребуется нам для определения угла дрейфа при решении задачи графическим путем.

Для наглядного пояснения характера отклонения силы A от плоскости симметрии тела рассмотрим результаты продувок тел некоторых характерных форм: цилиндра, пластины, тела некоторой промежуточной формы (рис. 42) и крыла (рис. 43).

В случае *1* направление силы A при всех углах набегания потока будет совпадать с направлением потока и соответствующая зависимость изобразится в виде прямой линии *АВГ* (рис. 42). В случае обдувания пластины, уже при малых углах набегания потока, отклонение силы A (угол) будет близким к 90°, а в случае идеальной жидкости (без трения) при плавном распределении давления зависимость изобразится линий *БВД*, т. е. при всех углах набегания потока угол отклонения силы A будет равен 90°. Для тела формы *3* зависимость γ от δ примет некоторые промежуточные между рассмотренными случаями значение.

Таким образом, линию *АВГ* можно принять за один из пределов рассматриваемой зависимости. Линия *БВД*, оказывается, не является вторым ее пределом.

Вторым пределом исследуемой зависимости является, как показывают продувки, зависимость, определенная для некоторого

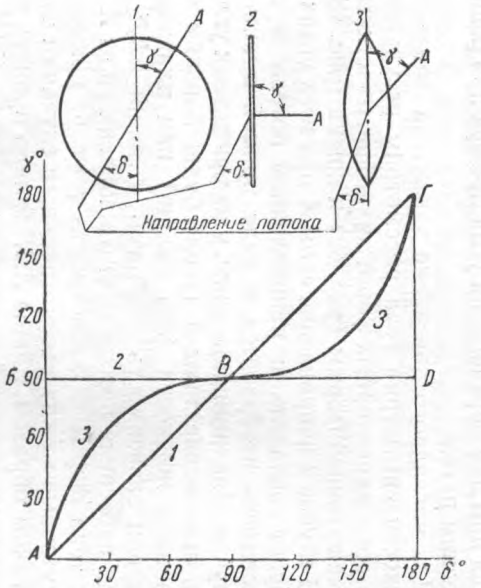


Рис. 42. Пределы изменения угла

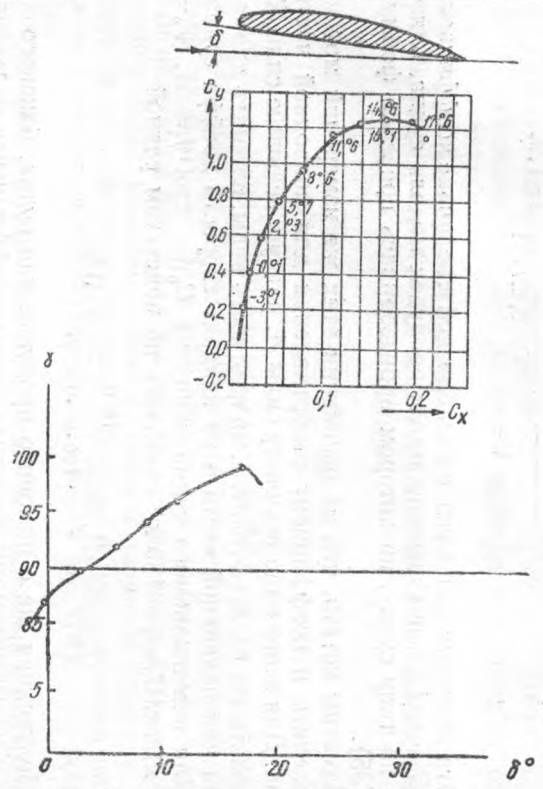


Рис. 43. Поляра крыла и построенная по ней зависимость γ от δ

профиля крыла, изображенного на рис. 43. Оказывается, что для таких форм сила A может отклоняться при некоторых углах δ от оси симметрии на углы γ, превышающие 90° (см. рис. 25). Это явление объясняется неравномерностью распределения давления по контуру профиля. Такое расположение силы очень выгодно для крыла, так как в связи с этим увеличивается подъемная сила его и уменьшается лобовое сопротивление, т. е. улучшается качество крыла.

Для наглядности сделаем простые построения, чтобы показать, как можно по поляре крыла (так называется кривая, изображенная на рис. 43 $C_y = f(C_x)$) построить интересующую нас зависимость.

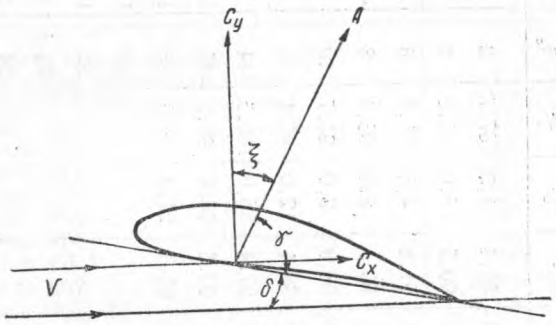


Рис. 44. Определение угла γ

Определим из поляры отношение $\frac{C_x'}{C_y'}$ для некоторого угла δ

Тангенс угла отклонения силы A от оси y (скоростные оси координат) равен этому отношению. Найденный по таблицам угол ζ следует отложить от оси y в сторону задней кромки крыла. Тогда искомый угол отклонения силы A окажется равным (рис. 44) $90+\delta-\zeta$. Отсюда очевидно, что максимальное значение γ наступит тогда, когда разность $\delta-\zeta$ также достигнет максимума. Это максимальное значение разности $\delta-\zeta$ легко найти графически, если вычертить кривые δ и ζ, вычисленные по данным поляры (рис. 43), отложив по оси x значения коэффициентов C_x' (рис. 45). Для приведенного профиля (он не является лучшим) $\delta-\zeta$ достигает максимума при значении δ, близком к 16° 5, и равняется приблизительно 8°, 6. В данном случае максимальное значение $\delta-\zeta$ соответствует максимальной ординате поляры, но это совпадение не всегда наблюдается.

Зависимость отклонения силы A от диаметральной плоскости судна была получена путем продувок сдвоенных моделей надводной части для современного быстроходного судна некоторых типов речных судов и трех моделей Хьюза. Эта зависимость дана на рис. 33, 46 и 47. Кроме этих материалов целесообразно привести вид искомой зависимости для симметричных профилей, полу-

Таблица 6

Профиль 683 (плоская пластина) (рис. 48)		Профиль 409 (рис. 49)		Профиль 410 (рис. 50)		Профиль 443 (рис. 51)		Профиль М-1 (рис. 52)		Профиль М-2 (рис. 53)		Профиль М-3 (рис. 54)		Профиль 0012 (рис. 55)		Профиль 0021 (рис. 56)		Профиль $B_{сим}$—12 (рис. 57)	
$\delta°$	$\gamma°$	$\delta°$	$\gamma°$	$\delta°$	$\gamma°$	$\delta°$	$\gamma°$	$\delta°$	$\gamma°$	$\delta°$	$\gamma°$	$\delta°$	$\gamma°$	δ_o	$\gamma°$	$\delta°$	$\gamma°$	$\delta°$	$\gamma°$
2	83,1	1,5	86,4	1,5	80,6	1,4	88,7	1,5	87,8	1,5	86,4	1,5	87,7	2	88,6	2	87,4	2	88,7
4	87,2	2,9	89,4	2,9	88,4	2,9	89,6	3,0	90,3	3,0	90,2	3,0	89,9	4	91,1	4	90,4	4	91,4
6	88,5	4,4	91,3	4,4	91,0	5,8	90,5	4,5	92,1	4,5	91,8	4,5	91,8	6	93,3	6	92,7	6	93,2
8	90,0	5,9	92,6	5,9	92,9	8,8	90,0	6,0	93,4	6,0	93,5	6,0	93,4	8	94,8	8	94,8	8	94,8
10	89,2	8,8	95,0	8,8	95,2	11,7	89,2	9,0	96,0	9,0	96,0	9,0	95,7	10	96,8	10	96,6	10	96,3
12	89,1	11,7	97,2	11,7	97,5			12,0	94,6	12,0	98,1	12,0	98,1	12	98,2	12	98,2	12	97,8
14	88,9	14,7	94,0	14,7	100,2			15,0	91,2	15,0	97,4	15,0	100,5	14	99,0	14	99,8	14	99,3
16	88,8	17,7	94,7	17,7	95,5			18,0	90,0	18,0	92,5	18,0	99,2	16	101,4	16	101,2	16	93,9
18	88,9			20,7	92,0			21,0	89,2	21,0	91,1	21,0	94,6	18	102,8	18	102,9	18	92,4
20	88,8													20	104,4	20	104,2		
22	89,2													22,1	105,7	22,2	104,3		
24	89,2													22,1	99,7	22,2	103,0		
26	89,2													24	97,5	24	103,5		
														28	93,9	26	102,6		
														30	94,2	28	101,6		
																30	99,9		

ченных также путем продувок нашими и зарубежными авторами. На рис. 48—57 изображены поляры для десяти различных симметричных профилей. По этим полярам можно определить зависимость γ от δ. Эти данные нам понадобятся и при исследовании отклонения силы R от диаметрали судна.

Цифровые данные, на основании которых строились кривые на рис. 48—57, и некоторые сведения о профилях, подвергшихся испытаниям, приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 7

№ п/п	Наименование профиля	Относительная толщина $c=\frac{B}{L}$	Относительный размах $\lambda=\frac{H}{L}$
1	Сдвоенная модель современного быстроходного судна (подводная часть)	0,1	0,038
2	Профиль 683 (плоская пластина)	0,020	5
3	Профиль 409	0,127	5
4	Профиль 410	0,161	5
5	Профиль 443	0,050	5
6	Профиль М-1	0,062	6
7	Профиль М-2	0,081	6
8	Профиль М-3	0,119	6
9	Профиль 0012	0,120	6
10	Профиль 0021	0,210	6
11	Профиль $B_{сим}$-12	0,120	5

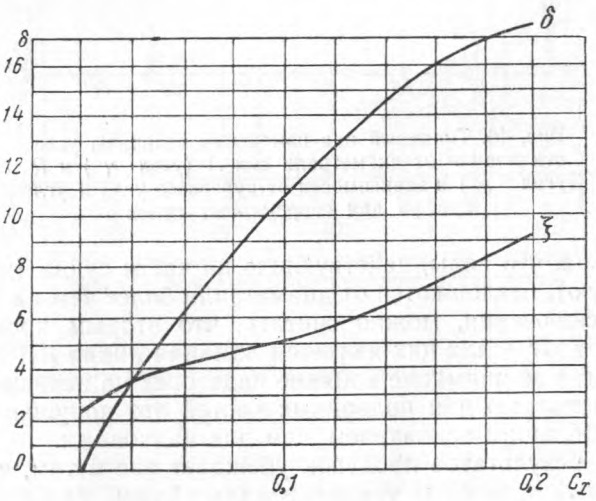


Рис. 45. Определение угла γ

Из графиков и таблиц видно, что и в случае симметричных форм обтекаемого тела величина γ может превышать 90°. Но это превышение редко достигает 10° и наблюдается в весьма узкой области изменения углов δ.

Для форм, которые представляют собой надводные и даже подводные части судов, углы γ, превышающие 90°, наблюдаются как исключение.

У каких судов подводная часть обладает подобными характеристиками, будет сказано ниже. Отклонение силы A от диаметрали больше чем на 90°, наблюдавшееся у некоторых моделей речных судов, имеет иное объяснение. Видимо, это отклонение обусловлено особым расположением и сочетанием расположения надстроек.

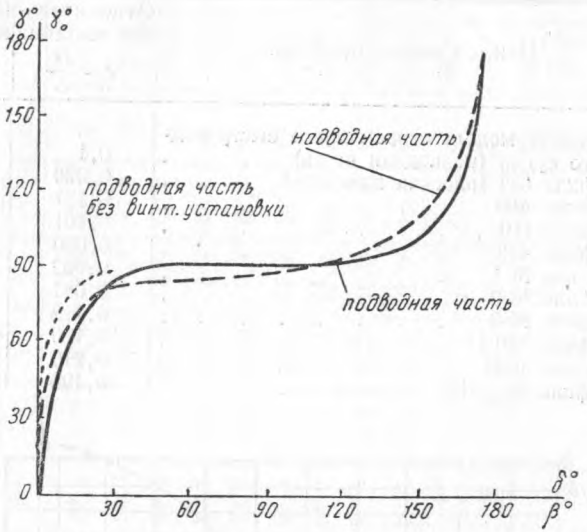


Рис. 46. Типичный вид изменения величины угла отклонения от диаметрали сил A (угол γ) и R (угол γ_0) в зависимости от курсового угла и угла дрейфа для современных судов

Учитывая, что силы, действующие на части судна (надводную и подводную), отклоняются от диаметрали более чем на 90° в виде редкого исключения, можно считать, что вторым пределом зависимости γ от δ для них является ломаная линия $ABCD$.

Принимая во внимание влияние надстроек на величину γ следует заметить, что для подводных частей это допущение можно сделать с бóльшим основанием, чем для надводных.

Анализ результатов продувок убеждает нас в том, что отклонение силы A и, как мы увидим в дальнейшем, силы R от диаметральной плоскости и характер изменения этих величин от угла набегания потока определяется в основном тремя характеристиками: формой обтекаемого тела, относительной толщиной модели $\frac{B}{L}$ и ее относительным размахом $\frac{H}{L}$. Применительно к моделям судов B соответствует ширине судна, H—его осадке (для под-

водной части) или средней высоте корпуса и надстроек (для надводной части).

Чем хуже обтекаемость модели, тем бо́льшую роль в определении отклонения силы играет величина $\frac{B}{L}$. Чем лучше обтекаемость модели, тем большее значение приобретает характеристика $\frac{H}{L}$ — относительный размах. Чем лучше обтекаемость модели, чем меньше ее относительная толщина и чем больше относительный

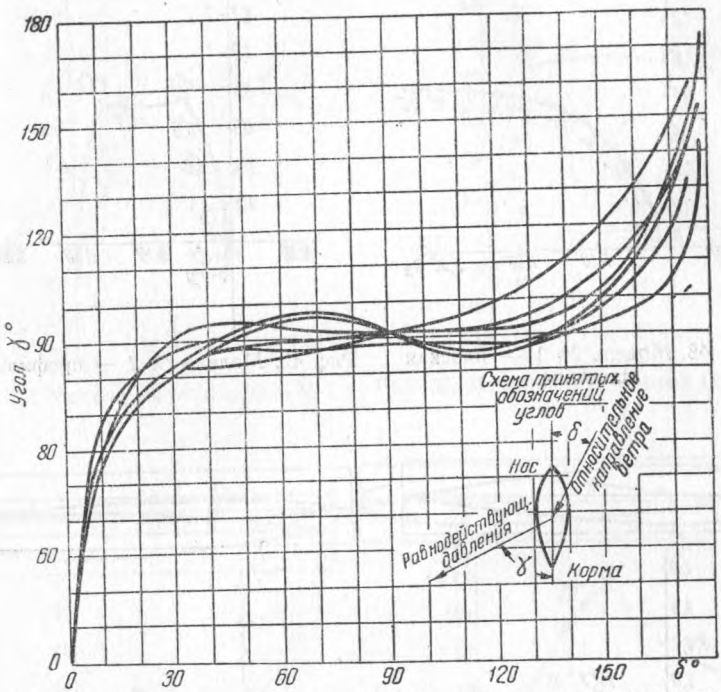


Рис. 47. Углы отклонения силы давления на надводную часть судна в зависимости от курсовых углов ветра

размах, тем ближе кривая зависимости γ от δ подходит к предельному виду, изображаемому ломаной линией $ABCD$. Наоборот, при больших значениях $\frac{B}{L}$, малых значениях $\frac{H}{L}$ и прямоугольных формах тела эта кривая стремится к линии AD. Действительно, все кривые зависимостей для моделей надводных частей, как правило, лежат ниже (от 0 до 90°) кривых для моделей подводной части, формы которых являются всегда более обтекаемыми. Соответственно располагаются и кривые для моделей надводных частей с обтекаемыми, плохообтекаемыми надстройками, а также кривые для моделей голых корпусов надводной части без мелких надстроек (рис. 58, 59, 60). Особенно хорошо это видно по результатам

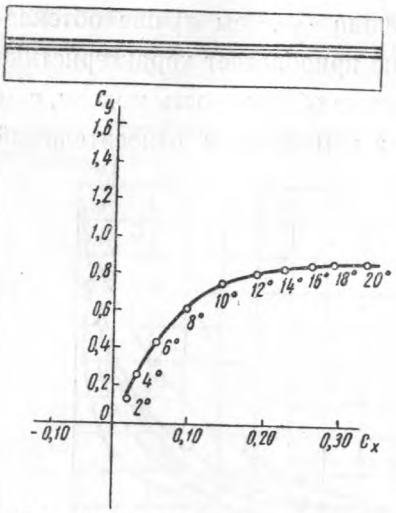


Рис. 48. Модель № 1 — плоская пластина

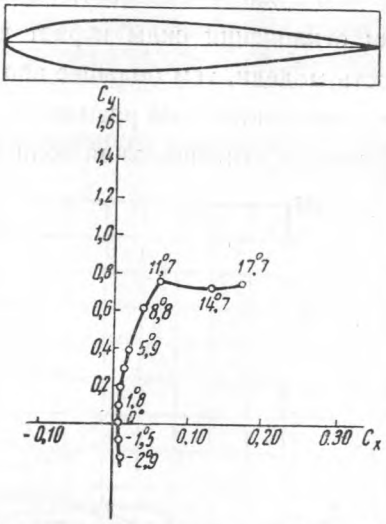


Рис. 49. Модель № 2 — профиль 409

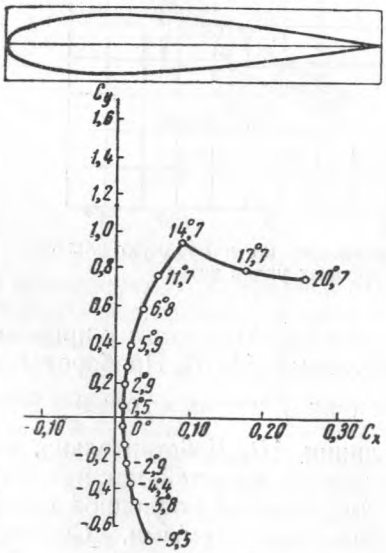


Рис. 50. Модель № 3—профиль 410

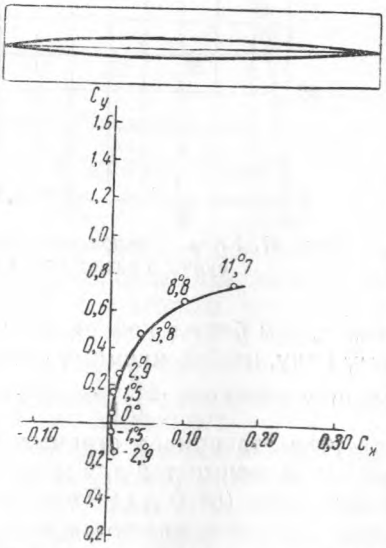


Рис. 51. Модель № 4—профиль 443

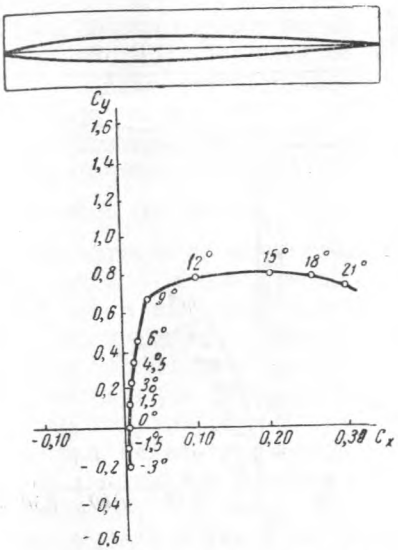


Рис. 52. Модель № 5—профиль М-1

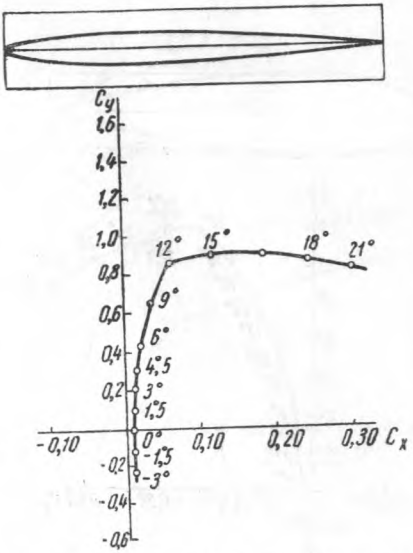


Рис. 53. Модель № 6 — профиль М-2

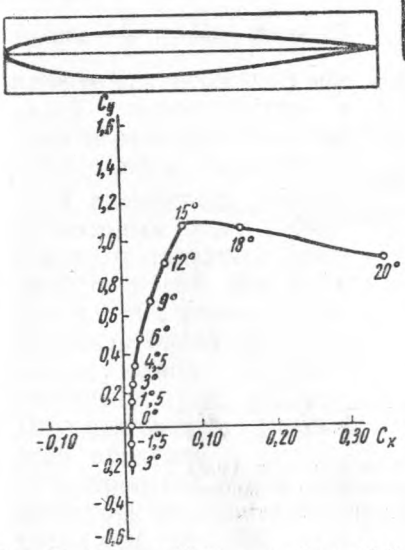


Рис. 54. Модель № 7 — профиль М-3

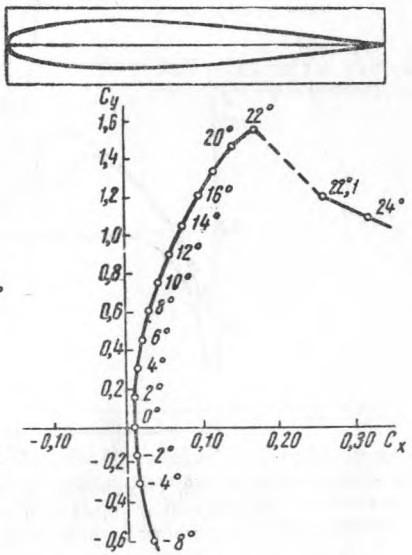


Рис. 55. Модель № 8 — профиль 0012

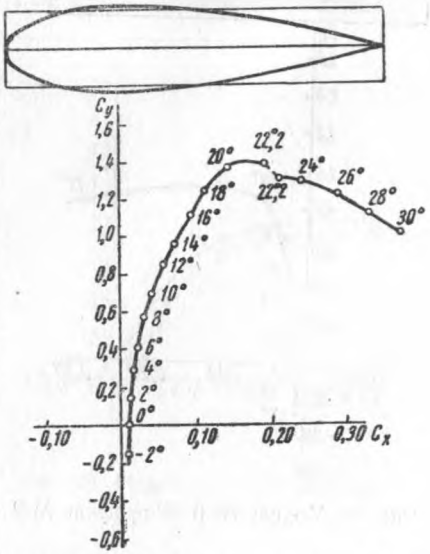


Рис. 56. Модель № 9 — профиль 0021

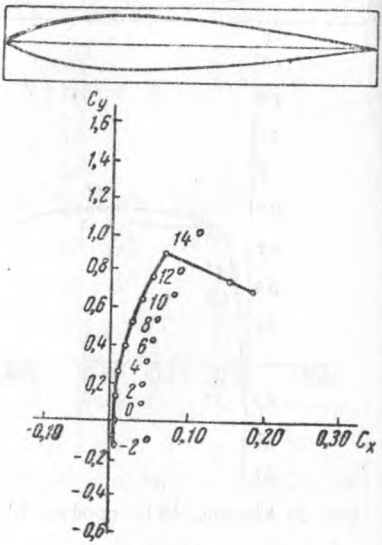


Рис. 57. Профиль $B_{сим} = 12$

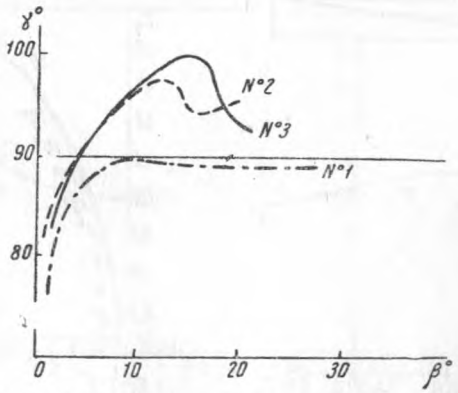


Рис. 58. Изменение угла отклонения силы давления от плоскости симметрии в зависимости от угла набегания потока

продувок Хьюза (см. рис. 33). Исключения появляются, когда на первое место выступает иной фактор. Так, например, кривая для подводной части современного быстроходного судна (см. рис. 46) при углах до 30° расположена ниже кривой надводной части его. Это объясняется, с одной стороны, большой величиной отношения $\frac{H}{L}$ для надводной части его, с другой, — и это главное, влиянием винтовых установок, дающих при малых углах набегания потока значительную составляющую, направленную вдоль потока. Результаты продувок модели без винтовых установок (см. рис. 59) подтверждают сказанное.

Результаты продувок, проведенных Хьюзом, подтверждают наличие влияния на γ величины отношения $\frac{\delta B}{L}$. На рис. 33 кривые для различных моделей располагаются в строгой зависимости от величины этого отношения.

К сожалению, данных, по которым можно было судить о характере зависимости γ от δ при углах больше 90°, очень мало. Мы располагаем для этого только одной круговой продувкой (см. рис. 46). Но анализируя данные этой продувки и результаты продувок голых, без надстроек надводных частей (см. рис. 33), есть основание сказать, что следует ожидать довольно однообразного характера исследуемой зависимости для различных форм надводных частей при углах набегания потока от 50 до 130°. Углам набе-

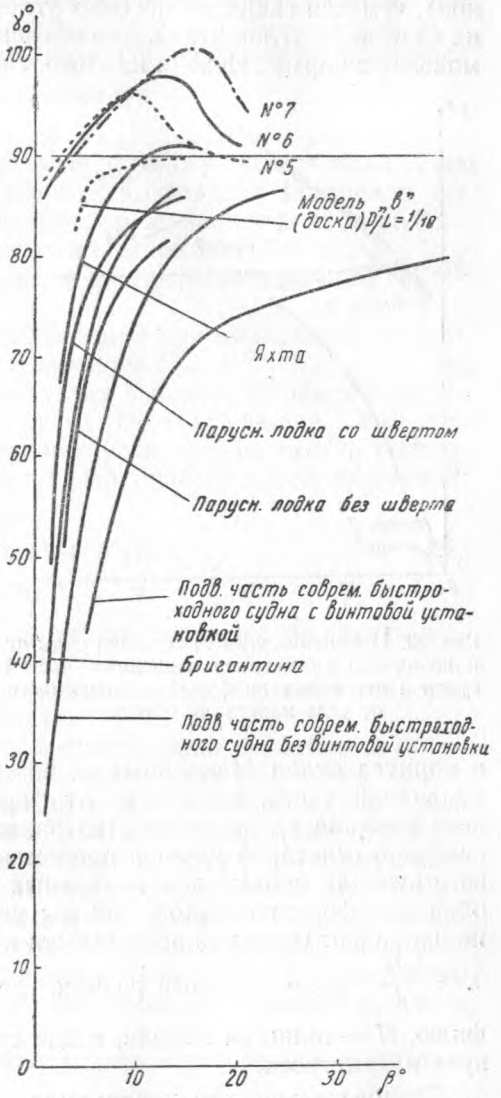


Рис. 59. Изменение угла отклонения силы сопротивления воды от направления диаметрали для подводных частей различных судов в зависимости от угла дрейфа

гания потока выше 130° для надводных частей судов соответствуют значения γ, меньшие (если считать от носового конца осевой линии), чем для таких же носовых углов набегания потока или, как их называют, углов атаки. Это объясняется худшей обтекаемостью моделей с кормы. Исходя из этого, следует ожидать более симметричных кривых (относительно 90°) для моделей подводных частей судов.

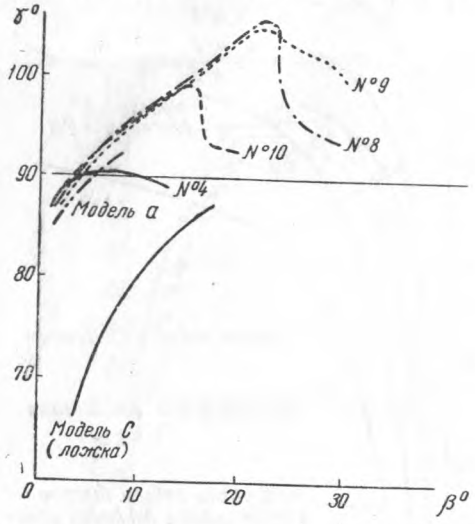


Рис. 60. Изменение угла отклонения силы от направления диаметрали подводных частей судов и некоторых профилей в зависимости от угла набегания потока

В заключение следует остановиться на одном чрезвычайно важном обстоятельстве. Сопоставление величины отклонения силы A от диаметральной плоскости при различных углах δ для надводных частей без надстроек или со слаборазвитыми по сравнению с основным корпусом надстройками с величиной отклонения силы R от диаметральной плоскости при различных углах β для подводных частей показывает, что, видимо, зависимость γ от δ и γ_0 от β в основном определяется отвесными поверхностями надстроек и корпуса судна. Наклонные же поверхности надстроек и обводы подводной части, зависящие от формы шпангоутов, существенного влияния на характер этих зависимостей не оказывают. Это особенно отчетливо удается продемонстрировать, сравнивая соответствующие кривые для подводных частей. Даже самые разнообразные формы обводов, как мы увидим дальше (см. рис. 59), не нарушают основной зависимости вида кривых $\gamma_0 = f_{2(3)}$ от λ; $\lambda = \frac{H}{L}$ — относительный размах, где L — длина модели по профилю, H — толщина модели, а для судна осадка или высота корпуса и надстроек.

Следовательно, для оценки вида зависимостей $\gamma = f_1(\delta)$; $\gamma_0 = f_2(\beta)$ достаточно пользоваться проекциями надводных и подводных частей на плоскость поверхности воды или практически — видом сечения судна по ватерлинии. Для надводной части, кроме того, необходимо учесть проекции основных надстроек. Эти соображения понадобятся нам в дальнейшем для изложения приближенного теоретического способа определения направления сил A и R при различных δ и β.

Как видим, имеющегося материала продувок надводных частей еще недостаточно для надлежащего выбора зависимости $\gamma = f_1(\delta)$ для конкретного судна. Для этого необходимо, разделив все суда на группы с хорошо обтекаемыми и плохо обтекаемыми надстройками, получить продувки моделей, наиболее характерных из этих групп при различных отношениях $\frac{B}{L}$.

Такое положение указывает на насущную необходимость разработки иных способов определения угла отклонения силы A от направления диаметральной плоскости, которые позволили бы штурману определить соответствующую зависимость либо по чертежам судна, либо путем простых маневров с самим судном. Это касается, как мы увидим дальше, и определения величины отклонения силы R.

4. Последней величиной, необходимой при вычислении силы A по формуле (19) (не считая V), является $S_{(0)}$.

Значения $S_{(\delta)}$ при различных углах δ можно с большой точностью определить по чертежам судна. Но оказывается, что для практических нужд при вычислении угла дрейфа можно пользоваться для определения $S_{(\delta)}$ следующей приближенной формулой:

$$S_{(\delta)} = a \cos \delta + b \sin \delta \qquad (36)$$

где:

a — величина площади проекции судна на плоскость мидель-шпангоута (вид с носа);

b — величина площади проекции судна на плоскость симметрии (силуэт судна).

Для изучения коэффициента сопротивления оказывается очень полезным более подробное исследование вида различных проекций судна. Как мы помним, при продувке моделей речных судов было отмечено резкое изменение величины коэффициента сопротивления при наличии сквозных (с борта на борт) проходов в надстройках, а также влияние на величину коэффициента сопротивления эффекта затенения одних надстроек другими. В подводной части на величине коэффициента сопротивления сказывается эффект затенения корпусов рулей и винтовых установок. Все это легко обнаружить, имея точные проекции судна для различных углов δ и β.

Вид проекции позволит также судить о положении точки приложения сил A или R.

Наиболее простым и надежным способом исследования проекций судна является проектирование его модели на экран с помощью источника света, достаточно далеко удаленного от модели. Для простоты можно пользоваться не моделью судна, а каркасом модели, состоящим из диаметрали, плоскостей шпангоутов и определяющих плоскостей надстроек. Определение площади проекции проектированием модели на экран удобно и в тех случаях, когда

надстройки отстоят друг от друга на большом расстоянии, как, например у танкеров. В таких случаях формула (36) будет давать значительную погрешность. Определенные таким путем проекции катера и быстроходного современного судна изображены на

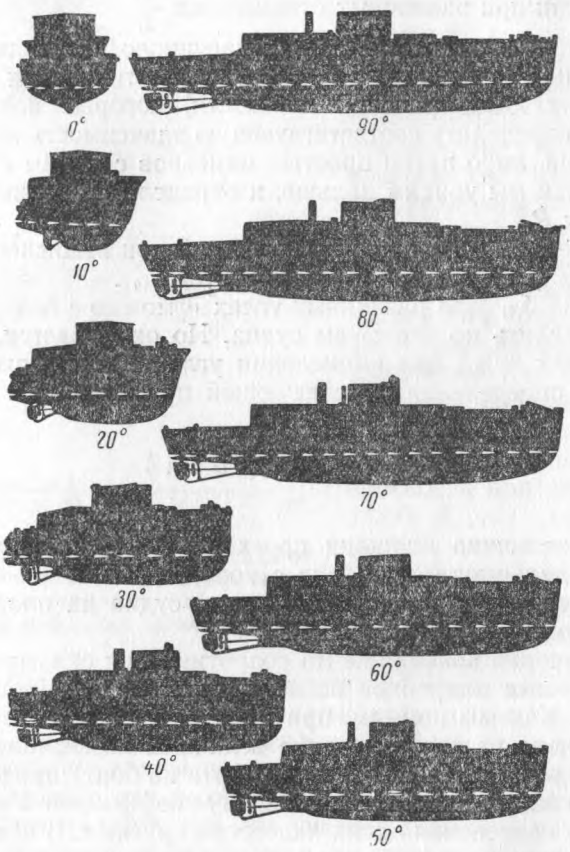


Рис. 61. Проекции модели морского катера

рис. 61, 62, 63. Вид проекций позволяет увереннее подбирать коэффициент сопротивления для судов, модели которых не проходили аэродинамических испытаний.

Чтобы не возвращаться к этому в дальнейшем, в разделе, посвященном описанию способов нахождения гидродинамических характеристик судна, отметим, что сказанное полностью применимо для определения $S_{0(\beta)}$, т. е. площади проекции подводной части судна на плоскости, перпендикулярные направлению набегающего потока.

Сопоставление значений S_β , вычисленных по формуле (36) и найденных путем проектирования на экран, показано на рис. 64.

5. Для определения угла дрейфа, как увидим дальше, достаточно знать только угол отклонения силы R от направления диаметральной плоскости. Это обстоятельство очень существенно, так как отпадает необходимость определять величину коэффициента сопротивления $C_{(i,\beta)}$ для подводной части судна. Эти упрощения весьма желательны. Дело в том, что величина коэффициента сопротивления для подводной части зависит от скорости судна, так как включает волновое сопротивление, и от волнения. Это сильно затрудняет определение коэффициента сопротивления путем экспериментов с моделями и делает эти определения недостаточно надежными и точными.

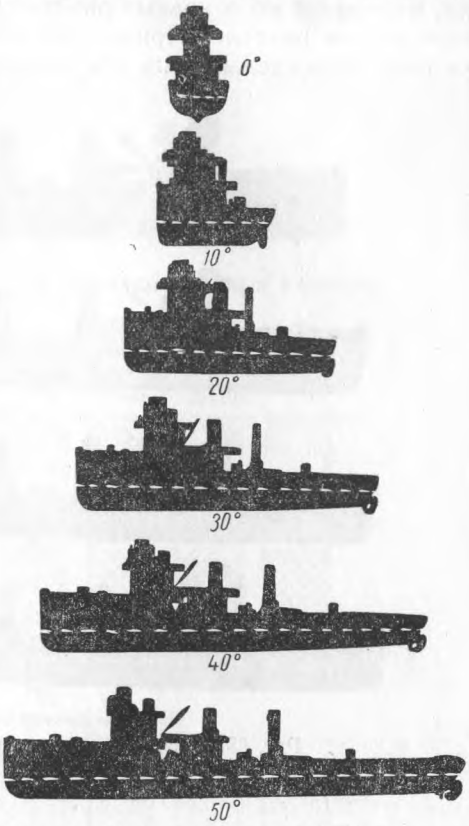


Рис. 62. Проекции модели быстроходного судна

Величина отклонения силы R от диаметрали в меньшей степени, как это будет показано ниже, зависит от волнового сопротивления и волнения, поэтому и определение этой характеристики оказывается более простым.

Таким образом, величина силы R, а следовательно, и величина коэффициента сопротивления подводной части не понадобятся для вычисления угла дрейфа. Но зато эти величины нам необходимо знать при исследовании рыскливости и поворотливости судна при ветре и дрейфе. Поэтому приведем здесь материал, характеризующий величину C_0 для различных судов и зависимость ее от угла дрейфа β.

Сила R вычисляется по формуле, аналогичной формуле для определения силы A:

$$R = C_{0(i,\beta)} \frac{\rho_0}{2} S_{0(\beta)} V_0^2 .$$

ρ_0 известно из таблиц, V_0 определяется по показаниям прибора.

Способ вычисления $S_{0(\beta)}$ был изложен в предыдущем разделе. Следовательно, в настоящем разделе остается изложить способы определения и дать характеристику величин $C_{n(\beta)}$ и γ_0 —угла отклонения силы R от направления диаметральной плоскости.

Перечень моделей подводных частей, подвергшихся испытаниям, и сведения об основных размерах этих моделей были приведены в первом разделе. Приходится отметить, что круговые продувки были проведены лишь для незначительного количества этих

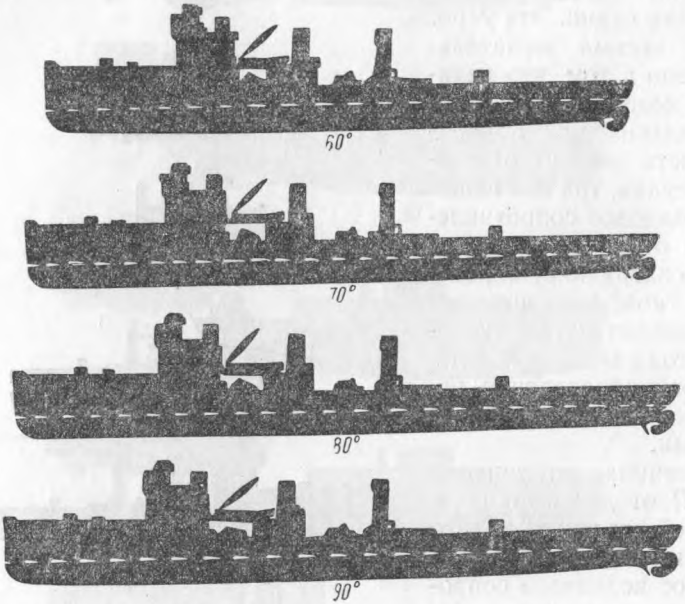


Рис. 63. Проекции модели быстроходного судна

моделей. Так как испытания проводились в аэродинамических трубах, то, естественно, волновое сопротивление и сопротивление, вызванное волнением, не учитывались. Для определения этих составляющих полного сопротивления надо буксировать модель подводной части судна под различными углами к диаметрали по взволнованной поверхности воды в бассейне. Для того чтобы учесть хотя бы приблизительно влияние волнового сопротивления на силу R, полученную по коэффициенту, взятому из продувок, следует добавить волновое сопротивление, определенное из обычных буксировок, направление которых совпадает с направлением диаметральной плоскости. В первом приближении можно считать, что вектор волнового сопротивления совпадает с линией смещения при наличии угла дрейфа и направлен в сторону, обратную смещению. При больших скоростях движения, когда волновое сопро-

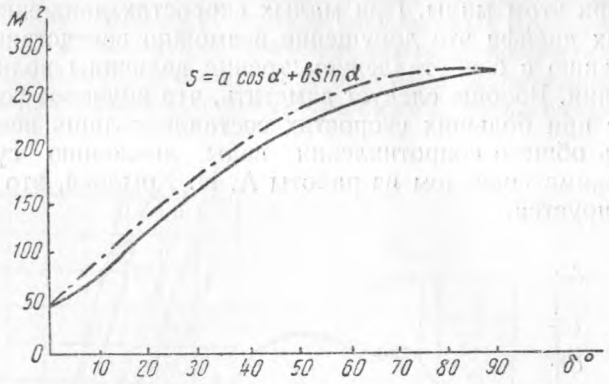


Рис. 64. Кривая изменения величины проекции площади судна

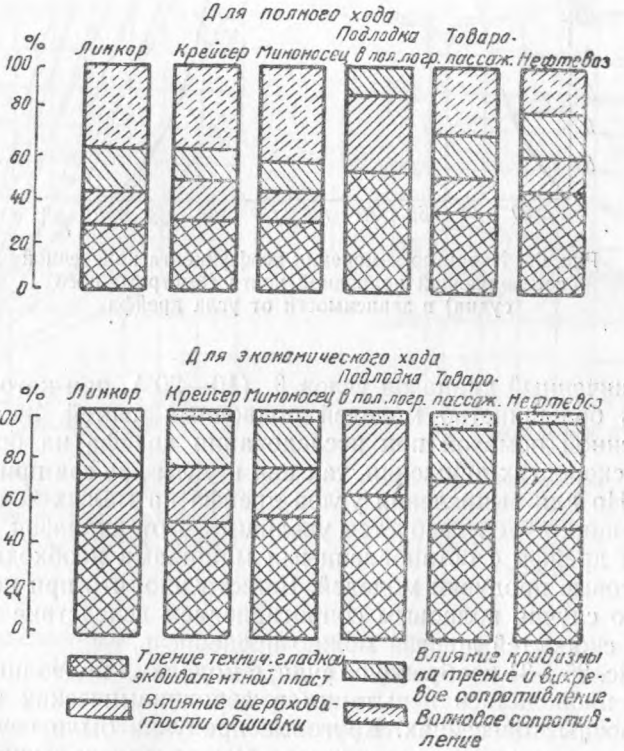


Рис. 65. Составляющие полного сопротивления, оказываемого водой движению судна

тивление велико, это допущение близко к истине, так как углы дрейфа при этом малы. При малых скоростях движения и больших углах дрейфа это допущение возможно вследствие малости по сравнению с сопротивлением трения величины волнового сопротивления. Вообще следует заметить, что волновое сопротивление даже при больших скоростях составляет лишь незначительную часть общего сопротивления воды движению судна. На рис. 65, заимствованном из работы А. Н. Крылова, это наглядно демонстрируется.

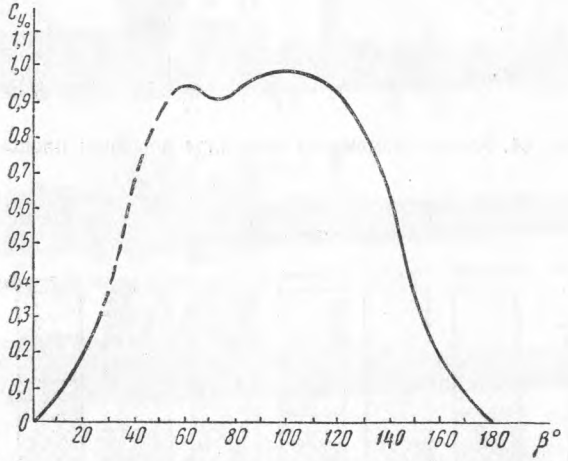


Рис. 66. Характер изменения коэффициента поперечной составляющей подводной части (быстроходного судна) в зависимости от угла дрейфа

Ограниченный диапазон углов β (10—20°), при которых продувалось большинство моделей подводных частей, не является существенной помехой при исследовании дрейфа на больших и средних скоростях движения, так как и углы дрейфа при этом невелики. Но для вычисления углов дрейфа на малых ходах и для буксирующих судов требуется увеличить этот диапазон. Для вычисления дрейфа с остановленными машинами необходимы полные круговые продувки моделей. Естественно, что при исследовании этого случая волновым сопротивлением вследствие очень небольших скоростей дрейфа можно пренебречь.

На рис. 25—31 изображены суда, с моделями подводных частей которых проводились испытания в аэродинамических трубах и буксировочных бассейнах. Круговые продувки были осуществлены только для модели современного быстроходного судна и модели речного судна (см. рис. 28, модель 27). Зависимости величин коэффициентов сопротивления подводных частей от β для различных судов приводятся на рис. 66—70.

Вследствие того, что в использованных материалах не удалось обнаружить сведений о размерах исследованных моделей, не было возможности вычислить и значения полного коэффициента при различных углах β, отнесенных к переменным площадям, а следовательно, не удалось провести сравнений, аналогичных сравне-

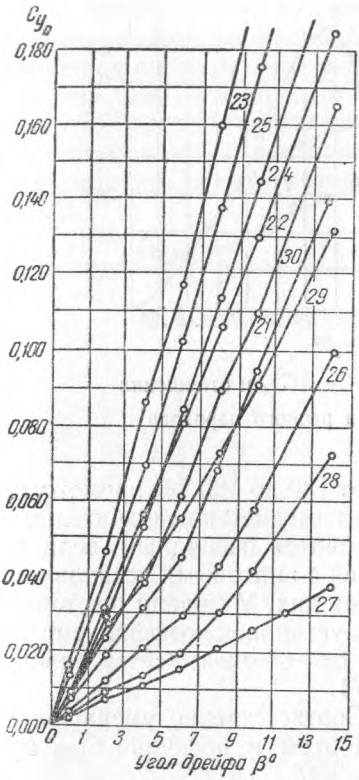


Рис. 67. Зависимость коэффициентов поперечной составляющей сопротивления для подводных частей моделей от угла дрейфа

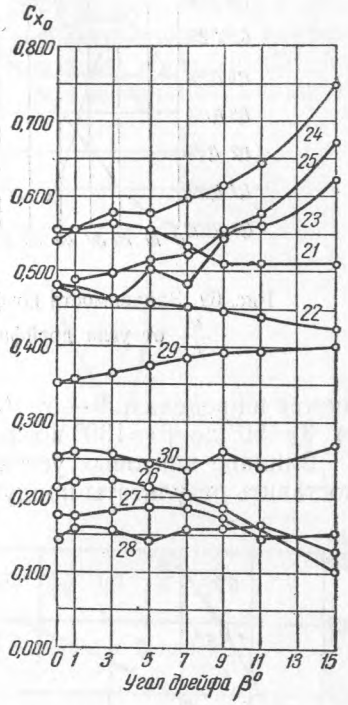


Рис. 68. Зависимость коэффициентов продольной составляющей сопротивления для подводных частей моделей от угла дрейфа

ниям, проделанным для коэффициента сопротивления надводной части судна. Необходимые для такого сравнения сведения имелись только для одного быстроходного судна.

Кривая, изображающая изменение этого коэффициента, приведена на рис. 71.

Значения $C_{0(\beta)}$ были получены из продувок и поэтому не включают волнового сопротивления. Зависимость, как видим, довольно сложная. Сложность эта обусловливается влиянием винтовых установок (два винта бо́льших по сравнению с осадкой размеров).

Но если исключить участок возрастания коэффициентов при углах β, равных 0 и 180°, то остальная часть кривой β по своему виду напоминает вид кривой полного коэффициента сопротивления для надводной части. Действительно, коэффициент C_0 заметно изме-

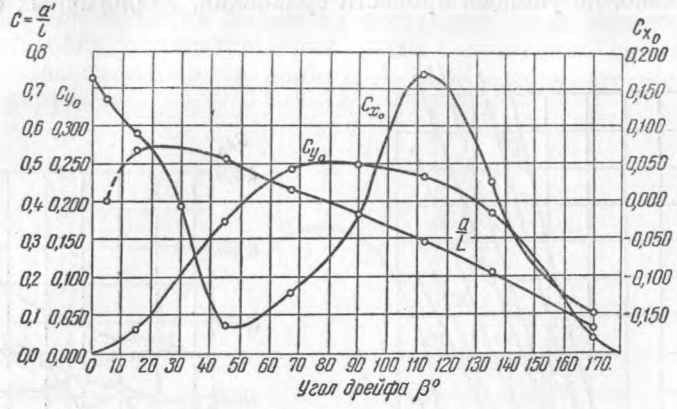


Рис. 69. Зависимости коэффициентов C_{y_0}, C_{x_0} и отношения $\frac{a}{L}$ от угла дрейфа для модели речного парохода

няется в пределах: β—от 10 до 50° и от 130 до 160°. В промежутке от β=50° до β=130° коэффицент C_0 изменяется незначительно.

Влияние винтовых установок становится очевидным, если сопоставить результаты продувок моделей с винтовыми установками и без них. У модели без винтовых установок коэффициент $C_{0(\beta)}$ при β = 0° оказывается равным 0,171.

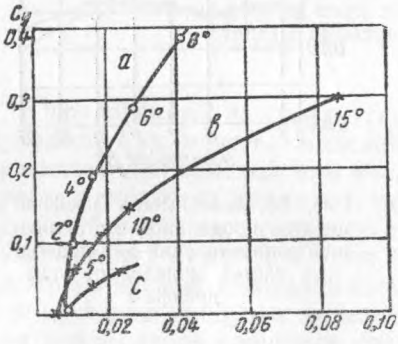


Рис. 70. Поляры схематизированных моделей подводных частей

Соответственно уменьшается при этом и величина $C_{0(\beta)}$ при β = 180°.

Результаты исследований этой гидродинамической характеристики судна позволяют сделать ряд выводов.

Оказывается, что коэффициент сопротивления $C_{0(\beta)}$ для подводной части судна в исследованных пределах изменения скорости лишь незначительно зависит от Re. Эта зависимость становится заметной при угле продувки β = 0°, да и то лишь в тех случаях, когда влияние винтовых установок невелико.

Коэффициент сопротивления $C_{0(\beta)}$ при β =0° сильно зависит от формы носовых обводов, полноты судна и, как уже говорилось, от размеров винтовых установок.

Коэффициент $C_{0(\beta)}$ при $\beta=90°$ в основном зависит от величины отношения углубления судна к длине корпуса, формы штевней, обводов, формы дейдвуда и руля.

Первая зависимость хорошо согласуется с аналогичной зависимостью для цилиндров различной длины, обтекаемых потоком, перпендикулярным их образующей.

Зависимость коэффициента сопротивления от формы штевней и дейдвуда отчетливо показана в работе, проделанной Гирсом. Особенно наглядно это демонстрируется на моделях 26, 27, 28 (см. рис. 28). Различие в величине коэффициентов сопротивления этих моделей достигает 130—200%. Сравнение этих коэффициентов с коэффициентами для более полных моделей (29, 30) позволяет обнаружить зависимость их от коэффициента полноты судна.

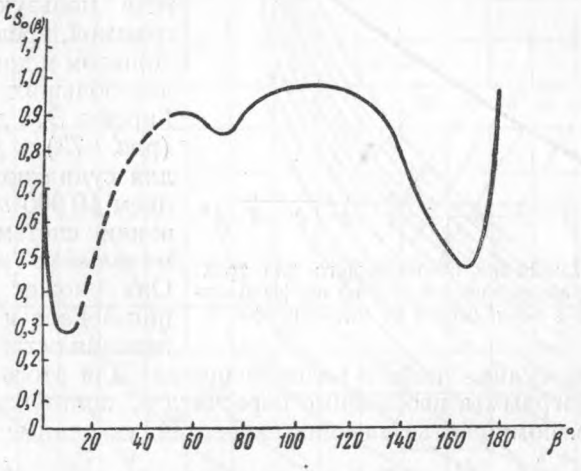


Рис. 71. Характер изменения величины полного коэффициента сопротивления, отнесенного к переменной площади (подводной части быстроходного судна), в зависимости от угла дрейфа

Как видим, зависимость C_0 от особенностей подводной части судна весьма сложная даже для углов β, равных 0, 90, 180°. Эта зависимость еще более усложняется для углов промежуточных, так как она определяется всеми перечисленными особенностями корпуса судна.

Пока мы не располагаем данными буксировок моделей под углом к диаметральной плоскости, не можем сказать и о том, как влияет на величину волнового сопротивления угол дрейфа. Единственно известные нам буксировки под углом к диаметрали были проделаны Хьюзом. Буксировки проводились в пределах от 0 до 10° и на различных скоростях. На рис. 72 показана средняя для трех моделей кривая изменения нормальной к диаметрали со-

ставляющей коэффициента сопротивления. Но следует отметить, что скорости буксировок были таковы, при которых волновое сопротивление было весьма незначительным по сравнению с общим сопротивлением.

Говоря о волновом сопротивлении, следует помнить, что величина его при буксировках вдоль диаметрали, а следовательно, и при буксировках под углом к ней зависит, кроме скорости, также от осадки судна и обводов корпуса.

Для приближенного определения остаточного сопротивления (общее сопротивление минус сопротивление трения) и зависимости его от скорости и коэффициента остроты при движении без дрейфа в корабельной практике пользуются диаграммой, предложенной Дойером и дополненной для больших скоростей Гирсом. Эта диаграмма (рис. 73) построена для судна водоизмещением 10 000 m на основании систематических модельных испытаний. Она может быть использована и для определения остаточного сопротивления судна любого водоизмещения. Для этого значение, снятое с диаграммы, необходимо пересчитать, пользуясь законом Фруда, т. е. помножить значения скоростей, указанные на диаграмме, на $\sqrt[6]{\frac{D}{10\,000}}$ (D—водоизмещение).

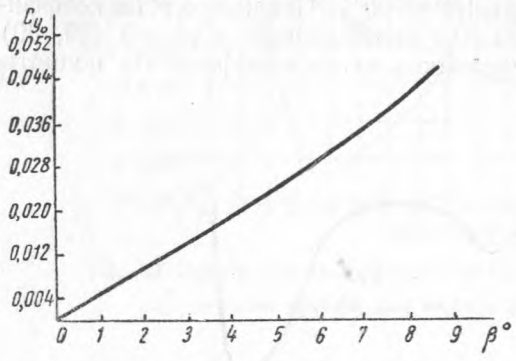


Рис. 72. Изменение осредненного для трех моделей подводных частей (Хьюз) коэффициента C_{y_0} в зависимости от угла дрейфа

6. Перпендикулярную диаметрали составляющую коэффициента сопротивления C_{y_0} можно приближенно определить для небольших углов дрейфа теоретическим путем. Федяевский в своей работе о дрейфе самоходного судна предлагает определять C_{y_0} по формуле Бураго, взятой из теории прямоугольного крыла малого удлинения. При этом, конечно, не учитываются волновое сопротивление и другие факторы, влияющие на величину коэффициента сопротивления, как то: волнение, качка судна, что, правда, не учитывается пока и в описанных выше способах определения C_0.

Формула для определения C_{y_0} имеет следующий вид:

$$C_{y_0} = \frac{2{,}8\lambda\beta + 2\beta_0^2}{1 + \frac{2{,}8\lambda}{\left(\frac{dC_{y_0}}{d\beta}\right)_{\lambda=\infty}}}. \qquad (37)$$

В этой формуле β_0 обозначает угол дрейфа, но в отличие от β отсчитывается не от направления диаметральной плоскости, а от направления, при движении по которому поперечная гидродинамическая сила равна нулю. λ — удлинение сдвоенной подводной части судна, равное $\frac{2H^2}{S_{0(90°)}}$ (H — осадка судна). При бесконечном удлинении теоретическое значение производной $\frac{dC_{y_0}}{d\beta}$ равняется 2π.

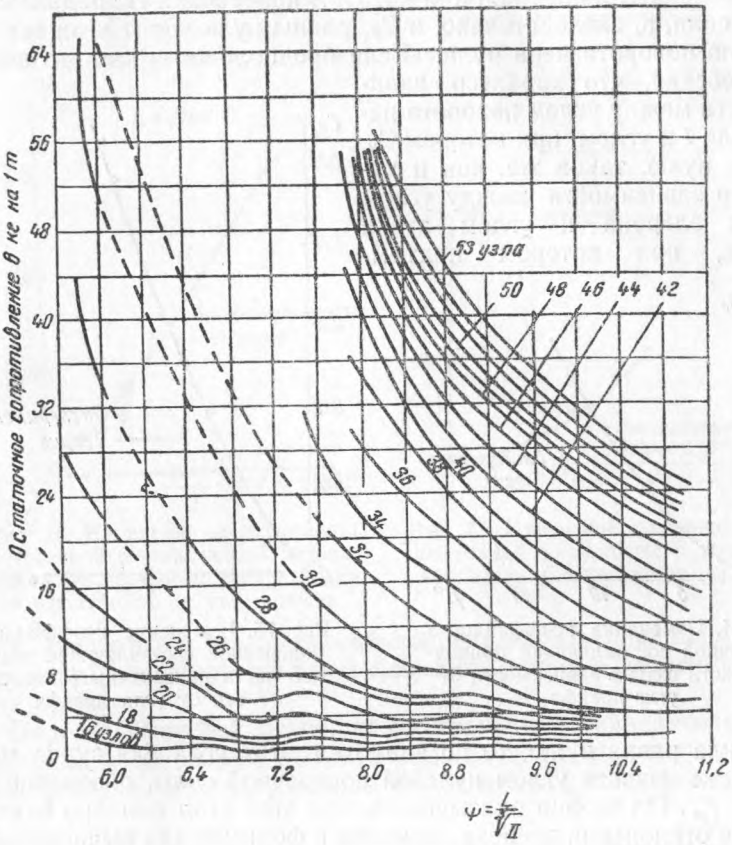


Рис. 73. Зависимость величины остаточного сопротивления от коэффициента полноты ψ

При удлинениях, равных 0,1 и меньше, формула (37) значительно упрощается, и тогда для C_{y_0} можно написать такую формулу:

$$C_{y_0} = 2\beta_0^2. \qquad (38)$$

Формула, которой можно пользоваться для вычисления C_{y_0} при λ больших, чем 0,2, выглядит так:

$$C_{y_0} = k_1\beta_0 + k_2\beta_0^2. \qquad (39)$$

На рис. 74—77 приводится сопоставление кривых изменения C_{y_0}, полученных по формулам (36), (39) с данными эксперимента над моделями парусно-моторной лодки, бригантины, яхты и современного быстроходного судна.

Чтобы использовать вычисленные таким путем коэффициенты в работах по определению дрейфа и рыскания судна, необходимо знать величину угла между диаметральной плоскостью судна и направлением движения, при котором поперечная гидродинамическая сила, а, следовательно, и C_{y_0} равны нулю. Этот угол зависит от угла поворота пера руля. Если предположить, как это делает Федяевский, что характер зависимости между углом поворота пера руля i и углом, при котором C_{y_0} равно нулю, таков же, как и характер зависимости между углом атаки элерона и углом атаки крыла, при котором подъемная сила равна нулю, то по аналогии этот угол для судна можно также назвать углом нулевой поперечной силы, обозначив его через β_p. По теории оказывается, что этот угол линейно зависит от угла отклонения элерона. Заменив в формуле для вычисления β_p отношение хорды элерона к хорде крыла отношением площадей руля S_p к площади проекции подводной части судна (включая и руль) на диаметральную плоскость $S_{0(90°)}$, Федяевский получил следующую формулу:

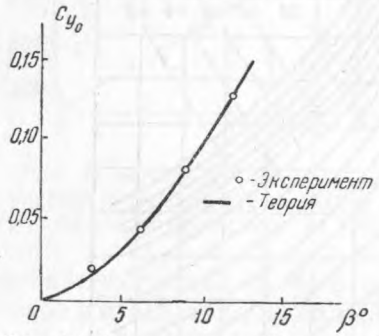


Рис. 74. Изменение коэффициента поперечной составляющей подводной части яхты в зависимости от угла дрейфа

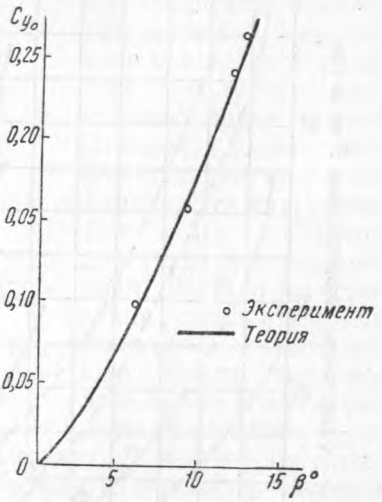


Рис. 75. Изменение коэффициента поперечной составляющей подводной части бригантины в зависимости от угла дрейфа

$$\beta_p = k_p \left[\arcsin \sqrt{\frac{S_p}{S_{0(90°)}}} + \sqrt{\frac{S_p}{S_{0(90°)}} \left(1 - \frac{S_p}{S_{0(90°)}}\right)} \right] i, \qquad (40)$$

где:

κ_p — коэффициент, зависящий от формы руля и формы проекции подводной части на диаметральную плоскость.

В подтверждение этих соображений Федяевский приводит данные (рис. 78) результатов продувок моделей яхты, из которых видно, что при увеличении угла поворота пера руля i от 10 до 20° угол нулевой поперечной силы увеличился тоже приблизительно вдвое.

Экспериментальных данных о влиянии поворота пера руля на угол нулевой поперечной силы пока еще мало. Особенно это относится к подвесным рулям без рудерпостов. Поэтому пока еще трудно дать решение для всех видов рулей. Но для рулей, крепящихся на ахтерштевне, линейную зависимость принять оказывается возможным. Тогда β должен вычисляться по формуле

$$\beta = \beta_0 + \beta_p.$$

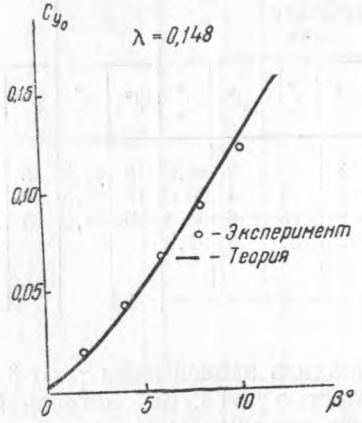


Рис. 76. Изменение коэффициента поперечной составляющей подводной части парусно-моторной лодки в зависимости от угла дрейфа

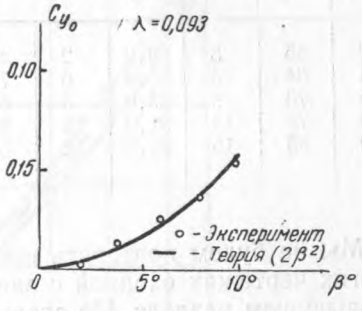


Рис. 77. Изменение коэффициента поперечной составляющей подводной части быстроходного судна

7. Рассмотрим теперь способы определения величины отклонения силы R от диаметральной плоскости судна в зависимости от угла дрейфа.

Перечень моделей судов, для которых эта зависимость определялась на основании результатов продувок в аэродинамических трубах, и некоторые сведения об этих моделях приведены в табл. 8.

Таблица 8

№ п/п	Модель	B/L	H/L
1	Подводная часть модели современного быстроходного судна	0,100	0,031
2	Бригантина (подводная часть) (см. рис. 29)	0,250	0,125
3	Яхта (подводная часть) (см. рис. 30)	0,210	0,168
4	Палубная лодка (подводная часть без шворта) (см. рис. 32)	0,280	0,067
5	Модель «а» (профиль 409) (см. рис. 32)	0,133	1,000
6	Модель «в» (доски) (см. рис. 32)	—	0,100
7	Модель «с» (ложка) (см. рис. 32)	0,155	0,078

В табл. 9 приводятся результаты продувок этих моделей. Найденные по этим данным зависимости γ_0 от β изображены на рис. 40, 41, 42, 58, 59, 60.

Таблица 9

Бригантина (подводная часть)		Яхта (подводная часть)		Палубная моторно-парусная лодка (подводная часть)				Модель „а"		Модель „в"		Модель „с"	
				с выдвижным килем (швертом)		без выдвижного киля							
$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$
2	45	3	69,0	2	49	3	51	2	86,0	5	85,3	5	70
4	64	6	83,0	6	77	6	71	4	90,0	10	89,5	10	80
6	73	9	88,0	8	81	9	78	6	90,5	15	89,3	15	86
8	79	12	91,0	10	83	12	81	8	92,0				
10	83	15	91,5	12	85								

Мы не будем повторять всего анализа зависимости γ_0 от β, во многих чертежах сходной с зависимостью γ от δ, рассмотренной в предыдущем разделе. Но следует еще раз указать на одно существенное различие в этих зависимостях. Если для надводных частей основную роль в определении вида зависимости играет отношение $\frac{B}{L}$, то в случае подводных частей, как более обтекаемых, основная роль будет принадлежать отношению осадки модели к ее длине, т. е. отношению $\frac{H}{L}$. Это подтверждается сравнением кривой $\gamma_0 = f_{2(\beta)}$, построенной для профиля 409 (см. рис. 49), имеющего относительный размах $\frac{H}{L}=5$, с кривой этой же зависимости для того же профиля с относительным размахом, равным 1 (см. рис. 60).

Эта зависимость величины угла отклонения силы давления от относительного размаха $\frac{H}{L}$ обдуваемого тела известна из теории крыла и определяется величиной индуктивного сопротивления, обусловленного в свою очередь обтеканием боковых кромок крыла. Теория указывает, что изменение относительного размаха крыла вызывает изменение C_{y_0}, следовательно, и γ_0. При этом увеличение относительного размаха приводит к достижению тех же значений C_{y_0} при меньших углах атаки. Таким образом, при прочих равных условиях увеличение $\frac{H}{L}$ приводит к увеличению γ_0.

Эта же зависимость отчетливо обнаруживается и при продувках различных форм подводных частей, а именно: подводной части яхты, бригантины, моторно-палубной лодки и других судов.

Все кривые для этих судов располагаются на графике (см. рис. 59) в полном соответствии с этой зависимостью. Выше всех кривых, естественно, находится кривая, полученная для яхты.

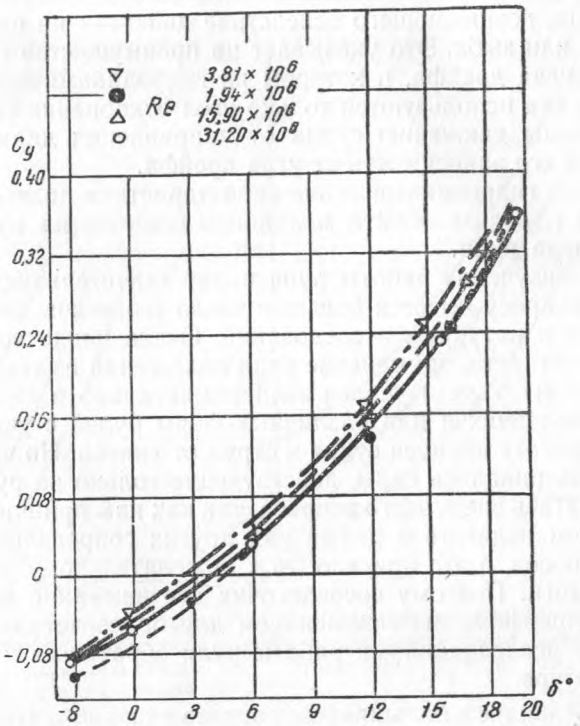


Рис. 78. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса

Проведенный анализ материала, показывающего, как и от каких величин зависят углы отклонения γ, γ_0, дает возможность указать путь выбора соответствующей характеристики в случаях, когда продувок моделей данного, конкретного судна не производилось. Для этого должны быть выбраны из имеющихся материалов зависимости γ, γ_0, полученные для наиболее близкого по формам судна. Эти характеристики должны быть исправлены на величину расхождения в значениях $\frac{B}{L}, \frac{H}{L}$ для исследованного и данного конкретного судна, руководствуясь при этом данными продувок моделей различных судов.

Это, конечно, очень приближенный способ подбора гидродинамической и аэродинамической характеристик судна. Но пока нет

продувок всех основных типов судов, такой путь подбора является единственно возможным. Ниже будут изложены способы определения γ, γ_0 по чертежам и с помощью опытов в натуре.

Сопоставление зависимости $C_0 = f_{(\beta)}$ с зависимостью $\gamma_0 = f_{2(\beta)}$ показывает, что последняя является и более простой и более общей для различных судов. Кроме всего, величина γ_0 значительно меньше, чем C_0, подвержена влиянию волнового сопротивления и сопротивления, возникающего вследствие действия на судно ветровой волны или зыби. Это указывает на преимущества способа определения угла дрейфа, в котором из гидродинамических характеристик судна используются только угол отклонения силы сопротивления воды движению судна от направления диаметральной плоскости и его зависимость от угла дрейфа.

Описывая гидродинамические характеристики подводной части судна C_0 и γ_0, нельзя обойти молчанием влияния на их величину поворота пера руля.

История изучения работы руля имеет значительную давность. По этому вопросу имеется большое число теоретических, экспериментальных и натурных исследований. Очень плодотворным оказалось, в частности, применение ряда положений из теории крыла. Режим работы руля изучался экспериментально в самых разнообразных условиях и для различных форм рулей с учетом влияния на их работу корпуса судна и струи от винтов. Но во всех случаях рассматривались силы, действующие только на руль. Мы не можем излагать здесь этого вопроса, так как нам пришлось бы равным образом излагать и целый ряд других сопредельных нашей задаче вопросов, а это привело бы к нежелательному увеличению размера книги. Поэтому сосредоточив все внимание на том, что связано с дрейфом, мы рекомендуем для более детального ознакомления с исследованиями работы руля обратиться к специальной литературе.

В нашей задаче в большинстве случаев оказалось выгоднее рассматривать корпус и руль как одно целое. Поэтому мы обратимся к продувкам, к сожалению, не многочисленным и не полным, характеризующим зависимость величин C_0 и γ_0 от угла поворота пера руля i. Полных круговых продувок моделей судна при различных поворотах пера руля, насколько нам известно, не проводились. Но это и не так уж необходимо, если учесть то обстоятельство, что влияние поворота руля на гидродинамические характеристики с возрастанием угла дрейфа резко уменьшается (до значений угла дрейфа, равного $180 - i$), а большие углы дрейфа являются исключением, да, кроме того, при таких углах дрейфа руль практически не работает. Правда, влияние угла i на C_0 и γ_0 при больших углах дрейфа интересно для выяснения вопросов потери управляемости при ветре.

Так как при дрейфе судно стремится развернуться в одних случаях на ветер, в иных по ветру, то для удержания его на курсе необходимо перекладывать перо руля либо на наветренный, либо

на подветренный борт. Влияние поворота пера руля на дрейфовые характеристики в этих двух случаях будет неодинаковое. В дальнейшем условимся углы отклонения пера руля в сторону, откуда набегает поток, считать положительными, а в обратную—отрицательными.

Для суждения о характере влияния поворота пера руля мы располагаем результатами продувок моделей подводной части корпуса яхты, бригантины и современного быстроходного судна, изображенными на рис. 79—83. Из этих

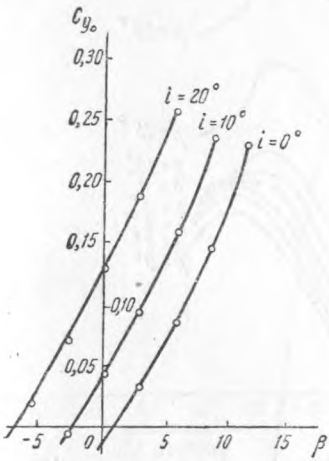


Рис. 79. Зависимость коэффициента поперечной силы подводной части яхты при отклоненном руле от угла дрейфа

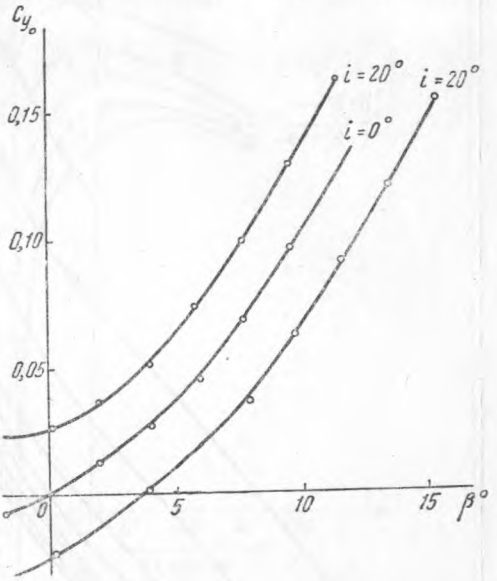


Рис. 80. Зависимости коэффициента поперечной силы в подводной части бригантины при отклоненном руле от угла дрейфа

графиков видно, как меняется величина C_{y_0} при повороте пера руля. Положительный поворот руля увеличивает C_{y_0}. Естественно, что при $\beta=0$ и $i>0$ $C_{y_0} \neq 0$.

Следует отметить, что характер изменения C_{y_0} при малых углах β для отрицательных углов i будет иным по сравнению с изменением для углов i положительных. При отрицательных углах i значение C_{y_0} изменяет свой знак, причем переход его значения через нуль наступает в зависимости от i тем позже, чем больше величина β. Так как величина i ограничена, то, следовательно, и влияние это ограничено технически допустимым поворотом. C_{y_0} определяет величину разворачивающего момента, а следовательно, управляемость. Таким образом, следует заключить, что увеличение угла дрейфа приводит к ухудшению управляемости. Более подробно на этом мы остановимся в соответствующем разделе.

К сожалению, нет возможности сравнить данные для быстроходного современного судна, яхты и бригантины, так как для по-

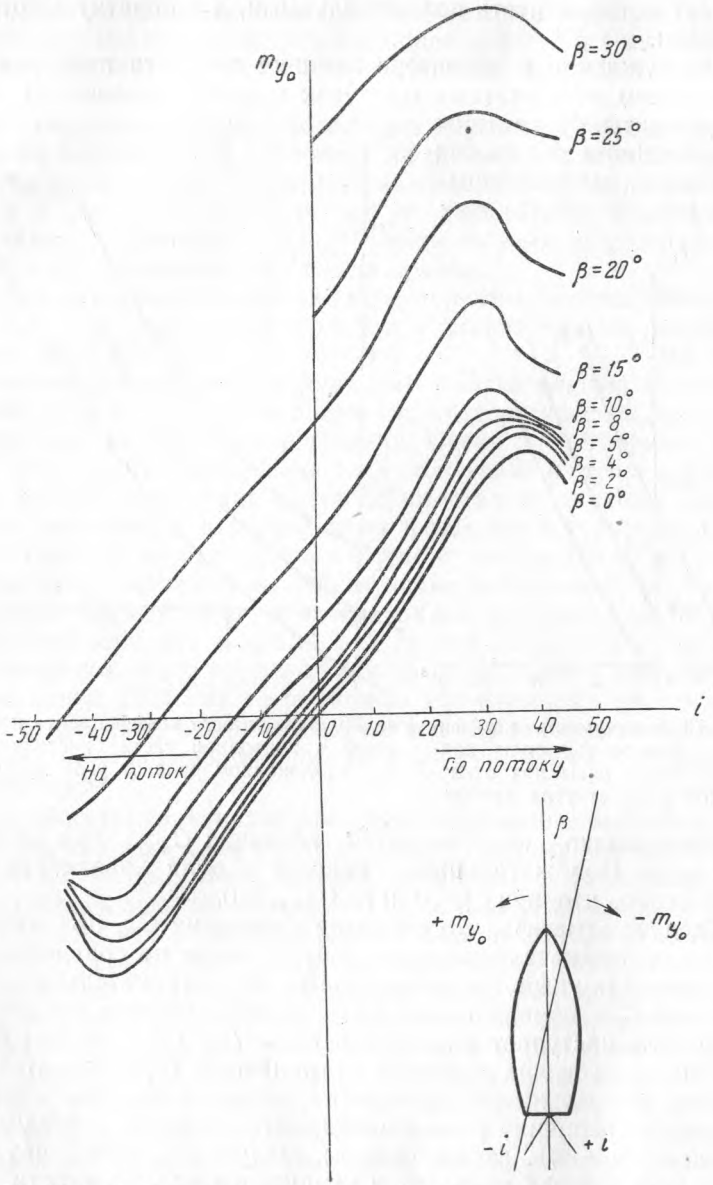


Рис. 81. Характер изменения $m_{y_0}=f(i)$ при различных β

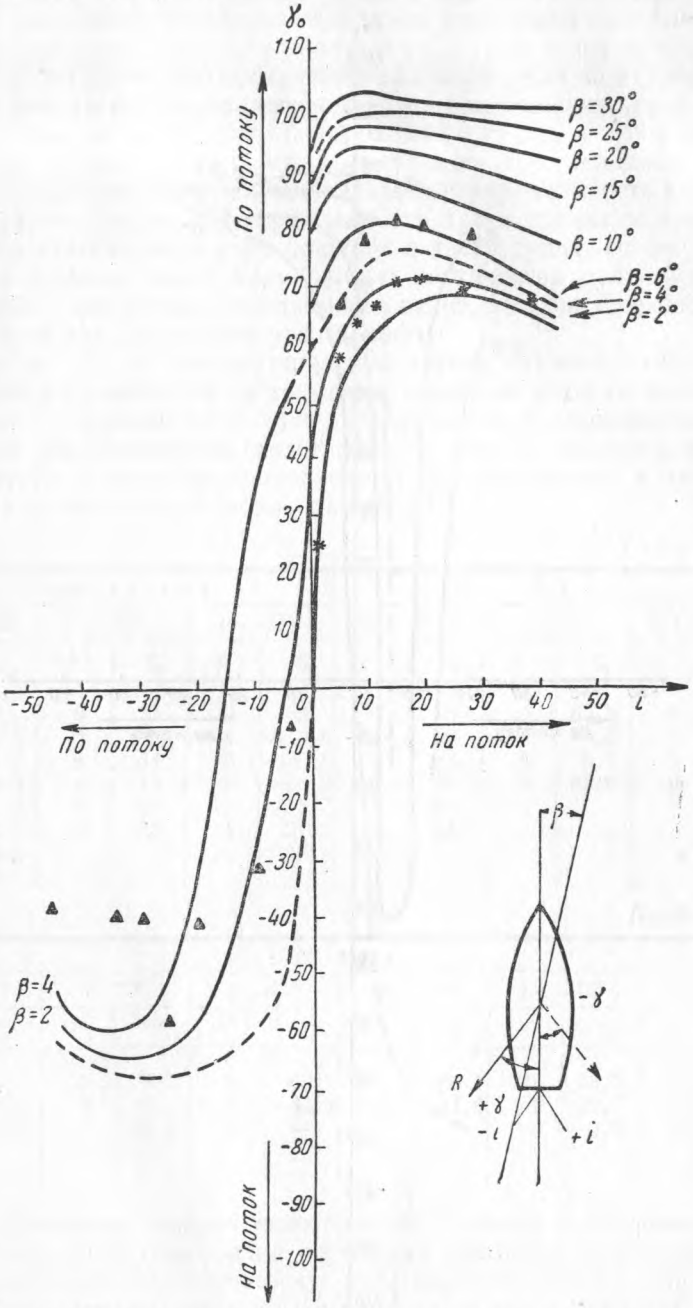


Рис. 82. Отклонения полной силы сопротивления от направления диаметрали при различных i и β

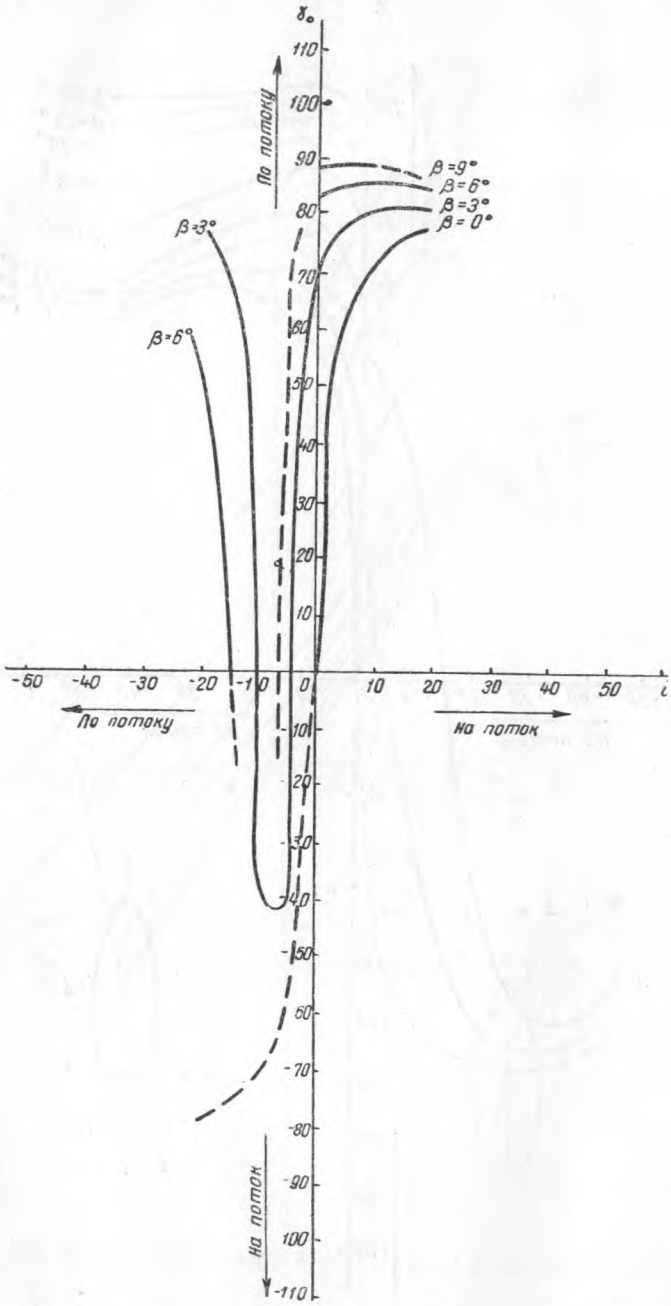


Рис. 83. Отклонение полной силы сопротивления от направления диаметральной плоскости при различных i и β для яхты

следних двух моделей продувки прекращались при углах дрейфа до 15°, а область отрицательных углов i освещена еще более бедно. Но большая разница в значениях C_{y_0} для углов дрейфа 10—15° говорит о том, что прекращение влияния руля на эту величину у бригантины и яхты должно наступить при бо́льших углах отклонения, чем у современного быстроходного судна, и это естественно хотя бы уже потому, что современное быстроходное судно имеет большую длину, а следовательно и управляемость его хуже. Вообще же говоря, как управляемость, так и предел ее при углах дрейфа зависят от формы подводной части судна, от отношения длины судна к длине пера руля и от качества руля. Одно несомненно: чем хуже управляемость судна, тем быстрее наступает потеря ее при увеличении угла дрейфа.

На рис. 82, 83 демонстрируется картина влияния поворота пера руля на отклонение общей силы давления воды на подводную часть от оси симметрии судна. Материалом, послужившим основанием для построения этих графиков, явилась продувка подводной части корпуса быстроходного судна, бригантины и яхты. Результаты вычислений сведены в табл. 10.

Таблица 10

Бригантина						Яхта					
$i=+25°$		$i=0°$		$i=-25°$		$i=0°$		$i=5°$		$i=10°$	
$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$
0	63	0	0	0	63	0	0	0	62,5	0	69,7
2	67,3	2	45	4	— 3,6	3	69	3	80,3	3	80,3
4	74,7	4	64	6	—35,8	6	83	6	85,2	6	86,1
6	78,3	6	73	8	—50,2	9	88	9	88,6	9	87,8
8	80,9	8	79	12	—58,2	12	91				
10	82,9	10	83	14	57,2	15	91,5				
12	84,4			16	54,2						
14	86,1										

Продолжение

Яхта											
$i=15°$		$i=20°$		$i=-5°$		$i=-10°$		$i=-15°$		$i=-20°$	
1	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$	$\beta°$	$\gamma_0°$
0	76,5	0	78,7	0	62,5	0	69,7	0	76,5	0	78,4
3	81,5	3	82	3	—41,2	3	—11,6	3	70,3	3	77,4
6	84,3	6	84,4	6	—			6	—0,2	6	53,4

Необходимо сделать некоторые объяснения к графикам. Как и прежде, угол отклонения пера руля считается положительным при повороте его навстречу набегающему потоку. За положительное отклонение силы сопротивления воды движению судна условимся считать ее отклонения по потоку от диаметрали, т. е.

в сторону, противоположную дрейфу. При таком условии знак отклонения силы R при угле дрейфа, равном нулю, для углов i с различными знаками будет неопределенным. Так как обозначения эти условны, будем считать в таких случаях знак отклонения силы независимо от знака угла i положительным.

Для определения отклонения полной силы давления от направления диаметрали судна по отношению ее составляющих в скоростных осях координат мы пользовались для диапазона углов $\beta = 0—90°$ формулой $\gamma = 90° + \beta - \zeta$. При продувках с повернутыми рулями в некоторых случаях C_{y_0} может принимать отрицательное значение. Это изменит вид формулы. Для углов β, меняющихся от 0 до 90°, формула примет такой вид

$$\gamma = 90° - \beta - \zeta \qquad \text{при } \beta + \zeta < 90°$$

$$\text{и } \gamma = \beta - 90° + \zeta \qquad \text{при } \beta + \zeta > 90°.$$

Обратимся теперь к графикам, изображающим изменение γ_0 при изменении β и i (см. рис. 82, 83). Кривая $\beta = 0°$ (сплошная линия) дает представление о виде этой зависимости для судна, движущегося без дрейфа. Изменение γ_0 происходит очень неравномерно. Наиболее заметно влияние поворота пера руля сказывается при изменении его в пределах от 0 до 15°. При дальнейшем увеличении i, γ_0, плавно увеличиваясь, доходит до своего максимального значения и затем начинает плавно падать. Если бы мы могли продолжить кривую для углов свыше 45°, то кривая вначале плавно, а затем, более резко снижаясь, дошла бы до 0°. Такое значение угол γ_0 имел бы при i, равном 90°. Если придавать углу i отрицательные значения, то картина в точности повторится. На чертеже эта кривая, симметричная первой, изображена в левой части чертежа.

При движении с дрейфом влияние поворота пера руля на γ_0 скажется иначе. Ход кривых для различных углов дрейфа показывает, что влияние поворота руля на величину γ_0 при дрейфе менее заметно, и оно уменьшается по мере увеличения его. Причем, это влияние более заметно при малых углах i (примерно от 0 до 10°). Если увеличивать углы i свыше 45°, то кривые будут стремиться к своим пределам — к величине γ_0 при $\beta = 0°$. Мы не располагаем данными для выяснения характера зависимости при углах дрейфа свыше 30°, но рис. 84, где изображено судно, движущееся под углом дрейфа 90°, показывает, что характер зависимости в этом случае будет иной, а именно: с увеличением угла $+i$, γ_0 будет уменьшаться до некоторой величины, а затем опять стремиться к своему нулевому значению. Отсюда следует предположить существование некоторого значения β, при котором поворот пера руля не будет влиять на величину γ_0.

До сих пор все рассуждения касались эффекта, вызываемого поворотом пера руля в положительную сторону. Область отрицательных углов i при движении судна с дрейфом оказывается чрез-

вычайно интересной в смысле особенностей управляемости судна и особенностей самого дрейфа. При $\beta = 0$ кривая в точности повторяет кривую для продолжительных углов i и ничем особенно не примечательна. Иное наблюдается для кривых при $\beta \neq 0$. При повороте пера в отрицательную сторону значение γ_0 уменьшается, что характеризует уменьшение величины проекции силы R на ось y. Затем кривая переходит через нуль, достигает некоторого отрицательного максимума, возвращается опять к нулю и после этого почти в точности повторяет ход кривой для соответствующего угла β при положительных значениях угла i.

Знак вращающего момента силы R при различных положениях пера руля определяется знаком угла γ_0 и положением, относительно центра тяжести судна, точки приложения этой силы. При движении с небольшими углами дрейфа точка приложения этой силы, как увидим ниже, находится близко к носовому перпендикуляру, но поворотами пера руля эту точку удается сместить на значительное расстояние вдоль по диаметральной плоскости к корме. Этим и достигается поворот судна в желаемую сторону.

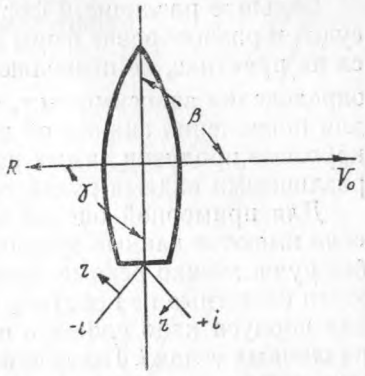


Рис. 84. Изменение угла отклонения силы R от направления диаметрали при движении с большими углами дрейфа

При движении с дрейфом процесс поворота осложняется наличием силы давления ветра на надводную часть судна. В зависимости от того, где приложена точка приложения этой силы, к носу или корме от центра тяжести, судно будет стремиться либо привестись, либо увалиться. Для удержания его на курсе понадобится в различных случаях поворот руля либо в положительную, либо в отрицательную сторону. Сопоставляя ход кривой $\frac{x}{l}$ (см. рис. 90) и изменение знака (рис. 82), убеждаемся, что условия для поворота судна при ветре и дрейфе вправо и влево, т. е. по ветру и на ветер, неодинаковы.

Обратимся теперь еще к одной особенности работы руля при наличии угла дрейфа. Когда угол дрейфа равен нулю, руль имеет нейтральное положение, т. е. сила R направлена по диаметрали при $i=0$. Во время дрейфа это положение руля соответствует некоторой отрицательной величине R, при этом, оказывается, может существовать не одно, а два нейтральных положения (см. рис. 82, 83). Ход кривой для быстроходного судна не позволяет проследить второе нейтральное положение руля, но для яхты оно очевидно. К сожалению, в этом случае мы не располагали материалом для определения смещения точки приложения силы R.

Более подробно об условиях поворота судна при ветре будет сказано в разделе о потере управляемости судна при ветре, здесь же ограничимся этими замечаниями.

Сопоставляя кривые на рис. 82, 83, т. е. кривые для судов, подводные части и рули которых совершенно различны по конструкции, мы все же обнаруживаем поразительное принципиальное сходство характера исследуемых зависимостей. Количественное различие обуславливается различием форм их подводных частей и конструкций рулей.

Большое различие в формах подводных частей существующих судов и разнообразие форм и конструкций рулей, употребляющихся на практике, не позволяют дать какое-то общее решение для определения зависимости $\gamma_0 = f_{2(\beta, i)}$. Поэтому крайне необходимо для пополнения знания об этой важной зависимости осуществить круговые продувки самых различных моделей подводных частей с различными видами рулей при различных углах их отклонения.

Для примерной оценки влияния руля на изменение угла γ_0, если имеются данные продувок модели с закрепленным рулем или без руля, можно рекомендовать простой графический способ. Для этого известные из продувок силы R при различных значениях β для корпуса надо сложить с силами, действующими на руль при различных углах i. Последние можно получить либо расчетным путем, либо из материалов продувок симметричных профилей. При этом оказывается возможным учитывать только нормальную к диаметрали составляющую силы, действующей на перо руля, так как это приведет лишь к незначительной ошибке.

Такие подсчеты были проведены для быстроходного современного судна при двух значениях угла дрейфа: $\beta=0°$ и $\beta=2°$. Сила, действующая на корпус $R_{корп}$, и угол ее отклонения от диаметрали $\gamma_{0\,корп}$ определялись по данным продувок модели подводной части судна. Для определения силы, действующей на руль $R_{руль}$, были использованы результаты продувок симметричного профиля М-1 (см. рис. 52). Этот профиль наиболее близок по форме к обычному профилю пера руля. Ошибка, которая допускалась при выборе коэффициента нормальной к диаметрали составляющей силы, действующей на руль, заключалась в том, что глубина, относительный размах и относительная толщина профиля М-1 и руля были неодинаковы, а лишь близки по своим значениям. Силы $R_{корп}$ и $R_{руль}$ определялись по формуле:

$$R = C \rho / 2 \, S V^2,$$

где:

C — коэффициент сопротивления подводной части судна ($\beta = 0°$, $\beta = 2°$) или пера руля, определяемый по поляре профиля М-1 в зависимости от угла атаки i;

ρ — плотность воздуха при 10°, равная 0,127 (так как расчет производился для модели, продутой в трубе);

S — площадь, к которой относился коэффициент;

V — скорость потока, равная 30 *м/сек* (при такой скорости велись продувки подводной части судна).

Так как у исследованной модели два руля, силу в дальнейшем пришлось удвоить.

Рис. 85 дает пояснение к вычислениям. На нем изображается расположение сил $R_{корп}$ и $R_{руль}$ при некотором угле дрейфа и угле поворота руля. Для сопоставления результатов расчета с результатами эксперимента вычисленные значения γ_0 нанесены на рис. 79, 82. Результаты сравнения показывают близкое совпадение расчетных данных (звездочки *) и экспериментальных кривых для случая, когда угол дрейфа равен нулю. Близкое совпадение обнаруживается и для случая, когда угол дрейфа равен 2° (треугольнички ▲), однако в области отрицательных углов i при значении, большем 10°, расхождение становится значительным, но характер кривых (расчетной и экспериментальной) одинаков. Расхождение, вероятно, надо объяснить наличием у модели двух рулей. При некоторых углах поворота струи, срывающиеся с одного руля, ухудшают работу другого. При расчете же каждый руль рассматривался независимо от другого и от корпуса. Значительные расхождения, появляющиеся при отрицательных углах i, объясняются влиянием корпуса. Это влияние особенно заметно во время движения с малыми углами дрейфа при двух рулях. Аналогичным способом были подсчитаны отдельные точки для яхты. Результаты убедили нас в том, что для этой модели совпадение результатов расчета и эксперимента довольно близкое.

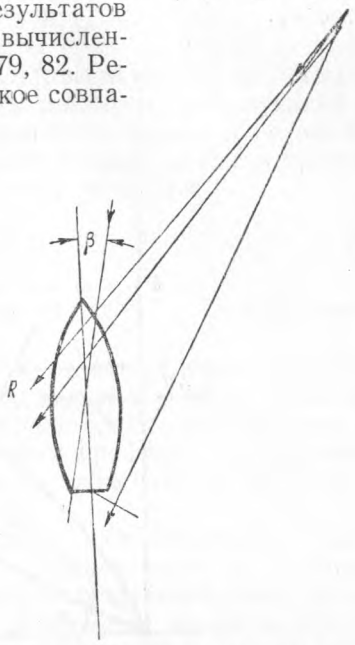


Рис. 85. Расчет угла отклонения суммарной силы сопротивления R

8. Многочисленные эксперименты убеждают нас в том, что основная роль в определении сил сопротивления движению судна как со стороны воды, так и со стороны воздуха при больших углах дрейфа (больше 15°) и практически при любых курсовых углах ветра принадлежит не силам трения, а силам давления.

Исследуя закономерности отклонения сил A и R от направления диаметральной плоскости, мы убедились также в том, что углы отклонения этих сил в основном определяются видом сечения судна по ватерлинии и видом проекций главных надстроек на пло-

скость, параллельную плоскости ватерлинии. Форма шпангоутов для большинства судов существенной роли в определении углов γ и γ_0 не играет. Исключением являются яхты с большими килями (см. рис. 30).

Этими двумя обстоятельствами можно воспользоваться для определения углов γ и γ_0 и их зависимостей от δ и β по чертежам судов (сечение по ватерлинии и проекции главных надстроек).

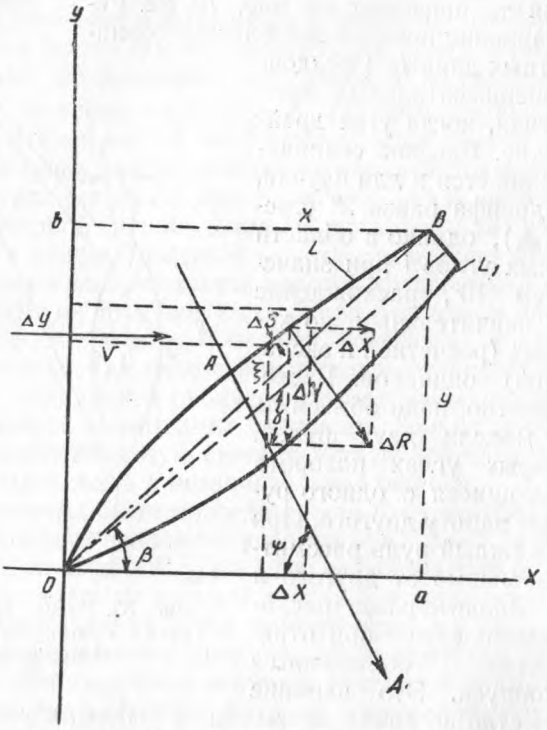


Рис. 86. Определение угла отклонения силы от осевой линии модели

Предположим, что на каждый малый элемент поверхности некоторого профиля, находящегося в потоке, действует сила давления, пропорциональная квадрату скорости потока и синусу угла наклона элемента поверхности по отношению к направлению потока. Пусть эти силы действуют как на наветренную, так и на подветренную часть профиля, т. е. будем считать, что за телом возникает явление подсоса (рис. 86). Тогда, просуммировав эти элементарные силы давления, мы можем найти направление суммарной силы давления, т. е. интересующий нас угол γ или γ_0.

Описанное предположение о возникновении силы, действующей на тело в потоке вязкой жидкости, есть представление грубое и лишь весьма приближенно соответствует данным современных исследований этих сил. Но сопоставление результатов подсчета γ и γ_0 для надводной и подводной частей судна по формулам, полученным, исходя из приведенных допущений, с результатами продувок показало хорошее совпадение. Это дало нам основание предложить указанный способ расчета γ и γ_0 как чисто практический, не вдаваясь в теорию вопроса.

Минуя проделанный нами путь построения формулы для вычисления направления суммарной силы давления, действующий на некоторый профиль, находящийся в потоке, запишем ее окончательный вид. Направление силы, действующей на часть профиля OAB (см. рис. 86) длины L определяется формулой

$$\operatorname{tg}\psi=\frac{XY}{L^2-X^2}, \tag{41}$$

где ψ — угол, составляемый суммарной силой с направлением потока (см. рис. 86).

Из рис. 86 видим, что Y есть максимальная ордината кривой L, а X абсцисса точки кривой L, имеющей максимальную ординату. Для того чтобы определить направление силы, действующей на переднюю и тыловую части поверхности профиля, в уравнение (41) следует подставить соответственно значения L и L_1, X и Y при этом не меняются.

Силы, действующие на наветренную и подветренную части поверхности профиля, оказываются одинаковыми по величине. Поэтому для определения направления суммарной силы давления следует геометрически сложить полученные две силы A_1 и A_2, задав им произвольную, но одинаковую величину (см. рис. 86). Зная угол β и угол ψ суммарной силы, легко определить γ.

Как видим, предлагаемый способ вычисления направления сил A и R чрезвычайно прост и позволяет определять эти направления для произвольного профиля по чертежу. Для этого необходимо лишь расположить оси координат так, чтобы начало их находилось в точке профиля, расположенного под некоторым углом к потоку, с минимальной ординатой, а ось x направить вдоль потока (см. рис. 86).

Сопоставление результатов определения углов отклонения сил давления потока воды и воздуха, действующих на надводную и подводную части судна(γ и γ_0), полученных с помощью продувок и расчетным путем, приведено на рис. 87. Причем, для подводной части приведены две кривые: кривая *1*, полученная при продувке модели без винтовых установок, и кривая *2* для модели с винтовыми установками (на модели винтам соответствовали диски одинакового с ними диаметра). При вычислении направления силы давления в качестве профиля, определяющего направление силы, действующей на подводную часть судна, была взята проекция его на

плоскость ватерлинии. Для определения силы давления ветра на надводную часть использовалась эта же проекция и, кроме нее — проекция на ватерлинию полубака и проекции трех основных надстроек (рис. 88, 89). Так как расстояние от ватерлинии до главной палубы примерно равно расстоянию от главной палубы до полубака, а высоты надстроек также равны этому расстоянию, то услов-

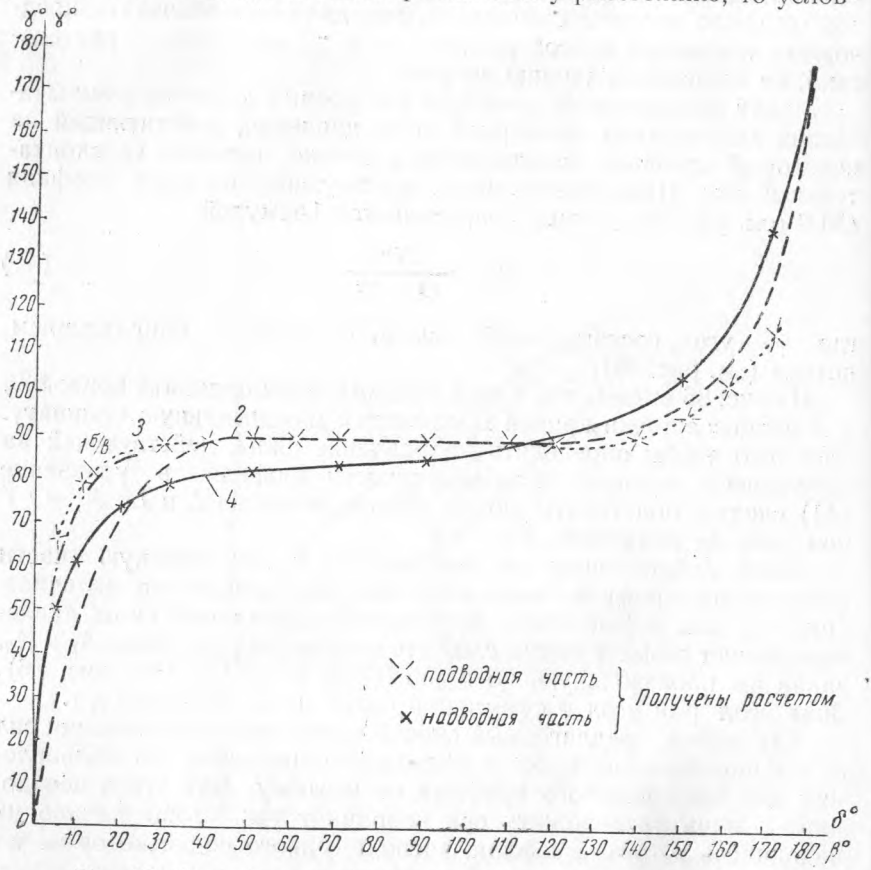


Рис. 87. Сопоставление расчетных значений γ. γ_0 с результатами продувок быстроходного судна

ные величины сил, полученные отдельно для каждой проекции, складывались, будучи умноженными на коэффициент, равный 1. Если бы указанные высоты и расстояния были неодинаковые, то силы надо было умножить на коэффициенты, определяющиеся отношением этих расстояний к некоторому одному, для которого этот коэффициент принимается равным единице.

Вид кривых для моделей с винтовыми установками и без них показывает, что при малых углах атаки (от 0 до 30°) роль винтовых установок значительна и, поскольку они дают сравнительно

большую продольную силу, кривая для модели с винтами в этой области изменения углов атаки поднимается более полого, чем та же кривая для модели без винтов. Поэтому при сравнении результатов вычислений с результатами продувок при углах атаки от 0 до 30° использовалась кривая *1*. Для углов от 30 до 150° можно было использовать кривую *2*. К сожалению, мы не располагали продувками модели без винтовых установок для углов атаки от 150 до 180°, и поэтому оставалось лишь предположить, что кривая в этой области расположится несколько ниже кривой *2*.

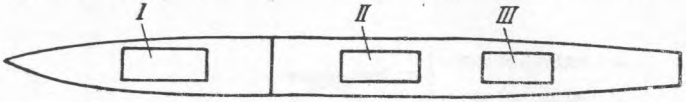


Рис. 88. Контуры судна для нахождения γ, γ_0 расчетным путем

Кривая *3* на рис. 87 дает представление об изменении угла γ, полученного из расчетов. Как видим, значения, полученные расчетным путем, совпадают со значениями, полученными из продувок. Для углов атаки, меньших 20°, наблюдается некоторое расхождение, причем расчетная кривая лежит выше экспериментальной. Это объясняется тем, что силы трения при расчетах не учитывались. В самом деле, при малых углах атаки роль силы трения возрастает и, не учитывая ее, мы, естественно, получим более зна-

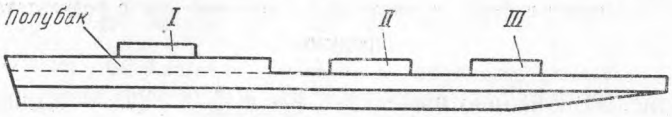


Рис. 89. Контуры судна для нахождения γ, γ_0 расчетным путем

чительные ошибки, чем ошибки, получаемые в случае больших углов атаки. Если бы иметь данные о соотношении величин сил трения и давления для элементарных площадок, повернутых под различными углами к потоку, то аналогичными расчетами можно было бы приближенно учесть и силу трения.

Кривая *4* построена по результатам продувок надводной части. Крестиками отмечены значения γ, найденные для различных углов атаки расчетным путем. В данном случае совпадают результаты расчета и эксперимента для всех углов атаки от 0 до 180°, и это понятно, так как роль сил трения по сравнению с силами давления для надводной части ничтожна даже при малых углах атаки.

9. Исходя из тех же предположений, оказывается возможным вычислить и точку приложения, вернее, точку пересечения суммарной силы давления, действующей на надводную или подводную части судна, с диаметральной плоскостью. Положение этой точки,

меняющееся в зависимости от курсового угла ветра и угла дрейфа, определяет рыскливость и поворотливость судна при ветре. Можно предположить, что центр давления надводной и подводной частей при различных углах δ и β находится в центре площади проекции их на плоскость, перпендикулярную направлению потока. Тогда, определив любым способом центр площади проекций надводной и подводной частей судна и умножив расстояние этой точки от носового перпендикуляра на $\sin\delta$ или $\sin\beta$, найдем точку пересечения силы давления с диаметральной плоскостью судна, вернее, расстояние от этой точки до носового перпендикуляра (a, b).

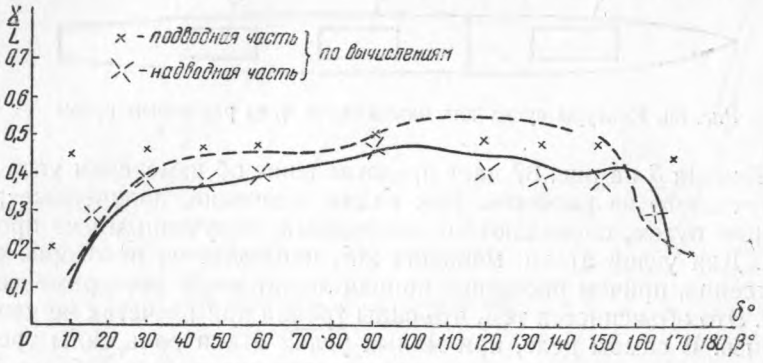


Рис. 90. Сопоставление вычисленных значений $\frac{x}{L}$ с результатами продувок

На рис. 90 показано изменение $\frac{a}{L}$ и $\frac{b}{L}$ (L — длина судна между носовым и кормовым перпендикулярами) в зависимости от δ и β для подводной и надводной частей современного быстроходного судна, полученное из продувок моделей. Там же пунктирными и сплошными крестиками нанесены вычисленные значения этих отношений. Для надводной части (сплошная кривая) совпадение вычисленных и экспериментальных результатов надо признать вполне удовлетворительным в пределах изменения угла δ от 20 до 160°.

Кривая для подводной части (пунктирная линия) недостаточно надежна, так как при эксперименте модель сильно вибрировала. При углах атаки от 20 до 65° вибрация была настолько значительна, что вообще не удалось произвести измерений. Поэтому, сравнивая эту кривую с вычисленными результатами, можно говорить лишь о совпадении порядка изменений величин. Но и в этом случае расхождение оказывается большим при малых носовых или кормовых углах атаки. Это расхождение можно объяснить влиянием сил трения и большей неравномерностью распределения давления при малых углах атаки, что приводит к значительному смещению точки приложения силы R к носу или к корме.

10. Описание аэродинамических и гидродинамических характеристик судна и завершим изложением характера зависимостей коэффициентов момента сил A и R и величины расстояния от точки приложения этих сил до носового перпендикуляра в зависимости от угла дрейфа, курсового угла ветра и угла поворота пера руля.

Коэффициенты моментов m_y, m_{y_0} определяются путем продувок моделей и вычисляются по формулам, аналогичным для вычисления коэффициентов сопротивления C и C_0. Знак y у коэффи-

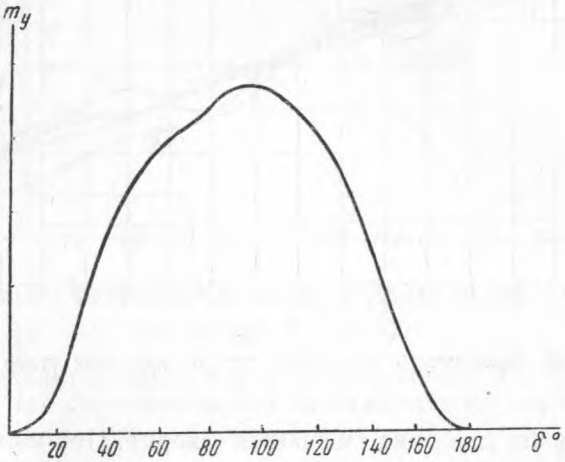


Рис. 91. Характер изменения коэффициента момента силы давления ветра на надводную часть (быстроходного судна) от угла δ

циента указывает, что имеется в виду момент, вращающий судно вокруг оси, проходящей отвесно через центр тяжести судна.

Для выяснения характера зависимости m_y и L (отстояние от носового перпендикуляра до точки приложения силы) от угла δ мы располагали результатами продувок моделей речных судов, модели современного быстроходного судна, а также результатами буксировок перевернутых моделей надводных частей трех морских судов. Рис. 90, 91 дают представление о характере изменения этих величин для надводной части модели быстроходного судна. Рис. 92, 93 характеризуют изменение этих величин для речных судов и для моделей, исследованных Хьюзом.

Анализ материала продувок позволяет сделать следующие основные выводы:

а) положение точки приложения силы давления ветра на надводную часть (центр парусности) зависит от формы надстроек;

б) для большинства судов эти зависимости в основном близки между собой. По мере увеличения угла δ центр давления перемещается от носа к корме. У судов с симметричными относи-

тельно мидель-шпангоута надстройками при $\delta = 90°$ центр давления располагается близко к середине. При дальнейшем увели-

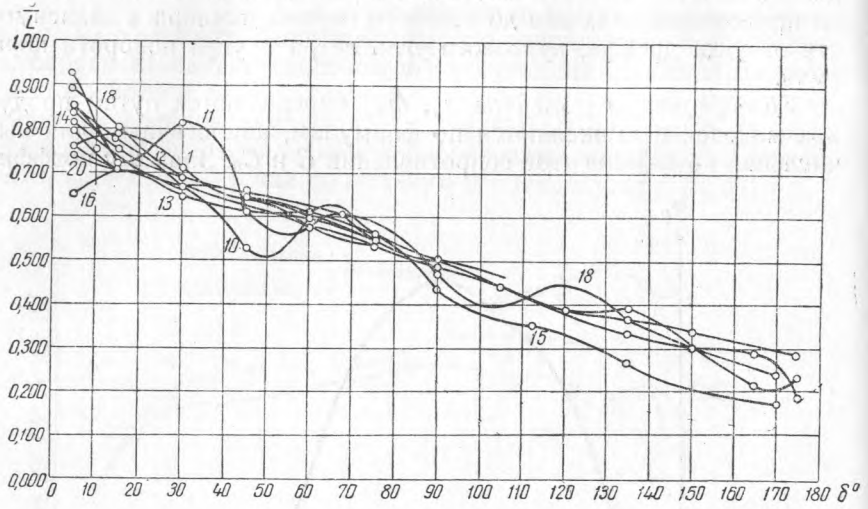


Рис. 92. Зависимость отношений $\frac{b'}{L}$ от курсовых углов ветра

чении δ центр давления смещается к корме. При малых углах δ положение центра давления для различных судов не так единооб-

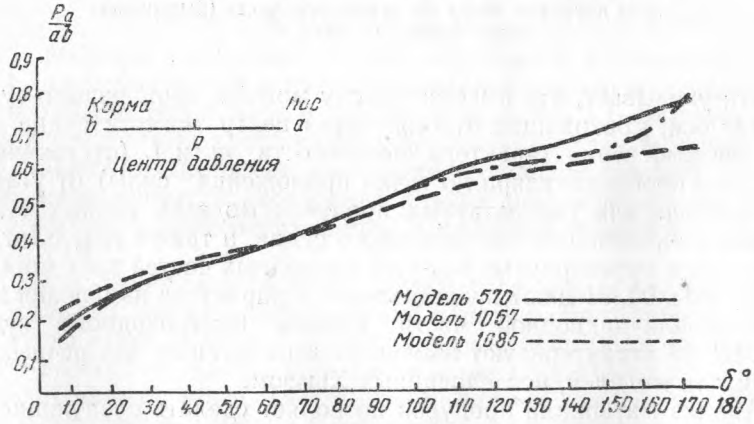


Рис. 93. Зависимость положения центра давления от угла буксировки

разно, как это наблюдается для углов от 20 до 160°. Это, видимо, объясняется неустойчивостью режима и трудностями эксперимента при углах, близких к 0 и 180°;

в) положение центра парусности при углах $\delta = 0°$, 180°, как уже говорилось, экспериментально вообще нельзя определить, и

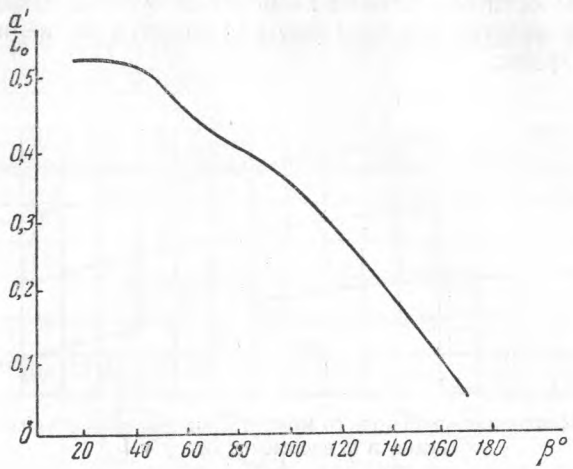


Рис. 94. Зависимость отношения $\frac{a'}{L_0}$ от угла дрейфа (см. модель 27, рис. 22)

поэтому приходится прибегать к экстраполяции. Но этот способ примитивен, так как соотношение находящихся на различных расстояниях от носа судна и плоскости ватерлинии площадей над-

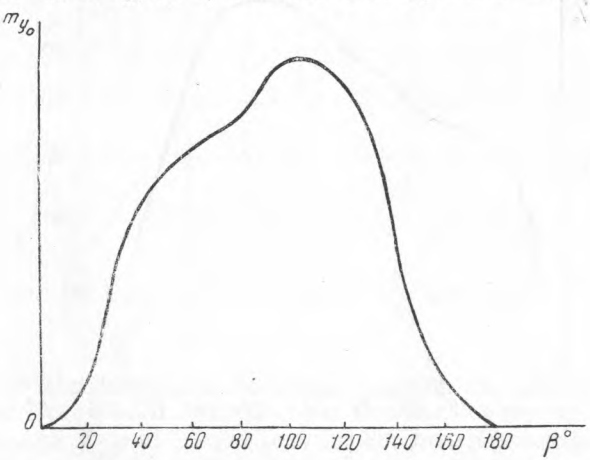


Рис. 95. Характер изменения момента силы сопротивления воды, действующей на подводную часть (быстроходного судна), в зависимости от угла дрейфа

строек может оказаться таковым, что точка приложения силы резко сместится вдоль по диаметрали. Поэтому при определении смещения центра парусности имеется в виду пересечение линии на-

правления действия силы с вертикальной линией, находящейся в диаметральной плоскости судна. Положение этой точки относительно плоскости ватерлинии на величине угла дрейфа практически не сказывается, но зато оно сказывается на величине угла ветрового крена;

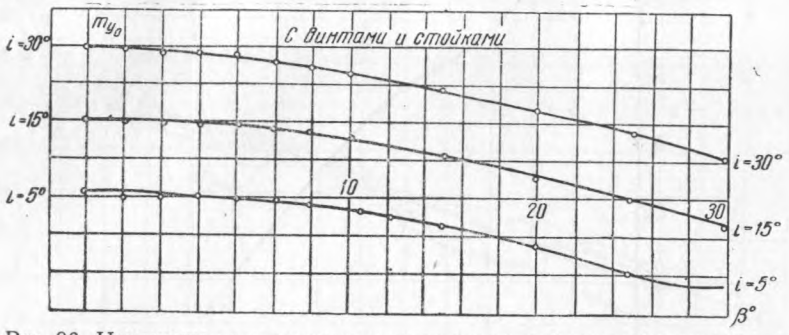


Рис. 96. Изменение вращающего момента подводной части быстроходного судна в зависимости от β и i

г) особое расположение надстроек, например, концентрация их в носовой части, может вызвать нарушение обычно наблюдаемого хода кривых $\frac{b}{L}$ и вызвать возвращение центра парусности к носу при углах ветра 130—150°;

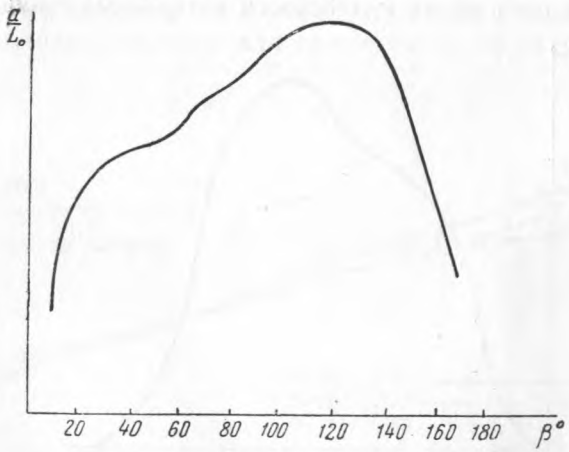


Рис. 97. Зависимость отношения $\frac{a'}{L_0}$ для быстроходного судна от угла дрейфа

д) величина коэффициента момента m_y определяется всем комплексом причин, обуславливающих величину $\frac{b}{L}$ и величину C_v, рассмотренную раньше.

Большинство исследований подводных частей судов ограничивалось лишь малыми углами дрейфа. Только для модели 27 и модели быстроходного судна мы располагаем материалом, позволяющим построить кривую изменения m_{y_0} и $\frac{a}{L_0}$ для углов β от 0 до 180° (рис. 90, 94, 95, 96, 97).

На рис. 98—102 изображено изменение этих величин в зависимости от β для речных судов и осредненные значения зависимости для трех морских судов, исследованных Хьюзом.

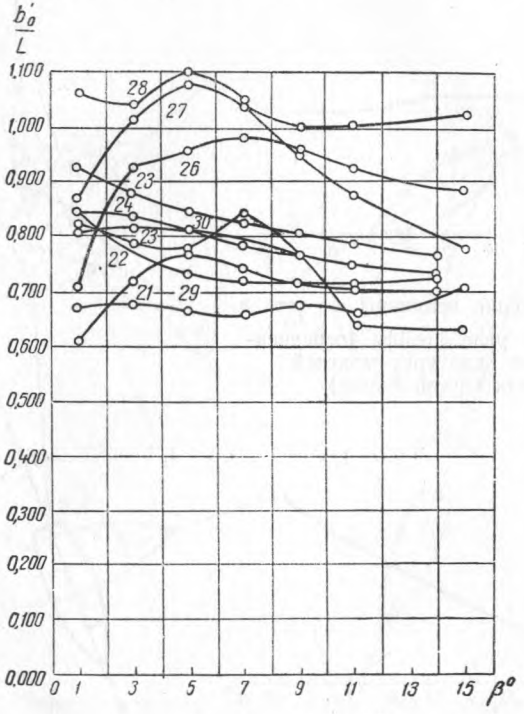


Рис. 98. Зависимость отношения $\frac{b'_0}{L}$ для речных судов от угла дрейфа

В качестве основного вывода можно привести одно соображение. Для большинства исследованных моделей судов при изменении угла дрейфа β в пределах от 1 до 20° центр давления оказывается практически неподвижным и находится от носового перпендикуляра на расстоянии, равном для различных моделей 15—20% их длины.

На рис. 81 приводилось изменение коэффициента момента m_{y_0} при изменении углов β и i. Момент, вращающий судно по направлению часовой стрелки, был принят за отрицательный. Пределы, к которым стремится момент при положительных и отрицатель-

ных углах i, указывают на наличие критического угла дрейфа — такого угла, при котором руль перестает действовать. Переход кривой m_{y0} через нуль характеризует величину смещения нейтрального положения пера руля при различных углах дрейфа.

11. Способ определения значений коэффициентов C и C_0 из натурных наблюдений на судне был изложен во 2-м пункте § 2 этой главы. Там же указывались причины, обуславливающие необходимость разработки таких способов, и их преимущества по сравне-

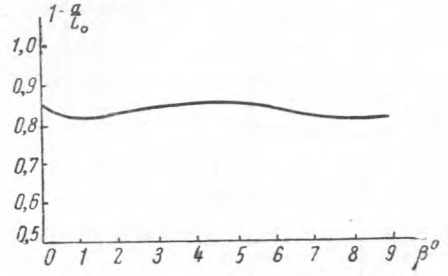


Рис. 99. Изменение величины $1-\frac{a'}{L_0}$ в зависимости от угла дрейфа (осредненное значение для трех моделей подводных частей Хьюза)



Рис. 100. Изменение осредненного для трех моделей подводных частей (Хьюза) коэффициента момента силы сопротивления в зависимости от угла дрейфа

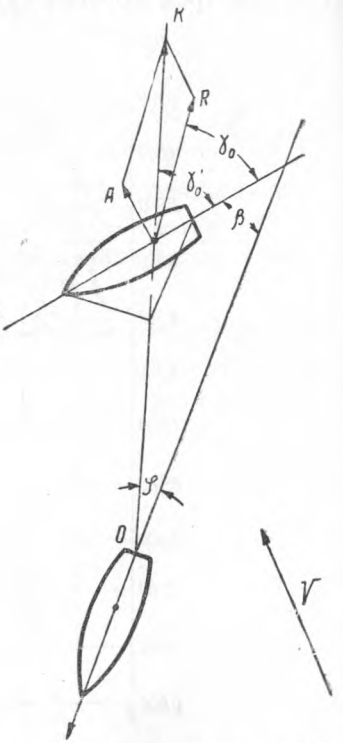


Рис. 101. Определение дрейфовых характеристик экспериментом в натуре

нию с другими способами. Теперь опишем натурный способ определения углов γ, γ_0 и их зависимостей от углов δ и β. Этот способ потребует специальных довольно сложных буксировок судна. Но если учесть важность определения поправки на дрейф судна, то трудности буксировок не должны стать препятствием на пути подобных определений. Начнем с зависимости ($\gamma_0 = f_2\beta$).

Эту зависимость можно определить для любого судна специальными буксировками его. Буксир крепят к испытываемому судну за две точки: на корме и на носу. Когда движение при буксировке установится, суда займут относительно друг друга опреде-

ленное положение. Угол между направлениями их диаметральных плоскостей — разница курсов — будет соответствовать углу атаки буксируемого судна, т. е. углу β. Пеленгуя с кормы направление буксира, найдем угол γ_0 (рис. 103). Искомый угол γ_0 характеризующий отклонение силы R от направления диаметральной плоскости, будет равен сумме этих углов: $\gamma_0=\beta+\varphi$. Действительно, сила R, приложенная к подводной части буксируемого судна, должна быть обратной по направлению активной силе, а ее направление совпадает с положением буксира. Подбирая

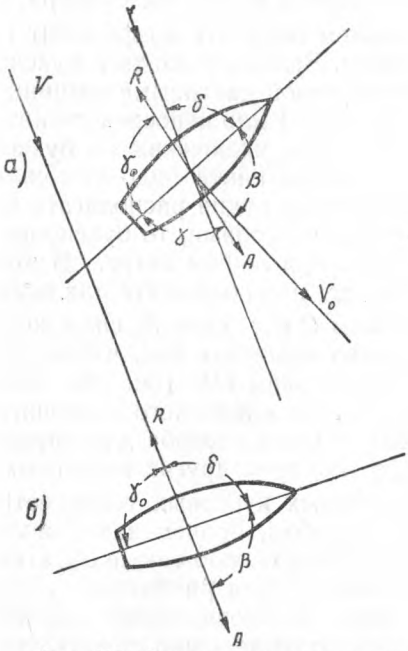


Рис. 102. Определение угла γ по наблюдениям за дрейфом судна с остановленными машинами

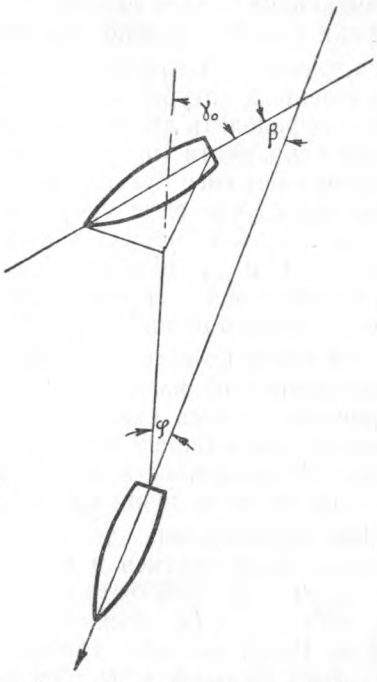


Рис. 103. Определение дрейфовых характеристик экспериментом в натуре

и вытравливая носовой и кормовой концы буксира, можно добиться любого угла β в пределах от 0 до 180°, под которым будет двигаться испытуемое судно относительно направления буксировки. Чтобы избежать влияния ветра на расположение судов, буксировки следует проводить в штилевую погоду и при таких скоростях, когда давление кажущегося потока воздуха на надводную часть мало по сравнению с силой R.

Определить влияние руля на величины γ_0 при таких буксировках чрезвычайно просто. Необходимо после определения угла γ при данном закреплении концов буксира и руля, поставленном на нуль, произвести серию аналогичных же наблюдений для различных углов поворота руля $+i$ и $-i$.

Такими маневрами будет учтено и волновое сопротивление для движения со скоростями буксировки. Чтобы определить влияние ветровой волны или зыби на исследуемую зависимость, необходимо повторить аналогичные наблюдения при наличии волнения. Для случая зыби методика наблюдений остается прежней, в случае же ветровой волны способ буксировки надо несколько изменить. Надо добиваться, чтобы буксируемое судно при установившемся движении располагалось кормой к ветру, а скорость была по возможности большей. Таким образом, удается уменьшить искажения, возникающие за счет давления ветра на надводную часть.

Если при буксировке удастся замерить силу тяги буксира, то тогда, разделив ее на $\rho_0/_2 S_{0(\beta)} V_0^2$, можем получить коэффицент C_0, определенный натурным наблюдением. Величину же тяги буксира можно определить двояко: по индикаторной диаграмме машины с учетом к.п.д. винта (приближенный способ) или непосредственным замером силы тяги буксира динамометром, включенным в буксир. В первом случае силу упорного давления винта надо умножить на $\cos\varphi$. Если, кроме C_0, для испытуемого судна располагать величинами C и γ, найденными другими способами, то буксировки для определения γ можно проводить при любом ветре. В этом случае, получив из наблюдений угол γ_0^s, надо отложить для испытуемого судна по известным значениям C и γ силу A, силу же R, определенную по известному C_0, надо отложить так, чтобы геометрическая сумма совпала с направлением OK (см. рис. 101). Таким образом определится угол γ_0. Из сказанного становится очевидной возможность использования этого способа для определения одной из величин C_0, C, γ_0, γ при трех других известных.

Для определения γ при различных курсовых углах ветра можно воспользоваться и другим способом, причем зависимость $\gamma_0 = f_2(\beta)$ должна быть известной. Этот способ также обратим, т. е. зная $\gamma = f_1(\delta)$, можно определить γ_0 для различных углов дрейфа. Идея способа такова: при установившемся дрейфе «на стопе» силы A и R равны и противоположно направлены. Следовательно, если для судна, дрейфующего с остановленными машинами, определить положение его диаметрали и направление дрейфа, то, зная направление силы R, легко определить и расположение силы A при наблюденном направлении ветра (см. рис. 102, *а*).

Для определения γ при различных углах δ проделываются следующие маневр и наблюдения. Судно ставится носом к ветру, гасится движение по инерции и стопорятся машины. Под действием ветра судно, дрейфуя, начнет разворачиваться до некоторого предельного угла $\delta_{пред}$. Во время этого разворота необходимо возможно чаще определять место судна, курс его и направление ветра.

Дрейф судна «на стопе» будет совпадать с направлением ветра только в тех случаях (см. рис. 102, *б*), когда при $\beta = 180° - \delta$ отклонение силы R равно $180° - \delta$, т. е. при $\delta = \gamma$.

У паровых судов такие условия — явление не редкое. У парусных же судов, наоборот, этот угол имеет очень большое значение. Соответствующим расположением парусов его стараются по возможности увеличить, когда необходимо двигаться круто к ветру.

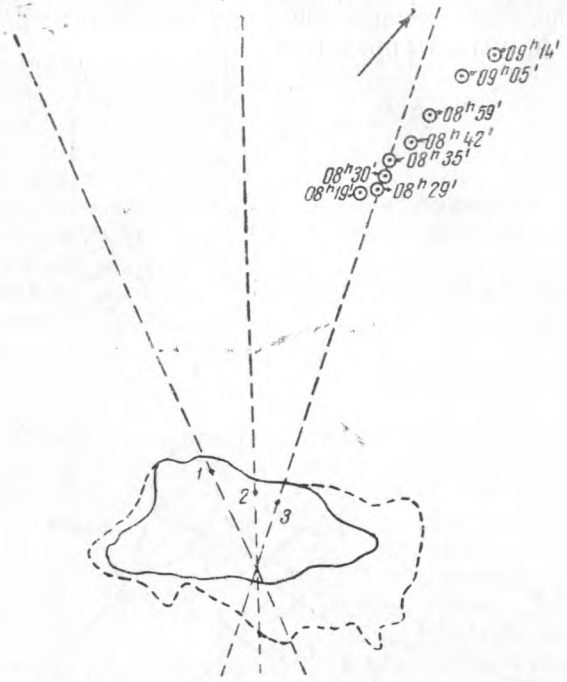


Рис. 104. Определение угла γ по наблюдениям за дрейфом судна с остановленными машинами

Центр тяжести судна за время разворота под действием ветра опишет некоторую кривую линию. Построив для точек этой кривой, в которых производились наблюдения курса судна и направления ветра, касательные, и предположив, что эти касательные определяют направление установившейся скорости дрейфа для бесконечно малых отрезков времени, легко определить γ для различных углов δ. Чтобы проследить изменение γ при δ, меняющемся от 0 до 180°, необходимо повторить маневр, но перед маневром судно надо поставить кормой к ветру и затем дать ему возможность разворачиваться опять до предельного угла $\delta_{пред}$.

На рис. 104 приводится выкопировка из прокладки, производившейся во время работ по исследованию дрейфа. Интересующий нас участок кривой, в конце которого судно уже лежит под предельным углом разворота к ветру, в увеличенном масштабе изображен на рис. 105, и там же произведены все построения для определения угла γ. Для испытуемого судна была взята зави-

симость $\gamma_0 = f_2(\beta)$, определенная при продувках модели современного быстроходного судна. Так как подводная часть этой модели сходна по форме с подводной частью судна, на котором проводились работы, и отношения основных размеров его были близки к соответствующим размерам этой модели, то допущение такое было законно. Вычисленные значения γ нанесены на рис. 106, изображающий результаты продувок.

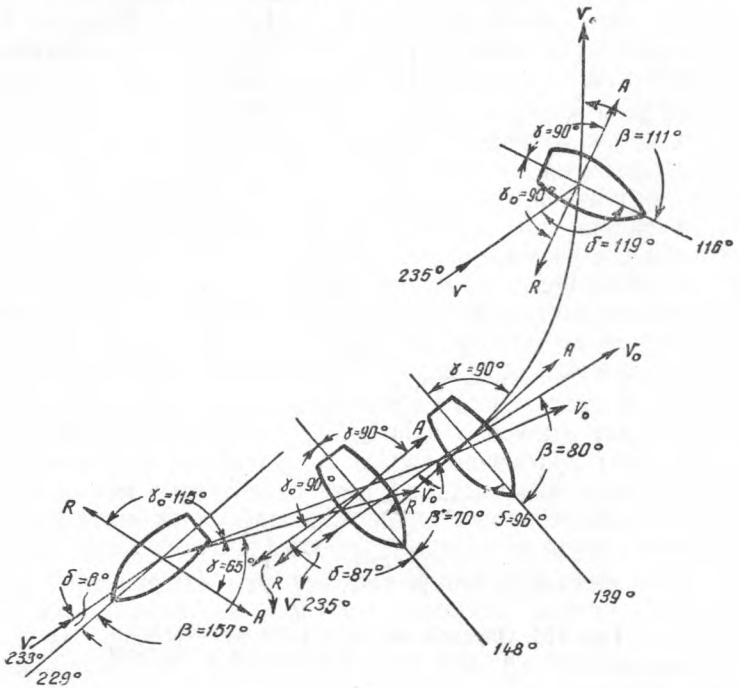


Рис. 105. Определение угла γ по наблюдениям за дрейфом судна с остановленными машинами

Определение места судна при этих наблюдениях велось по двум пеленгам. Точность этого способа для таких определений, конечно, недостаточна. Но так как при определении $\gamma = f_1(\delta)$ нет нужды знать истинное место судна, то можно определяться относительно любой закрепленной на якоре бочки, вешки или буя. Простым и достаточно точным способом определения места судна относительно буя будет определение по лотлиню, закрепленному на буе и стравливаемому с борта. Для определения места достаточно через определенные промежутки времени отмечать пеленг на буй, длину вытравленного (натянутого) лотлиня, направление его относительно диаметральной плоскости и курс судна. Такой примитивный способ, естественно, надо заменить, когда это возможно,

измерениями с помощью корабельного или ручного дальномера. Во время этих испытаний в районе работ необходимо измерить с катера, стоящего на двух якорях, поверхностное течение, чтобы внести поправки в траекторию движения центра тяжести судна.

12. Заканчивая раздел о натурных определениях дрейфовых характеристик, опишем способ определения их по наблюдениям угла дрейфа во время натурных испытаний. Этот способ был предложен Федяевским в его работе о дрейфе судна.

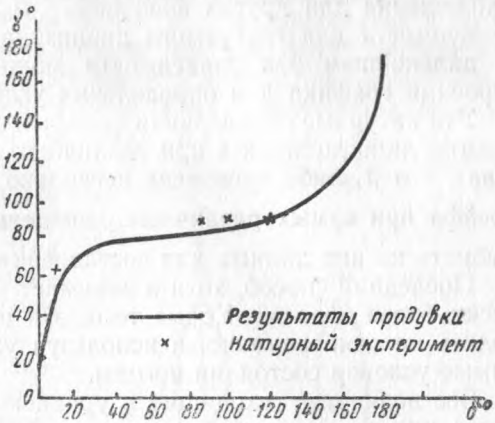


Рис. 106. Сравнение зависимостей γ от δ, полученных продувками и из натурных наблюдений

Если иметь для исследуемого судна достаточное количество примеров точного определения величины угла дрейфа при различных значениях δ, V, V_0, i, то, используя формулу для угла дрейфа и применяя метод наименьших квадратов, можно вычислить средние значения этих констант, которыми и следует пользоваться в дальнейшем при практических вычислениях угла дрейфа.

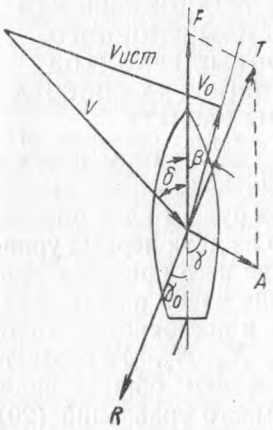


Рис. 107. Расположение сил, действующих на судно, при установившемся прямолинейном движении

Из рис. 107, где изображено условие равновесия сил, необходимое для установившегося движения судна с дрейфом, следует, что

$$\operatorname{ctg}\gamma_0 = \frac{F}{A\sin\gamma} - \operatorname{ctg}\gamma. \qquad (42)$$

Углы отклонения сил давления A, R—γ, γ_0 и коэффициент сопротивления C зависят от курсового угла ветра или угла дрейфа.

Тогда для определенных значений δ и β формула (42) примет следующий вид:

$$\gamma_{0n} = \operatorname{arc\,ctg}\left(\frac{F}{C'\rho/_2 S' V^2 S\,\gamma_n'} - \operatorname{ctg}\gamma_n'\right), \qquad (43)$$

где γ_n' и γ_{0n}' — значения величин γ, γ_0 по отдельным наблюдениям.

Если произвести несколько наблюдений (не менее трех) при различных отношениях $\frac{F}{V}$, добиваясь постоянства δ и β, то,

разрешая систему уравнений, можно определить три постоянные (для данных δ и β) величины: γ_0', γ', C'. Повторяя подобные же наблюдения для других значений δ и β, можно найти искомые зависимости для требуемого диапазона изменения этих углов. В дальнейшем эти зависимости можно использовать при построении графика для определения угла дрейфа.

Эти натурные определения дрейфовых характеристик надо проводить, либо добиваясь при различных значениях F и V постоянства δ и β, либо произведя несколько серий определений угла дрейфа при самых различных отношениях $\frac{F}{V}$ и значениях δ, выбрать из них данные для составления систем уравнений.

Последний способ, хотя и занимает много времени, но практически более простой. Кроме того, эти наблюдения можно производить не одновременно, а используя удобный момент и необходимые условия состояния погоды.

Все величины, входящие в уравнение (43), определяются на судне при помощи навигационных приборов, метеорологических приборов и по чертежам судна. Так как все эти наблюдения в дальнейшем послужат основанием для составления дрейфового графика для данного судна, их следует производить с максимальной тщательностью.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ДРЕЙФ СУДНА

§ 1. ДРЕЙФ СУДНА ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ УСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ УПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ВИНТА. ПОСТРОЕНИЕ ДРЕЙФОВЫХ ГРАФИКОВ И ПОРЯДОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ДРЕЙФА. ПРОВЕРКА СПОСОБА РАСЧЕТА УГЛА ДРЕЙФА И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

1. Рассмотрим случаи движения судна на прямом курсе с некоторой постоянной скоростью. Если не учитывать пока рыскание и вызванные им небольшие повороты пера руля, то для определения угла дрейфа β достаточно решить одно из двух первых уравнений системы или уравнение полных сил, для чего придется объединить уравнения (29) и (30). Два последних члена в этих уравнениях в силу допущения о прямолинейности и постоянстве скорости движения отпадают; составляющие N_x, X_0, N_y, Y_0 соответственно объединяются, так как мы рассматриваем общую силу, действующую на корпус и руль. Напишем вместо уравнений (29) и (30) уравнение для полных сил и воспользуемся им при определении угла дрейфа:

$$\overline{F} \pm \overline{A} = -\overline{R}. \tag{44}$$

Черточки над буквами указывают, что при сложении следует учитывать не только величину сил, но и их направление.

Наиболее простым и удобным для практики способом решения данного уравнения является решение графическим путем. Из-

ложим ход этого решения. Допустим, что судно при некотором ветре $V_{ист}$ движется под действием силы упорного давления винта F. Сила упорного давления винта всегда направлена к носу вдоль диаметральной плоскости судна (см. рис. 107). Так как на судно действует ветер, оно будет двигаться не вдоль диаметральной плоскости, а несколько в сторону. Угол между направлением диаметрали и направлением движения со скоростью V_0 будет углом дрейфа β.

Ветер, который ощущается на движущемся судне, отличается от истинного ветра. Для того чтобы получить величину и направление ветра, фактически действующего на судно, надо сложить геометрически скорость истинного ветра со скоростью движения судна, взяв ее с обратным знаком. Сумма их изображается на рис. 107 отрезком, обозначенным буквой V. Если ветер дует точно в нос, корму судна или по траверсу, то сила давления ветра A совпадает с его направлением.

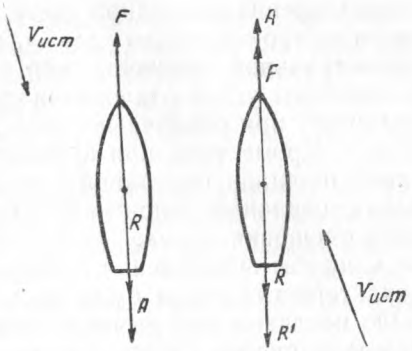


Рис. 108. К определению силы упорного давления винта

При всех других курсовых углах ветра она не совпадает с направлением ветра. Исходя из этого, на рис. 107 сила A и показана несколько отклоненной от направления кажущегося ветра V. Теперь, для того чтобы получить левую часть уравнения (44), необходимо сложить геометрически силы F и A. Сумма их равна силе T.

По условию задачи сила T должна уравновешиваться силой сопротивления воды движению судна, вызываемому силой T. Следовательно, должна возникнуть сила, приложенная к подводной части судна, равная по величине силе T и обратно ей направленная. На рис. 107 эта сила обозначена буквой R. Сила R точно так же, как и сила A, совпадает с направлением линии движения (она направлена в сторону, противоположную направлению движения) лишь в некоторых случаях, а именно: в случаях движения точно вдоль диаметральной плоскости судна на переднем или заднем ходах и в случае смещения боком по линии, близко совпадающей с плоскостью мидель-шпангоута. Но и такое совпадение наблюдается лишь в случае, когда перо руля находится в плоскости диаметрали судна.

Итак, найдя суммарную силу T, мы тем самым находим угол отклонения от диаметральной плоскости силы R. Если известна зависимость между этим углом и углом дрейфа, то по известному углу отклонения силы R можно найти угол дрейфа, обусловленный суммарной силой T.

Из приведенного описания видно, что для решения задачи о движении судна на прямом курсе и определения угла дрейфа штурман должен уметь определить силу упорного давления винта F, вычислить силу давления ветра на надводную часть судна A, определить угол отклонения силы давления ветра и силы сопротивления воды R от диаметральной плоскости судна для данного судна при данных конкретных условиях. А для этого штурман должен знать некоторые аэродинамические и гидродинамические характеристики своего судна: зависимость величины коэффициента сопротивления надводной части судна для полной силы давления ветра от его курсового угла δ, величины углов отклонения A от диаметральной плоскости при различных курсовых углах ветра и величины углов отклонения силы R от диаметральной плоскости судна при различных углах дрейфа и углах отклонения пера руля i. Кроме того, при вычислениях понадобятся значения проекций площади надводной и подводной частей судна на направления, перпендикулярные действию ветра и направлению истинного смещения судна.

Способы определения гидродинамических и аэродинамических характеристик судна были рассмотрены в главе первой. Там же было показано, как вычисляются по этим характеристикам силы, действующие на судно. Для решения задачи о дрейфе судна остается показать, как определяется сила упорного давления винта F.

2. Силу F можно определять двумя приближенными способами. В каждом из них сила упорного давления винта должна быть равна суммарной силе сопротивления, оказываемой водой и воздухом движению судна.

Тогда сила упорного давления винта или суммарная сила $\overline{R}+\overline{A}$ могут быть определены по следующей формуле:

$$Q=\mu(\overline{R}+\overline{A})V_0, \tag{45}$$

где:

Q— мощность, развиваемая машиной;

μ — к.п.д. винта;

V_0 — скорость движения судна.

Если бы коэффициент μ был известен, то силу упорного давления винта, равную при установившемся движении $\overline{R}+\overline{A}$, легко можно было бы вычислить по формуле (45), измеряя скорость движения судна V_0 по лагу, установленному под килем судна или, лучше, по забортному, так как последний фиксирует величину, более близкую к истинной скорости судна, чем лаг, жестко связанный с судном, фиксирующий составляющую скорость вдоль диаметрали. Мощность, развиваемую машиной, необходимо определять по индикаторным диаграммам.

Но к.п.д. винта в условиях практического плавания — величина далеко не постоянная. Она значительно зависит от осадки судна, особенно от режима волнения. Поэтому желательно найти такой способ определения силы упорного давления винта, в котором бы не требовалось знания к.п.д. винта, а его изменение учитывалось бы при измерениях по этому методу.

Опишем здесь два таких приближенных способа определения силы F.

Если считать, что судно, движущееся по заданному курсу, находится в состоянии установившегося движения, то, как известно, для сил, действующих на него, справедливо будет уравнение (44), которое перепишем в следующем виде:

$$\overline{F}=-\overline{R}\pm\overline{A}.$$

Предположим теперь, что в некоторый момент времени на судне были остановлены машины. Тогда сила F должна стать равной нулю, а судно должно было начать двигаться по инерции, постепенно уменьшая скорость движения. В каждый малый промежуток времени этого движения сила сопротивления воды и воздуха будет равна силе инерции.

По мере уменьшения скорости движения обе эти силы, оставаясь в каждый малый промежуток времени равными, уменьшаются, и для каждого такого промежутка справедливо следующее уравнение:

$$R\pm A=\overline{a}M. \tag{46}$$

где:

$\overline{a}$ — ускорение в данном случае со знаком минус, т. е. уменьшение скорости движения;

M — масса судна.

В свою очередь a приближенно можно записать так:

$$a\cong\frac{V_{01}-V_{02}}{t}\ (t\text{—время}).$$

Следовательно, если замерить сразу после остановки машин величину a и умножить ее на массу судна, то получим величину силы $R+A$, приблизительно равную силе упорного давления винта F при работе машин. Приблизительное равенство этих величин объясняется тем, что найденное a будет точно соответствовать не скорости V_{01}, равной скорости при работе машин, а некоторой скорости в промежутке V_{01}, V_{02}. Для того чтобы получить более точное равенство между найденным таким путем F и $R\pm A$, надо, прежде чем остановить машины, увеличить скорость судна на величину $V_{01}-V_{02}$.

Определяя при дальнейшем уменьшении скорости величины a и умножая их на массу судна M, можно получить $R\pm A$, а следовательно, и F, соответствующие скоростям движения

$$\frac{V_{02}-V_{03}}{2},\quad \frac{V_{03}-V_{04}}{2},\quad \frac{V_{04}-V_{05}}{2}$$

и т. д., пока V_0 не станет равным нулю или пока судно не начнет терять управляемость.

Описанный способ можно применять при ветре как с встречной, так и попутной составляющей. В этом легко убедиться, если обратиться к рис. 107. В первом случае сила упорного давления винта уравновешивается составляющими силы сопротивления воды и воздуха движению судна. После остановки машин именно эти силы, равные в первый момент в сумме силе упорного давления винта, начнут уменьшать скорость движения судна. Во втором случае после остановки машин сила давления ветра, влекущая судно, компенсируется соответствующим увеличением силы сопротивления воды. Сила же сопротивления воды, равная силе упорного давления винта, замедляет движение судна.

Из приведенных описаний ясно, как должен штурман составлять таблицы и графики для определения силы упорного давления винта по величине потери скорости судна при определенном состоянии поверхности моря для различных значений курсового угла и скорости ветра.

Из этого же описания видно, что если фиксировать скорости судна, к которым относятся данные определения ускорения *a*, то в последующем, при совпадении направления волны, курсового угла и скорости ветра, величину упорного давления винта можно определять по скорости, наблюденной по лагу, пользуясь ранее составленными графиками зависимости F от V_0 для различных значений волнения, ветра и осадки судна. Порядок этих определений следующий.

Сообщив судну максимальную скорость движения, надо зафиксировать высоту, длину, курсовой угол волны, курсовой угол ветра, скорость его и затем остановить машину. Через равные малые промежутки времени следует наблюдать изменение скорости судна и курсового угла ветра. Если на судне нет указателя скорости, необходимо определить пройденный по лагу путь за малые промежутки времени, ведя наблюдения до наступления момента потери управляемости судна, и затем найти по этим данным ход изменения скорости.

Результаты наблюдений следует заносить в следующую форму:

H= . . *м*; h= . . . *м*; V= . . *м/сек*; δ= . . . градусов

t'' \ $\psi°$	0				45				90				135				180			
	S	V_0	V	δ	S	V_0	V	δ	S	V_0	V	δ	S	V_0	V	δ	S	V_0	V	δ
0																				
5																				
10																				
15																				
20																				
и т. д.																				

В этой таблице H обозначает высоту волны ψ — ее курсовой угол, S — путь, пройденный судном, V — скорость, δ — курсовой угол ветра, h — осадку судна.

На основании данных этой таблицы строится график изменения скорости, или величины пройденного пути, за равные промежутки времени для всего периода наблюдений. Такой график изображен на рис. 109. По этому графику надо определить изменяющиеся значения a. Для этого ось x, по которой отложено время t, делится на равные отрезки; для каждого промежутка времени по кривой опре-

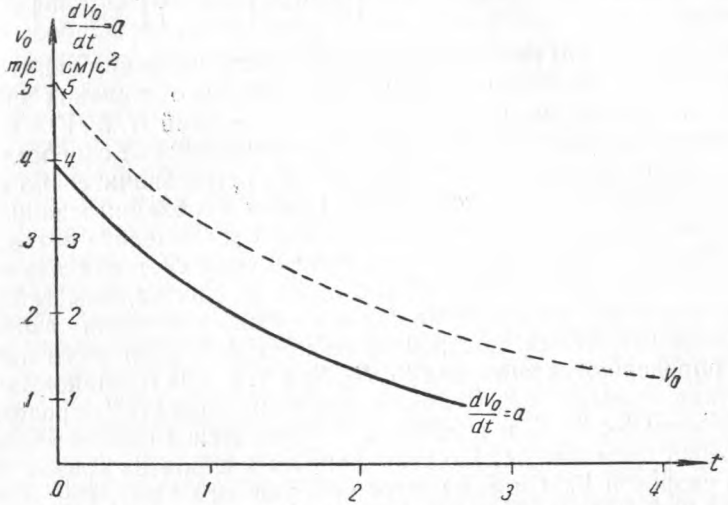


Рис. 109. К расчету силы упорного давления винта

деляется значение скорости V_0, отложенное по оси y. Искомые значения ускорения находятся по формулам

$$\frac{V_{00}-V_{01}}{\Delta t}=a_1; \quad \frac{V_{01}-V_{02}}{\Delta t}=a_2, \quad \frac{V_{02}-V_{03}}{\Delta t}=a_3 \text{ и т. д.}$$

Скорости, которым соответствуют найденные значения a, определяются по формулам

$$\frac{V_{00}+V_{01}}{2}=V_{0(1)}; \quad \frac{V_{01}+V_{02}}{2}=V_{0(2)}; \quad \frac{V_{02}+V_{03}}{2}=V_{0(3)} \text{ и т. д.}$$

Если теперь полученное значение ускорений умножить на массу судна, равную приближенно водоизмещению его при данной осадке, разделенному на ускорение силы тяжести 9,81, то получим значения силы упорного давления винта, которые следует занести в приведенную форму.

H= . . . *м*; h= . . . *м*; V= . . . *м/сек*; δ= . . . градусов

V_0 \ ψ_0	0	45	90	135	180
V_{01}					
V_{02}					
V_{03}					
V_{04}					
и т. д.					

По полученным значениям силы упорного давления винта строится график зависимости между силой упорного давления винта и скоростью движения для определенных значений H, h, V, δ и ψ. В тех случаях, когда скорость ветра мало отличается от скорости движения судна, значения V и δ кажущегося ветра значительно изменяются. Поэтому соответствующие графы необходимо заполнять из таблиц наблюдений, проведенных при тех значениях ветра, когда скорость и курсовой угол при уменьшении скорости движения судна достигали бы значений, соответствующих данным таблицы.

Если при наблюдениях на судне не было указателя скорости, то кривая изменения V_0 строится по кривой S. Для этого прежде всего определяются значения S_1, S_2, S_3 и т. д. для одинаковых промежутков времени Δt. Искомые значения скоростей определяются делением S_1, S_2, S_3 и т. д. на Δt и относятся к середине каждого отрезка времени Δt. По этим данным и строится кривая изменения скорости V_0. Способ построения указан на рис. 109.

Для удовлетворения практических нужд плавания для каждого судна надо построить графики зависимости F от V_0 при следующих значениях H, ψ, h, V, δ:

H — 1; 2; 3 *м*; ψ — 45; 90; 135°; $H_{ср}$ — без груза, максимальная, средняя; V — 5; 10; 20 *м/сек*; δ — 45, 90, 135°. Величина упорного давления винта в случае промежуточных значений указанных величин определяется интерполяцией. Таким образом, всего необходимо построить 243 графика. Однако, если учесть, что волны в 2 *м* при ветре 5—10 *м/сек*, 3 *м* при ветре 5—15 *м/сек* обычно не наблюдаются, а углы δ и ψ при значительных скоростях ветра обычно совпадают, то практически для каждого судна потребуется построить около 50 графиков. Но и это количество графиков все же весьма большое, и для составления их потребуется много времени, тем более что все необходимые измерения невозможно провести одновременно, так как придется ожидать подходящих условий состояния поверхности моря, скорости и курсового угла ветра. Не обесценивает ли это предложенный способ и не заставляет ли отказаться от составления подобных графиков? Нет. Что представляют собой описанные графики? Это сводка определений упорного давления винта по скорости движения судна при различных условиях движения. Будучи однажды определены, эти

данные в любых условиях плавания позволяют находить величину упорного давления винта, необходимую для вычисления угла дрейфа, по скорости движения судна. Это позволит избежать каких-либо иных измерений и нарушений работы машин, что возможно далеко не при всех условиях плавания. Кроме всего, определение силы F по таким графикам занимает мало времени. В тех случаях, когда H, ψ, h, V, δ превышают значения, при которых составлялись графики, для более точных определений силы F при промежуточных значениях H, ψ, h, V, δ и, наконец, на период, когда графики составлены неполностью, можно рекомендовать другой способ. Определение силы F этим способом будет служить одновременно и источником для заполнения еще не составленных графиков, для чего только необходимо во время наблюдений фиксировать величины H, ψ, h, V, δ.

Способ основывается на тех же предпосылках, на которых основывался и способ, описанный выше.

Допустим, что судно при определенных условиях погоды и состояния поверхности моря движется по заданному курсу и в некоторый момент потребовалось определить угол дрейфа, а следовательно, и величину силы упорного давления винта. Допустим, что скорость движения равна V_0. Для определения силы F увеличением числа оборотов машины скорость движения следует увеличить на незначительную величину ΔV_0. После этого застопорить машину на некоторый промежуток времени. В течение этого промежутка скорость будет иметь значение $V_0 - \Delta V_0$, затем машине можно вновь дать ход, и судно будет продолжать свое измененное на короткий промежуток времени движение. Зная время, в течение которого скорость судна изменилась с величины $V_0 + \Delta V_0$ до величины $V_0 - \Delta V_0$, т. е. на величину $2\Delta V_0$, можно определить, разделив $2\Delta V_0$ на промежуток времени Δt, искомое ускорение a. Умножив a на массу судна при данной осадке, получим необходимую для дальнейших вычислений силу F.

В тех случаях, когда на судне нет указателя скорости движения, силу F можно найти следующим образом. Повысив число оборотов машины, по показаниям лага и секундомеру определить величину ΔV_0. После того как машина будет застопорена, в течение некоторого промежутка времени необходимо отмечать показания лага за равные малые отрезки времени Δt. В дальнейшем поступают точно так же, как это описано в первом способе. Прежде всего надо построить кривую для пройденного за равные промежутки времени пути и по ней построить кривую изменения скорости. По этой кривой находится значение $V_0 - \Delta V_0$ и промежуток времени, который потребовался для снижения скорости движения судна от $V_0 + \Delta V_0$ до $V_0 - \Delta V_0$. Перед описанием способов определения силы упорного давления винта было отмечено, что способы эти приближенные. Приближенность их обусловливается с одной стороны, пренебрежением величиной присоединенной массы при неравномерном движении судна и, с другой — допущением,

что величина сопротивления воды движению судна при вращающихся и невращающихся винтах постоянная. Условно считается, что при движении судно увлекает некоторое количество воды, масса которой и называется присоединенной. Таким образом, масса судна как бы увеличивается на величину массы жидкости, движущейся со скоростью судна. Следовательно, определяя силы, действующие на судно, при неравномерном движении ускорение следует умножать на величину $M+м$, где $м$ — присоединенная масса, зависящая от формы судна и характера движения. Для того чтобы приближенно учесть присоединенную массу, масса судна увеличивается на 10 %.

Определение присоединенной массы не является строгим, но здесь мы вынуждены им ограничиться.

Незначительная погрешность в определениях F, обусловленная вторым допущением, позволяет в этой задаче пока мириться с ним.

3. Чтобы воспользоваться предложенным способом определения угла дрейфа, следует произвести для своего судна некоторые графические построения. После того как выбраны или определены одним из описанных способов дрейфовые характеристики данного судна, на листе бумаги или картона проводятся две окружности (рис. 110).

Точка O будет центром этих окружностей. Затем проводится линия MN, условно совпадающая с диаметральной плоскостью судна, направленного носом в сторону точки M. На окружности меньшего радиуса наносятся деления через 1°. Точка F скружности большего радиуса будет началом двух круговых шкал. На левой половине окружности следует нанести величины углов отклонения силы R от диаметральной плоскости (γ_0) против соответствующих углов дрейфа β. На правой половине окружности откладываются величины углов отклонения от диаметральной плоскости силы А (γ) против соответствующих курсовых углов ветра δ. В правой же части чертежа в соответствии с зависимостью $\gamma=f(\delta)$ откладываются векторы силы A, вычисленной для некоторой скорости ветра V. Концы этих векторов соединяются плавной линией.

Так как при постоянном курсовом угле ветра сила A зависит только от некоторой постоянной величины $C\frac{\rho}{2}S$ и квадрата скорости ветра V^2, то нет нужды строить кривые для различных скоростей ветра. Достаточно рассчитать изменение силы A при некотором одном значении угла δ_0 и по полученным данным определить, как будет меняться масштаб отложения силы при пользовании только одной кривой. Таким образом, масштаб силы A будет выбираться в зависимости от скорости ветра.

Вычисленные значения силы A для различных δ и V рекомендуется заносить в форму, приведенную на стр. 130. Максимальная скорость выбирается равной сумме двух скоростей: максимальной скорости ветра, возможной в данном районе моря, и максимальной

скорости движения судна. Графа со значениями силы A для различных скоростей ветра при некотором постоянном значении δ используется для вычисления изменяющегося масштаба силы F. При этом производятся следующие расчеты: отрезок (в миллиметрах), изображающий на графике (рис. 110) силу A при $\delta = 90°$, делится на величину силы A (в килограммах) для всех значений скоростей ветра. График изменения масштаба силы F в зависимо-

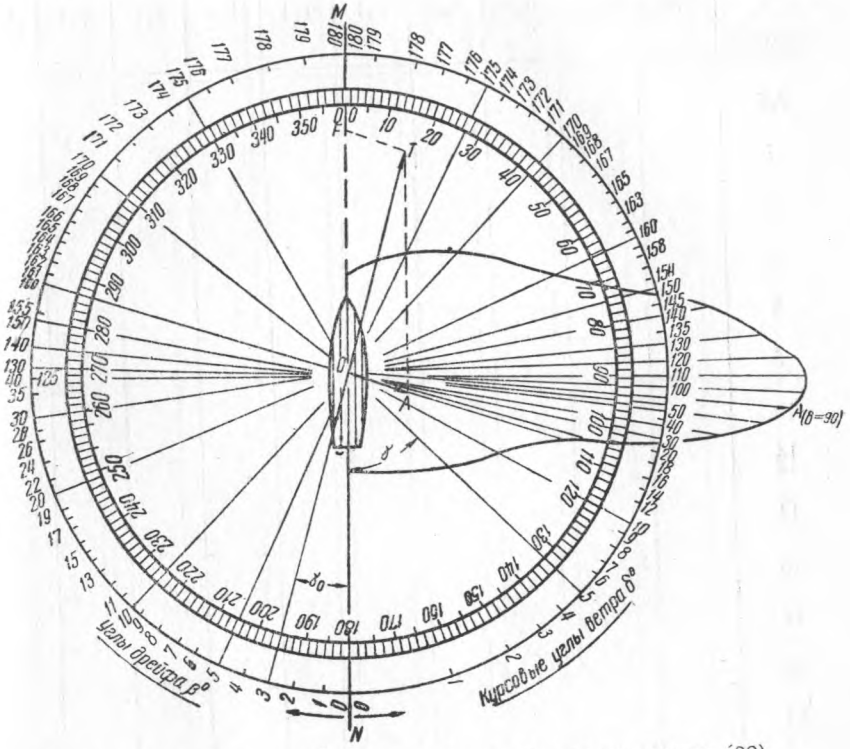


Рис. 110. График для определения угла дрейфа по уравнению (32)

сти от скорости ветра, построенный по таким расчетам, изображен на рис. 111. Рис. 110 и 111 составлены по данным для гидрографического судна.

Порядок определения угла дрейфа по графику (рис. 110):

а) с помощью анемометра и компаса определяется скорость V и курсовой угол кажущегося ветра δ;

б) одним из способов, описанных выше, определяется сила упорного давления винта F;

в) по значению V из рис. 111 определяется масштаб, и в этом масштабе откладывается сила F. [Примеры: 1) $V = 15$ *м/сек*,

δ^0	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80
$S_{(\delta)}$ м²	90	120	140	184	225	258	284	301	310	310
c_δ / V м/сек	0,8	0,85	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
0,5										
1										
2										
4										
6										
8										
10										
12										
14										
16										
18										
20										
22										
24										
26										
28										
30	4 115	5 835	7 200	10 530	14 150	16 230	17 850	19 030	19 520	19 520

Примечания:

1. Проекция площади судна на площадь, перпендикулярную направлению
где $S_{(0^\circ)}=90$ м², $S_{(90^\circ)}=300$ м².

2. В графах $S_{(\delta)}$, $C_{(\delta)}$ помещены значения вычисления проекций площади углов δ.

3. Цифры в графе для $\delta=90^\circ$ характеризуют изменение силы A в зависимо

4. Цифры в графе для V=30 м/сек характеризуют изменение силы A при

различных δ и V ($A = C_{(\delta)}\ S_{(\delta)}\ \rho/_2\ V^2$)

90	100	110	120	130	140	150	160	170	175	180
300	310	310	301	284	258	225	184	140	120	90
1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,07	1,0	0,93	0,87	0,83	0,8
5,2										
20,9										
83,7										
335										
753										
1 340										
2 093										
3 011										
4 095										
5 354										
6 776										
8 370										
10 135										
12 045										
14 147										
16 460										
18 900	19 520	19 520	19 030	17 850	17 140	15 820	1 288	9 770	6 995	4 115

ветра, определяется по формуле $S_{\delta} = S_{(0°)} \cos \delta + S_{(90°)} \sin \delta$,

судна и известных из продувок коэффициентов сопротивления для различных

сти от скорости ветра.
этой скорости в зависимости от угла δ.

масштаб силы F — 25 *кг* в 1 *мм*. 2) V=4 *м/сек*, масштаб силы F — 1,8 *кг*].

г) по наблюденному значению δ и кривой на рис. 110 откладывают значение силы A (если сила F в выбранном масштабе выходит за пределы чертежа, то отрезки, соответствующие силам F и A, необходимо уменьшить в одинаковое количество раз);

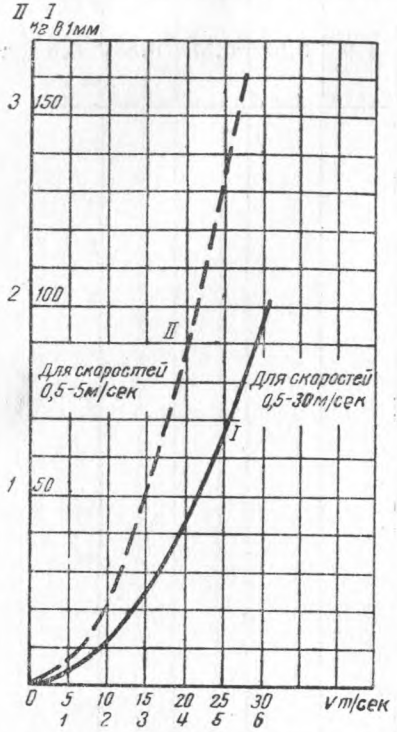


Рис. 111. График изменяющегося масштаба

д) силы A и F геометрически складывают. Полученную силу T линейкой продолжают в левую часть чертежа. На пересечении этой линии со шкалой угла β находится угол дрейфа, соответствующий данным условиям плавания [1].

В том случае, когда отношение A к F меньше $^1/_{10}$, угол отклонения суммарной силы T лучше определять по таблице значений тангенса углов, полагая, что отношение A/F приближенно равно тангенсу этого угла.

На рис. 112 приводится график для определения угла дрейфа, построенный по другим данным (современное быстроходное судно). В этом случае учтено и влияние угла поворота пера руля на дрейфовые характеристики, а следовательно, и на угол дрейфа. Зависимости $\gamma_0 = f_1(\beta)$ для различных положений пера руля отложены на частях соответствующих дополнительных окружностей в левой половине чертежа.

Для того чтобы учесть влияние пера руля на угол дрейфа, надо определить во время движения его среднее положение. Тогда искомый угол дрейфа β на графике следует отсчитывать на пересечении продолжения линии TO с окружностью, соответствующей этому среднему положению пера руля. Кривые, соединяющие одинаковые углы дрейфа, позволяют определить β для промежуточных углов поворота пера руля.

Для удобства вычислений можно рекомендовать простой прибор, изготовление которого возможно на судне.

4. Прибор для графического решения уравнения (44) изображен на рис. 113. Основанием прибора служит доска, покрытая

[1] При подсчете изменяющихся масштабов за начальный, от которого велся расчет, был взят масштаб, равный 100 *кг* в 1 *мм*.

миллиметровой сеткой; в центре доски изображен контур судна. Линия *EF* совпадает с диаметральной плоскостью судна. Доска покрыта двумя слоями плексигласа. Первый слой толщиной до 1 *мм*, и в нем сделаны три выреза (см. рис. 95). Толщина второго слоя 1,5—2 *мм*. На штифте, проходящем через условный центр тяжести судна, насажена вращающаяся линейка, сделанная так-

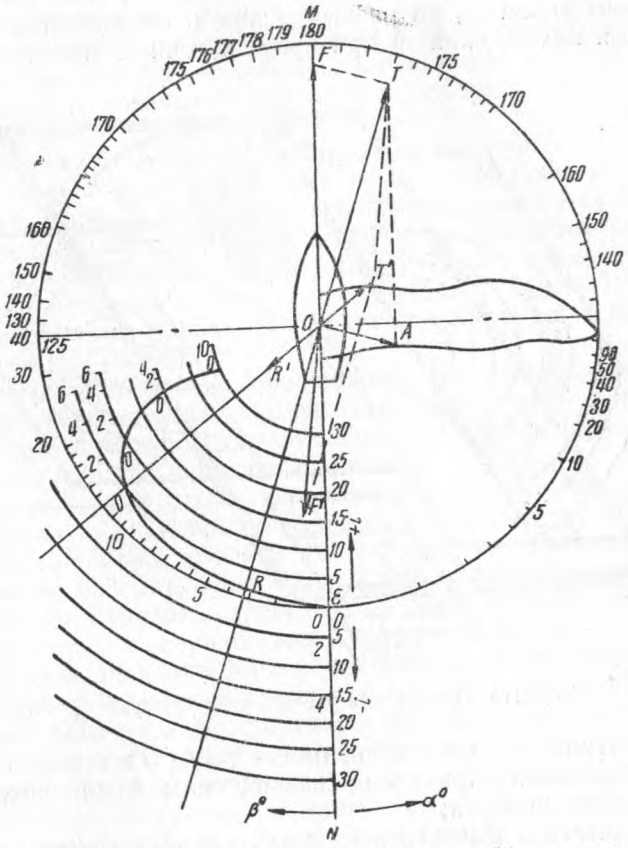


Рис. 112. График для вычисления угла дрейфа с учетом влияния угла *i*

же из плексигласа. В вырез *1, 2, 3* вставляются пластины из миллиметрового плексигласа. На вставке *1* нанесена полуокружность с градусными делениями без указания значений градусов. На вставке *2* нанесены несколько окружностей разного диаметра. Вставка *3* никаких делений не имеет. Кроме того, на верхнем слое плексигласа направо от точки *F* нанесена $^1/_8$ часть окружности с более точными делениями и с указанием их значений. Влево от линии *EF* нанесена полуокружность такого же диаметра, также с делениями и их значениями.

Располагая таким прибором и имея для своего судна определенные тем или иным путем зависимости $\gamma=f_1(\delta)$, $\gamma_0=f_2^1(\beta,i)$ и $C=f(\delta)$, штурман заблаговременно должен сделать следующие расчеты и построения:

а) нанести на вставке *2* зависимость $\gamma_0=f_2'(\beta,i)$, при этом зависимости, определенные для различных углов i, откладываются на соответствующей окружности, а значения γ_0, соответствующие одинаковым углам β, но разным углам i, соединяются плавной кривой для нахождения β при промежуточных значениях i;

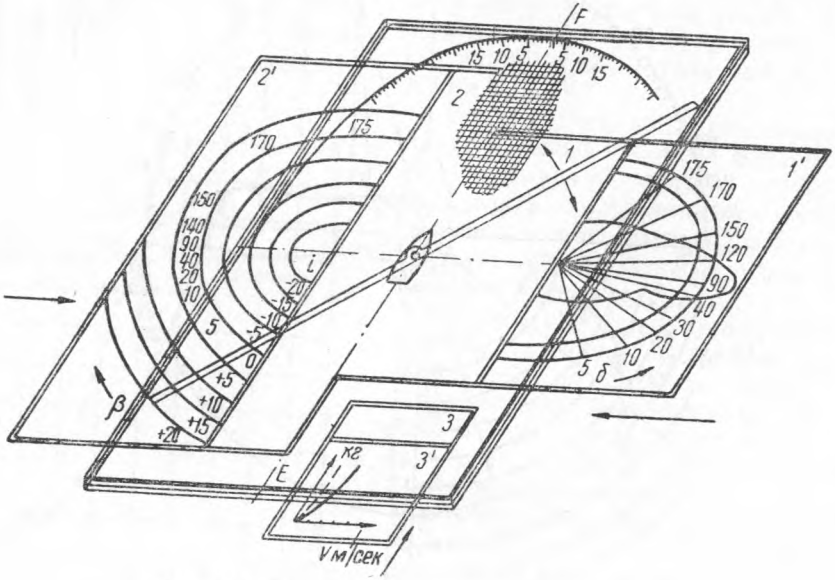


Рис. 113. Прибор для расчета угла дрейфа

б) нанести на вставке *1* зависимость $\gamma=f_1(\delta)$ и вычертить в полярных координатах кривую изменения силы A для некоторого значения скорости ветра;

в) рассчитать и вычертить на бумаге график изменения масштаба, в котором будет откладываться сила F, в зависимости от скорости ветра. Этот график подкладывается под вставку *3*.

Все вычисления, построения, а в дальнейшем и определения угла дрейфа производятся точно так же, как это описывалось для дрейфового графика в предыдущем разделе.

Преимущества прибора, кроме удобства обращения, заключаются в том, что, заменив вставки, его можно использовать при существенных изменениях в конструкции судна и для любого другого судна.

Когда дрейфовые характеристики данного судна будут проверены на практике, их можно выгравировать на плексигласе и за-

лить тушью. Такие приборы можно изготовлять серийно для конкретных однотипных судов, дрейфовые характеристики которых уже известны.

Максимальная точность, к которой надо стремиться при определении кажущегося ветра, равна 0,1 *м/сек* для скорости и 5° для направления. Бóльшая точность нецелесообразна, хотя бы потому, что сам по себе ветровой поток изменчив и изменения эти могут превышать указанную точность.

Для определения на судне скорости и направления ветра с такой точностью необходимо соблюдать некоторые условия. Дело в том, что, как это показал Федяевский на опытах с моделью судна, если наблюдать ветер на ходовом мостике, то легко допустить ошибку порядка 20—30° для направления и 10—20% для величины скорости (в сторону увеличения). Эти погрешности объясняются тем, что скорости ветра вблизи настроек отличаются от скорости невозмущенного обтекаемым телом потока. Поэтому измерения лучше всего производить на мачте, полубаке или корме (в зависимости от направления ветра), подняв прибор на шесте. В крайнем случае наблюдения можно производить с наветренного крыла ходового мостика.

Скорость ветра обычно определяется либо обычным анемометром, либо электрическим. Направление ветра можно наблюдать при помощи компаса по вымпелу на мачте или по колдунчику, поднятому на шесте над картушкой компаса.

Определять угол отклонения пера руля можно двумя способами. Так как судно непрерывно рыскает и руль приходится перекладывать то вправо, то влево от нулевого положения, искомый угол i можно рассматривать как среднее положение пера руля. Для этого надо сделать серию из 20—30 наблюдений положения указателя вправо и влево от нуля и, придав им разные знаки, определить среднее значение. Можно поступить и иначе. Определив, в какую сторону вращается судно при $t = 0$, начать медленно поворачивать перо в соответствующую сторону и заметить положения указателя, когда вращение прекратится и судно начнет катиться в противоположную сторону. Таких наблюдений необходимо произвести несколько, и из них найти среднее значение i, при котором судно прекращает разворачиваться и меняет направление вращения.

5. Изменение осадки влечет за собой изменение величины дрейфа при прочих равных условиях. В большой степени это относится к грузовым судам и из них особенно к танкерам. Изменение осадки пассажирского судна приведет к меньшим изменениям величины дрейфа, так как относительное изменение площади надводной парусности при высоких надстройках окажется меньшим, чем у танкера или другого грузового парохода. Здесь, однако, следует помнить, что речь идет об относительном изменении величины дрейфа данного судна, а отнюдь не об абсолютной величине его.

Изменение осадки судна окажется на дрейфе по двум причинам: во-первых, изменится величина надводной и подводной парусности, во-вторых, изменится относительный размах надводной и подводной частей, т. е. отношение высоты надводной части и углубления к длине судна. Первое скажется на величине сил A и R, второе — в основном на величине их отклонения от диаметральной плоскости. Изменения эти повлекут за собой изменения величины дрейфа в одну сторону, при уменьшении осадки они будут увеличивать, а при увеличении — уменьшать дрейф.

Обтекаемость надводной части судна, вообще говоря, плохая, и изменения ее относительного размаха при изменении осадки (исключая танкеры) незначительны. Следовательно, для надводной части можно учитывать только изменение величины силы A за счет изменения площади. Для подводной части, наоборот, основную роль играет величина относительного размаха. В выбранном же нами способе решения площади подводной части нас вообще интересовать не будут.

Таким образом, влияние изменения осадки судна на величину дрейфа для различных судов неодинаково. В одних случаях основная роль принадлежит надводной части, в других — подводной, и поэтому влиянием одной из них иногда можно пренебречь. В этом смысле все суда можно разделить на две группы. К первой группе относятся пассажирские суда, ко второй — танкеры. Промежуточное положение занимают грузовые пароходы, причем лесовозы стоят ближе к первой группе, а остальные сухогрузные — ко второй. В первой группе можно пренебречь влиянием на дрейф изменением в подводной части, во второй необходимо учитывать влияние изменений в обеих частях.

Влияние изменения осадки на угол дрейфа можно учесть, если располагать продувками подводной части судна с различными значениями $\frac{H}{L_0}$. В связи с этим на рис. 110 должны появиться новые шкалы для углов дрейфа, соответствующие различным осадкам судна.

Влияние изменения осадки на величину силы R можно учесть при определении угла дрейфа следующим простым способом. При изменении осадки судна площадь проекции его на плоскость, перпендикулярную направлению ветра, изменится на величину

$$\Delta S_{(\delta)} = \frac{\Delta h_\phi + \Delta h_a}{2} B \cos \delta + \frac{\Delta h_\phi + \Delta h_a}{2} L \sin \delta; \qquad (47)$$

где:

Δh_ϕ — изменение осадки форштевня;
Δh_a — изменение осадки ахтерштевня;
B — ширина судна у мидель-шпангоута;
L — максимальная длина по ватерлинии.

Следовательно, измененная величина площади проекции $S_{(\delta)n}$ будет равняться $S_{(\delta)n} = S_{(\delta)} \pm \Delta S_{(\delta)}$,

откуда

$$n=1\pm\frac{\Delta S_{(\delta)}}{S_{(\delta)}},$$

или

$$n=1\pm\frac{\Delta h(B\cos\delta+L\sin\delta)}{S_{(\delta)}}, \qquad (48)$$

где Δh — среднее изменение осадки судна.

Значит изменение осадки повлечет за собой изменение силы A в n раз. Коэффициент n, как это видно из уравнения (48), зависит от средней осадки штевней и курсового угла ветра. Графически он будет изображаться семейством прямых линий, пересекающихся в одной точке. В этой точке $n=1$, и она соответствует некоторому условному нормальному погружению, для которого определены значения $S_{(\delta)}$.

Такой график следует составить заблаговременно.

Посмотрим теперь, как удобнее всего вводить эту поправку, пользуясь изложенным графическим способом определения угла дрейфа.

Изменение осадки вызовет изменение силы A, и, следовательно, это должно сказаться на величине масштаба, в котором откладывается сила F. Масштаб этот равен $\frac{A}{OA}=M$, где OA — отрезок на графике, изображающий силу A.

Новый масштаб, если учесть, что этим же отрезком будет изображаться сила An, равен $\frac{An}{OA}=M'$.

Разделив уравнения почленно, найдем

$$M'=nM.$$

Отсюда следует, что, пользуясь графиком (см. рис. 110) для определения углов дрейфа при различных осадках, необходимо выбранный по скорости ветра масштаб для силы F умножить на коэффициент n.

6. Для проверки предложенного способа определения угла дрейфа летом 1945 года были организованы специальные испытания. Место судна определялось по створу и двум пеленгам, течение учитывалось вертушечными наблюдениями с катера. Чтобы учесть смещение судна с курса вследствие неравномерного рыскания и выделить собственно ветровой дрейф, во время испытаний тщательно наблюдали за рысканием судна. Скорость ветра измеряли анемометром, поднятым на шесте с наветренного крыла ходового мостика. Направление ветра определяли по вымпелу на мачте и путевому компасу. Упорное давление винта замеряли по падению скорости движения при остановке машин и корректировали по индикаторным диаграммам с учетом к.п.д. винта. Скорость судна брали из показаний донного лага.

Ненадежная работа указателя положения пера руля не позволила определить среднее положение его, и поэтому вычисленный угол дрейфа не учитывает поворотов руля.

Результаты наблюдений одной серии приводятся в табл. 11.

Таблица 11

№ галса	Скорость судна в узлах	Ветер (кажущийся)		Суммарный уход с курса по обсервации $\Theta°$	Нормальная к курсу составляющая течения в *см/сек* V течения	Угол сноса течением $\beta''°$	Угол ухода с курса вследствие рыскания $\beta'°$	$\beta'°+\beta''°$	Угол дрейфа по наблюдениям $\beta=\Theta\pm\beta'\pm\beta''$	Угол дрейфа по вычислениям $\beta°$
		V м/сек	$\delta°$ правого и левого борта							
1	12	2,3	30 л/б	+0,50	6,3	+0,50	−0,90	−0,40	+0,90	+0,10
2	12	9,1	35 л/б	+1,50	5,1	−0,50	−0,10	−0,60	+2,10	+1,50
3	12	2,3	90 пр/б	+0,50	4,0	−0,50	−0,10	−0,60	+1,10	+0,20
4	4	4,7	90 л/б	+7,75	7,5	+2,00	−0,40	+1,60	+6,15	+4,00
5	4	8,1	30 пр/б	+6,00	7,5	+2,00	−0,50	+1,50	+4,50	+7,00
6	6	4,3	90 л/б	+4,00	7,5	+1,40	−0,50	+0,90	+3,10	+1,80
7	6	3,1	30 пр/б	+2,75	7,5	+1,40	−0,80	+0,60	+2,15	+3,40
8	4	3,3	120 л/б	+4,00	6,6	+1,80	−0,80	+1,00	+3,00	+2,20
9	12	8,1	85 пр/б	+3,75	7,8	+0,80	−0,30	+0,50	+3,25	+1,50

Знак минус в таблице указывает на смещение судна от линии заданного курса на ветер, знак плюс — смещение по ветру.

Средняя величина абсолютной ошибки из данной серии наблюдений равна 1°34. Это расхождение, конечно, значительно, но если учесть, что при составлении дрейфового графика судна за отсутствием других были взяты дрейфовые характеристики, определенные для модели быстроходного судна, и не учитывалось влияние поворота пера руля, то результат можно признать удовлетворительным.

Направление, в котором бы изменялись результаты при учете влияния поворота руля, легко обнаружить из этой же таблицы. Отрицательный знак угла ухода судна с курса, вызванного асимметричным рысканием, показывает, что судно стремилось привестись к ветру, а следовательно, в среднем положении руль был отклонен в сторону дрейфа. Как уже известно, это должно было привести к уменьшению угла отклонения силы R от диаметрали, а следовательно, к увеличению угла дрейфа. Так как из девяти случаев только два имеют ошибку со знаком плюс, то, следовательно, увеличение расчетного угла дрейфа привело бы к значительному уменьшению величины средней ошибки.

Приведем теперь примеры определения угла дрейфа, проведенные во время переходов на гидрографическом судне.

Пример 1. Определение угла дрейфа производилось в 1944 году.
Данные для определения угла дрейфа:
а) Истинный курс — 285°;

б) Скорость — 9,2 узла;
в) Направление приливо-отливного течения (среднее за время плавания —

$$14^h\ 57'-15^h\ 48')-\ .\ .\ .\ .\ 293°5$$

г) Скорость приливо-отливного течения (средняя за время плавания) — 1,73 узла
д) Курсовой угол кажущегося ветра — 1°,2 (с левого борта);
е) Скорость кажущегося ветра — 2,4 *м/сек*;
ж) Рыскание (среднее значение из одиннадцати наблюдений):

$\varphi_{прав}=30',3$ $\varphi_{лев}=72',3$ (угол рыскания)
$t_{прав}=18'',1$ $t_{лев}=31'',2$ (время лежания на правом и левом рысках)

Для определения силы упорного давления винтов в один из моментов перехода скорость судна была повышена, и затем наблюдалось падение скорости после остановки машин. Отрицательное ускорение, определенное таким способом, оказалось равным 1,7 *см/сек*^{2}. При массе судна 75 000 *кг* сила упорного давления винтов в данных условиях движения была равна 12 750 *кг*, скорость судна — 4,72 *м/сек*, число оборотов винтов в минуту — 280.

По значениям δ и V из графика на рис. 110 была найдена величина силы давления ветра $A=129{,}5$ *кг*, а по отношению $\frac{129{,}5}{12750}$ величина угла отклонения суммарной силы $\overline{T}=\overline{F}+\overline{A}$ от диаметральной плоскости судна, оказавшаяся равной 35′. По этой величине определили угол дрейфа $\beta=8'$.

При составлении графика (см. рис. 110) для гидрографического судна были использованы результаты продувок надводной части грузового перехода и подводной части быстроходного современного судна.

Если учесть снос течения $\beta''=+\ 1°25'$ и уход с курса за счет рыскания $\beta'=-45$ мин., то суммарный рассчитанный уход с курса будет равен $\beta+\beta'+\beta''=-48$ мин. Фактически, по прокладке, за время плавания в течение примерно 1 часа эта величина оказалась равной 20 мин.

Пример 2.

а) Истинный курс — 194°,5;
б) Скорость — 8 узлов;
в) Направление приливо-отливного течения (среднее за время плавания)

$$10^h35'-14^h30'\ .\ .\ .\ .\ 32^\circ_1,5\ \text{приливо-отливного}$$

г) Скорость приливо-отливного течения (средняя за время плавания) — 0,74 узла;
д) Курсовой угол кажущегося ветра — 18° (правого борта);
е) Скорость кажущегося ветра — 17 *м/сек*;
ж) Рыскание:

$\varphi_{прав}=1°,25$ $\varphi_{лев}=1°,15$
$t_{прав}=13'',9$ $t_{лев}=66'',5$.

Поскольку в новых данных условиях плавания винты не оголялись, их к. п. д. не изменился по сравнению с коэффициентом в условиях первого примера или изменился незначительно. Число оборотов машин было также 280 в минуту. Все это позволяет принять $F=12\,750$ *кг*. Угол дрейфа, определенный по графикам, равен $+3°08'$.

Кроме зарыскивания и приливо-отливных течений, в этом случае пришлось учесть еще и дрейфовое течение, создавшее снос, характеризующийся величиной $\beta=2°44'$. Таким образом, суммарный уход судна с курса выражался углом $\Theta=3°08'+0°46'+1°44'+2°44'=8°22$, а по прокладке этот угол равнялся 8°45′.

Влияние руля в этих двух примерах не учитывалось, но это не должно заметно отразиться на результатах вычислений. Во втором случае асимметрия рыскания невелика, а знак β'' — положительный. Следовательно, перо руля в среднем было повернуто на не-

большой угол в сторону, противоположную направлению дрейфа, а такой поворот не может заметно изменить его. В первом же случае величина дрейфа настолько мала, что вообще имеет смысл говорить лишь о совпадении порядка величины.

Кроме этих случаев, способ проверялся во время нескольких переходов на пассажирском пароходе «Туркменистан». И в этих случаях величина ошибки не превышала 1°.

Учитывая результаты проверки способа определения угла дрейфа, можно считать, что точность его близка к 1°. Но эту точность можно несколько повысить, если учитывать влияние поворота пера руля.

Надежность определений угла дрейфа изложенным способом, конечно, несравненно более высокая, чем при определениях его существовавшими способами.

Кроме изложенного способа, в последние годы были предложены еще три метода определения угла дрейфа судна. Авторами этих методов являются К. К. Федяевский, Ю. М. Крылов и Н. Н. Матусевич. К. К. Федяевский воспользовался для решения этой задачи вторым уравнением движения судна — уравнением проекций сил на ось y. Ю. М. Крылов решал второе и третье уравнения системы. Это позволило ему учесть при решении влияние на угол дрейфа и положения пера руля. Способ, предложенный Н. Н. Матусевичем, основан на способе К. К. Федяевского. При определении угла дрейфа методом К. К. Федяевского надо знать нормальные к диаметральной плоскости судна составляющие коэффициентов сопротивления. Это является преимуществом метода, так как определение их более надежно, чем определение полных коэффициентов. Недостаток всех трех способов — их ограниченность. Дело в том, что при пользовании ими надо знать величину скорости движения судна. При малых углах дрейфа за такую скорость можно принимать скорость, определенную по донному лагу. При больших углах дрейфа такое допущение является незаконным. Для упрощения расчетов угла дрейфа авторы этих методов предложили различные графики и простые формулы.

Мы не будем здесь приводить подробного описания этих способов, так как они помещены в вышедших в свет изданиях.

Проверка этих методов показала, что порядок точности определения угла дрейфа, даваемый ими и методом А. М. Гусева одинаков. Таким образом, по этой оценке они могут быть использованы на практике с равным успехом.

§ 2. ДРЕЙФ БУКСИРУЮЩЕГО СУДНА

1. Большой практический интерес представляет исследование дрейфа судна, ведущего на буксире одно или несколько судов, так как в этих случаях углы дрейфа достигают иногда весьма значительных величин.

Большие углы дрейфа объясняются не только малой скоростью движения буксирующего судна, но и особенностью расположения

сил. К рассмотренным силам F, A, R в этом случае необходимо добавить силу F' натяжения буксира (см. рис. 112). Сила F' складывается из силы сопротивления подводной части буксируемого судна и силы давления кажущегося ветра на его надводную часть. Точка ее приложения находится в надводной части судна, где-то близко к корме, в месте закрепления буксира. Как и в случае движения одиночного судна для обеспечения прямолинейного установившегося движения необходимо, чтобы перо руля было повернуто на некоторый угол относительно диаметральной плоскости. Естественно, что углы поворота пера руля в случае движения одиночного судна и движения судна, ведущего на буксире другое, при прочих равных условиях будут отличаться друг от друга, так как в последнем случае поворотом пера руля придется компенсировать и момент силы F[1].

Рассматривая (см. рис. 112) силы $F, F' R, A,$ сведенные поворотом пера руля в одну точку, убеждаемся, что суммарная сила T', полученная сложением сил $F, F', A,$ отклонена на больший угол от диаметральной плоскости судна, чем сила $T,$ равная сумме сил A и F. Следовательно, при установившемся движении, когда сила R' должна быть равной силе T' и обратно ей направленной, судно должно двигаться с бóльшим углом дрейфа по сравнению с движением, когда на судно действуют только силы F, A и R. Дополнительный поворот пера руля также соответствующим образом скажется на величине угла дрейфа.

Для практических целей, при исследовании дрейфа буксирующего судна интересно рассмотреть два вопроса: определить угол дрейфа буксирующего судна и строй буксируемых судов. Если угол дрейфа необходим для уточнения счисления, то предвычисление расположения судов относительно друг друга необходимо для оценки возможности буксировки в узких фарватерах в свежую погоду. В самом деле, при ветре буксируемые суда нарушат кильватерный строй и будут расположены как бы уступом. Естественно, уход буксируемых судов с линии курса буксирующего лимитируется шириной фарватера и зависит от угла строя уступом и дистанции между судами, т. е. длиной буксира. Следовательно, если иметь возможность предвычислить угол отклонения буксира от диаметральной плоскости буксирующего судна, то всегда, зная ширину фарватера, можно подсчитать длину буксира, которая обеспечит безопасное продвижение по нему и тем исключит возможность посадки на мель (при данном ветре и угле дрейфа) буксируемых судов.

Угол ухода буксируемого судна с курса, конечно, можно определить и по наблюдениям, но для этого необходимо либо предварительно пробуксировать судно под ожидаемым в узкости курсовым углом ветра, либо, уже двигаясь в узкости, подбирать буксир до безопасной длины. Но для проведения таких маневров не всегда есть время и возможности, и поэтому желательно вычислять предварительно длины буксира для таких случаев буксировки.

Угол ухода буксируемого судна с курса можно менять поворотом пера руля в довольно значительных пределах, но, во-первых, это также не всегда оказывается удобным и возможным и, во-вторых, это средство все же ограничено и зависит от характеристики руля.

2. Для вычисления угла дрейфа буксирующего судна можно с успехом воспользоваться методом автора, излагаемым в § 3 настоящей главы. В дополнение к уже известным операциям и наблюдениям необходимо определить силу F', направленную вдоль буксира, и сложить ее с силами F и A (см. рис. 112). Угол дрейфа находится на пересечении шкалы β с продолжением силы T'. Шкалу надо выбрать соответствующей наблюденному углу поворота пера руля.

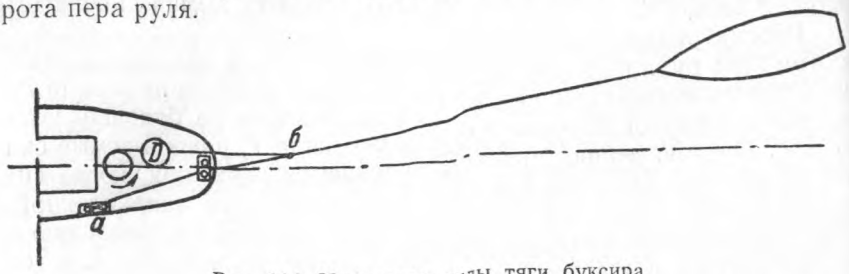


Рис. 114. Измерение силы тяги буксира

Направление силы F' легко определить, пеленгуя буксируемое судно с кормы или определяя с кормы секстаном угол между створом мачт и направлением на буксируемое судно. Направление силы можно определить и пеленгатором с ходового мостика, но в этом случае необходимо внести поправку на несовпадение точки наблюдения с точкой закрепления буксира, так как при длине буксира, близкой по величине расстоянию между точкой крепления его и положением компаса, ошибка в определении направления силы F' будет значительной.

Для определения величины силы F' можно предложить два способа: расчетный и непосредственные измерения. Наиболее прост второй способ, но он требует некоторых дополнительных приспособлений и динамометра. Динамометр включается в буксир параллельно (рис. 114). В нужный момент, когда производятся наблюдения, нагрузка передается на динамометр, для чего необходимо подобрать трос, на котором крепится динамометр так, чтобы на участке буксира *ав* создать слабину.

Для расчета величины силы F' необходимо знать гидро- и аэродинамические характеристики буксируемого судна. Определив курсовой угол ветра и угол φ (рис. 115) на буксируемом судне, легко рассчитать силы A' и R', а по ним определить и силу F'. Правда, эти расчеты не свободны от погрешности. Погрешность заключается в неточном определении курсового угла ветра и угла дрейфа буксируемого судна, которая в свою очередь обуславливается тем, что неизвестен угол дрейфа всей си-

стемы. При определении силы A' эта погрешность существенной роли не играет, так как даже при больших углах дрейфа — 10—15° определения не выйдут за пределы точности измерения направления ветра. Чтобы учесть угол дрейфа всей системы при определении силы давления воды на подводную часть буксируемого судна, необходимо угол φ уменьшить (см. рис. 115) на величину ожидаемого угла дрейфа системы. Эта разность и позволит в дальнейшем выбрать соответствующий коэффициент сопротивления для подводной части и определения проекции ее площади.

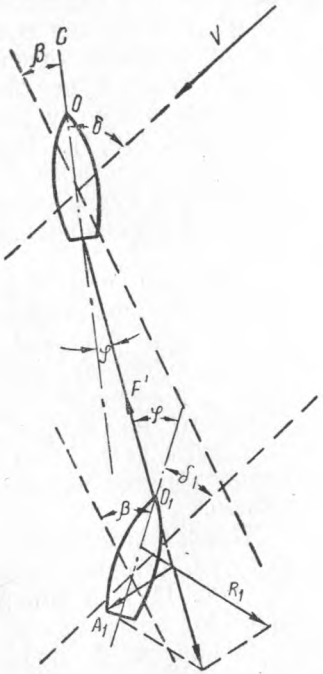


Рис. 115. Расположение судов при буксировке

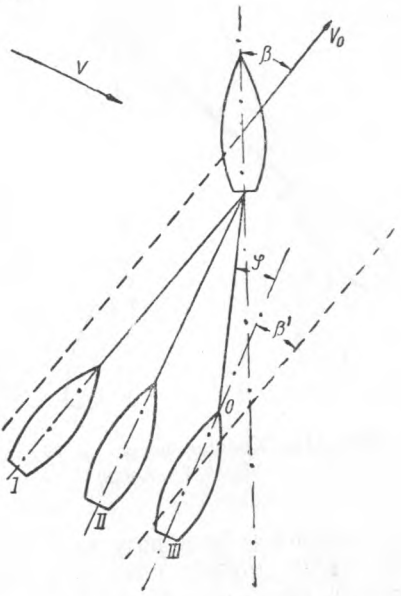


Рис. 116. Расположение судов при буксировке

В том случае, когда точность такого способа недостаточна или когда трудно судить о величине ожидаемого угла дрейфа системы, следует воспользоваться методом последовательных приближений и определять искомый угол дрейфа буксируемого судна, постепенно приближаясь к его значению.

При определении силы F' динамометром способ измерения остается неизменным, если на буксире идет и не одно судно. Если сила F при буксировке нескольких судов определяется расчетным путем, то последовательно надо определить силы F',F'',F''' и т. д. для всех судов и затем сложить их. В этом случае определение углов дрейфа каждого буксируемого судна, естественно, усложняется.

3. Представим теперь, что надводная часть у буксируемого судна очень мала и давление ветра на нее по сравнению с давлением воды на подводную часть очень малая величина. Тогда при наличии дрейфа буксирующего судна буксир и буксируемое судно расположатся в направлении истинного движения судна и угол отклонения буксира от диаметральной плоскости судна (в случае прямолинейного установившегося движения) будет равен углу дрейфа буксирующего судна.

Следовательно, при буксировке судов с низкими надстройками угол отклонения буксира от диаметрали буксирующего судна будет близок по величине углу дрейфа его (рис. 116, *I*). Наличие высоких надстроек у буксируемого судна изменяет картину расположения судов.

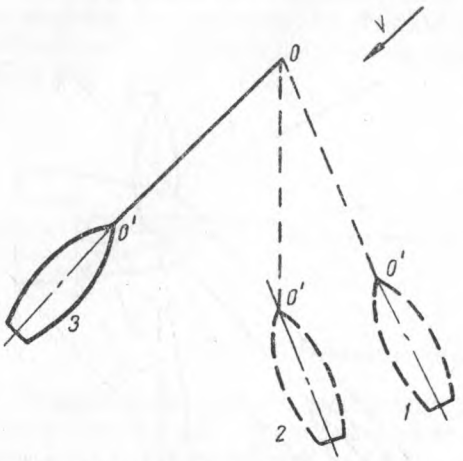


Рис. 117. Влияние ветра на судно, стоящее на якоре

Прежде чем перейти к определению положения судов при буксировке в ветреную погоду, рассмотрим поведение судна, стоящего на якоре, под действием ветра. Эти два вопроса имеют ряд общих сторон.

Представим себе, что на судно, стоящее на якоре (рис. 117) в положении *1*, начал действовать постоянный ветер. Под действием этого ветра судно начнет смещаться и займет положение *2*, подобно флюгеру, расположившись параллельно потоку воздуха.

Выясним теперь, как ведет судно, перемещаясь из положения *1* в положение *3*. В положениях *1* и *2* на судно будет действовать сила давления ветра, сила сопротивления воды, реакция якорного троса и сила инерции. В положении *3* на судно действует лишь поток воздуха. Если предположить, что цепь все время натянута, то судно, вращаясь вокруг точки *O*, вращается также и вокруг точки *O'* — точки крепления цепи на клюзе. При переходе из положения *1* в положение *3* силы, действующие на судно, изменяются, что вызывает смещение точек приложения сил давления ветра и сопротивления воды. Но в каждый малый момент времени судно располагается так, что сумма этих сил равна по величине и обратна по знаку реакции цепи, а сумма моментов этих сил относительно точек *O* и *O'* равна нулю. Это приводит к тому, что в отдельных случаях направление диаметральной плоскости не совпадает с направлением цепи (рис. 118).

Представим теперь, что на судно, стоящее на якоре, кроме постоянного ветра действует еще и некоторое постоянное течение, причем направление ветра и течения не совпадают. В этом случае судно под действием двух потоков займет некоторое среднее положение (см. рис. 118). Если диаметральная плоскость судна в первом случае отклонялась от направления цепи только в период перемещения к предельному положению, то при наличии течения она может отклоняться и в предельном положении, когда движение судна прекратится. Причина заключается в том, что на судно действуют два потока (вода и воздух), и моменты сил относительно точки O' могут быть равны нулю только при условии отклонения диаметрали от направления якорной цепи. На практике это приводит к очень неспокойной якорной стоянке, так как судно стремится стать лагом к ветру, а следовательно, и к волне. Обычно это наблюдается у судов с асимметричными относительно миделя надстройками. Такие суда неспокойно стоят на якоре, подвергаясь действию волны в борт, даже и в тех случаях, когда течения нет. Дело в том, что ветер практически никогда не бывает постоянным по направлению и, задувая то с левого, то с правого борта, он заставляет перемещаться судно на якорной цепи. Эти перемещения вызовут появление силы R, что повлечет за собой и разворот бортом к ветру вокруг точки O'. Следовательно, кроме всего, такое судно, стоя на якоре, будет сильно рыскать. Стремясь развернуться лагом к волне, судно будет испытывать, как уже говорилось, наиболее сильную качку, а последствия асимметрии надстроек — качка и рыскание — весьма затрудняют производство гидрологических работ на якорных станциях.

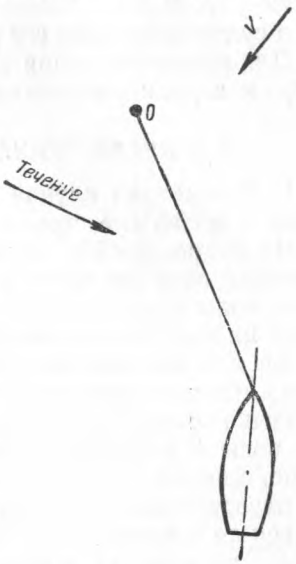


Рис. 118. Влияние ветра и течения на судно, стоящее на якоре

Теперь рассмотрим расположение судов при буксировке в ветреную погоду. Оказывается, что поведение буксируемого судна относительно буксирующего будет совершенно таким же, какое мы наблюдали во время стоянки судна на якоре под действием ветра и течения. Действительно, движение судна с точки зрения гидродинамики в этом случае можно рассматривать как течение, равное скорости движения и обратное ему по направлению. Но угол дрейфа буксирующего судна зависит от расположения буксируемых судов, т. е. от силы F'. Эта сила в свою очередь зависит от курсового угла ветра δ на буксируемом судне и угла дрейфа

β', а следовательно, и от угла дрейфа буксирующего судна β. Таким образом, углы β, β' и δ возможно определить лишь последовательным приближением, полагая вначале, что угол β' равен углу φ' (см. рис. 115).

Зная углы β и φ', можно определить безопасный курс и длину троса при буксировках в узком фарватере при ветре, а также рассчитать возможность приведения в кильватер буксируемого судна действием его руля.

Для предвычисления этих данных, конечно, необходимо иметь гидро-и аэродинамические характеристики всех судов.

§ 3. ДРЕЙФ СУДНА С ОСТАНОВЛЕННОЙ МАШИНОЙ

1. Рассмотрим случай дрейфа судна с остановленными машинами — дрейф «на стопе».

На судно, дрейфующее с остановленной машиной, действуют три силы: сила давления ветра на надводную часть, сила сопротивления воды и сила инерции. Архимедову силу и силу тяжести, полагая их взаимно уравновешенными, учитывать не будем, как силы, не дающие составляющих по осям x и y, в которых исследуется плоское движение судна.

Точка приложения силы давления ветра A и силы сопротивления воды R в общем случае не совпадают (рис. 119), и поэтому судно, смещаясь под действием давления ветра, накренится и начнет разворачиваться вокруг оси. Разворот судна будет продолжаться до некоторого предельного угла относительно направления ветра, при котором сумма моментов сил A и R относительно оси, проходящей через центр тяжести, окажется равной нулю. Период неустановившегося движения судна будет продолжаться до тех пор, пока скорость дрейфа не достигнет такой величины, при которой сила R будет равной силе A.

Уравнения, выражающие дрейф судна «на стопе», легко получить из уравнений (29), (30), (31), (32), (33), если положить в них равными нулю силу упорного давления винта, а также составляющие и момент силы, действующей на руль. В этом случае уравнения движения примут следующий вид:

$$-X_{0(\beta,\omega)}-X_{(\delta)}-\frac{m_y V_0^2}{r}\sin\beta-m_x\frac{dV_0}{dt}\cos\beta=0, \tag{49}$$

$$Y_{0(\beta,\omega)}-Y_{(\delta)}-\frac{m_x V_0^2}{r}\cos\beta+m_y\frac{dV_0}{dt}\sin\beta=0, \tag{50}$$

$$(Y_0\cdot a)_{(\beta)}-(Y\cdot b)_{(\delta)}+\mathfrak{M}_{(\omega)}+I_z\varphi''=0, \tag{51}$$

где:

X_0, Y_0 — составляющие силы сопротивления, включающие сопротивление при поступательном и вращательном движении судна;

Yb — часть момента силы сопротивления, возникающая при поступательном движении судна;

$\mathfrak{M}$ — часть момента силы сопротивления, возникающая при вращательном движении судна.

Член с центробежной силой в общем случае остается, так как во время разворота центр тяжести может смещаться по некоторой кривой линии (рис. 120).

Исследование дрейфа судна «на стопе» интересно в двух отношениях. Зная скорость и направление дрейфа в период, когда движение установилось, можно определить место судна. В отдельных случаях (облачность, отсутствие радиотехнических средств и т. д.) этот способ может оказаться единственно возможным.

Зная закономерности движения в период неустановившегося дрейфа «на стопе»—скорость разворота судна под действием ветра, закон нарастания скорости дрейфа,а также скорость установившегося дрейфа, штурман располагает сведениями, необходимыми для маневрирования во время движения на ограниченных водных пространствах — в проливах, каналах, на рейде, на акватории порта.

В настоящем параграфе вычисление дрейфа «на стопе» нас будет интересовать как одно из возможных средств определения места судна. Поэтому будем рассматривать только случай установившегося дрейфа. Весь период неустановившегося дрейфа отнесем в главу об управляемости судна при ветре. Пренебрегать этим этапом дрейфа в задаче об определении места судна можно на том основании, что этот этап занимает очень небольшой, как это будет показано ниже, отрезок времени и не может заметно повлиять на точность определения места судна по величине дрейфа «на стопе».

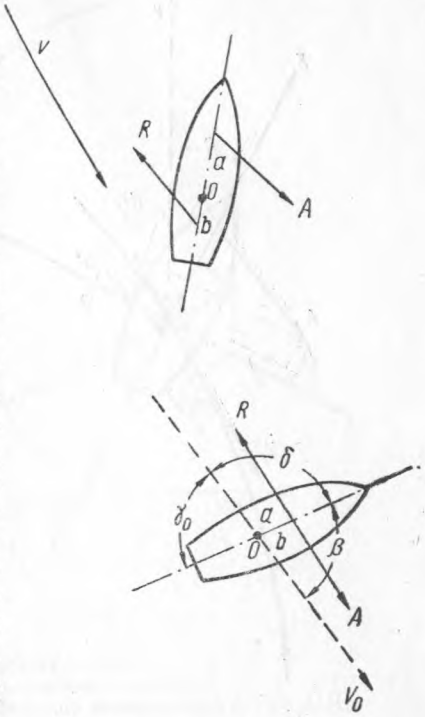


Рис. 119. Положение судна и расположение сил при дрейфе с остановленной машиной

2. Для случая установившегося дрейфа уравнения движения еще более упростятся и будут выглядеть так

$$-X_{0(\beta_{пред})} - X_{\delta_{пред}} = 0, \tag{52}$$

$$Y_{0(\beta_{пред})} + Y_{\delta_{пред}} = 0, \tag{53}$$

$$(-Y_0 a)_{(\beta_{пред})} - (Yb)_{\delta_{пред}} = 0, \tag{54}$$

где $\beta_{пред}$ и $\delta_{пред}$ указывают, что составляющие и момент сил при установившемся движении без вращения берутся для предельных значений этих углов.

Одно из уравнений (52), (53) или уравнение, записанное в векторной форме:

$$A=-\bar{R}, \tag{55}$$

позволяет определить скорость дрейфа, а уравнения второе и третье—подсчитать предельный угол разворота судна и направление дрейфа относительно направления ветра или угол дрейфа «на стопе». Для этого, конечно, необходимо знать дрейфовые характеристики судна. Так как в третьем уравнении $Y_0=-Y$, то его можно записать иначе, а именно:

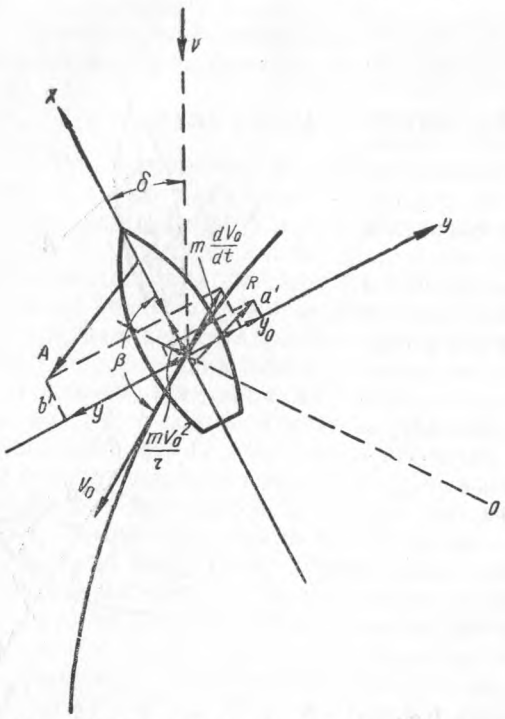


Рис. 120. Расположение сил, действующих на судно, разворачивающееся при дрейфе с остановленными машинами

$$a=b. \tag{56}$$

Это указывает, что судно при дрейфе с остановленными машинами перестанет разворачиваться в тот момент, когда плечи сил A и R сравняются.

Если составляющие сил во втором уравнении выразить через значение самих сил A и R, то уравнения для определения предельного угла разворота судна запишутся так:

$$A\sin\gamma=R\sin(180-\gamma_0), \tag{57}$$

$$a=b. \tag{58}$$

Но γ, γ_0, a, b зависят от углов δ и β. Подставив эти зависимости в уравнения (57) и (58), можно решить их относительно δ и β. Но вид этих зависимостей сложный, и поэтому для определения предельного угла разворота проще воспользоваться графическим способом решения. Для этого по графику на рис. 111 или по графикам зависимостей γ, γ_0 от δ и β найдем значения углов дрейфа и курсовых углов ветра, при которых A и R будут направлены

противоположно друг другу. Это легко сделать, поворачивая линейку (рис. 111) от 0 до 180° и снимая значения δ и β на пересечении шкал с концами ее. Значения полученных таким путем пар углов откладываются в функции угла поворота линейки, соответствующего углам γ (рис. 121). На этом же рисунке строится кривая разности длин плеч $(a - b)$ по их графикам. В том случае когда $b > a$, значения разности $(a—b)$ откладываются в области

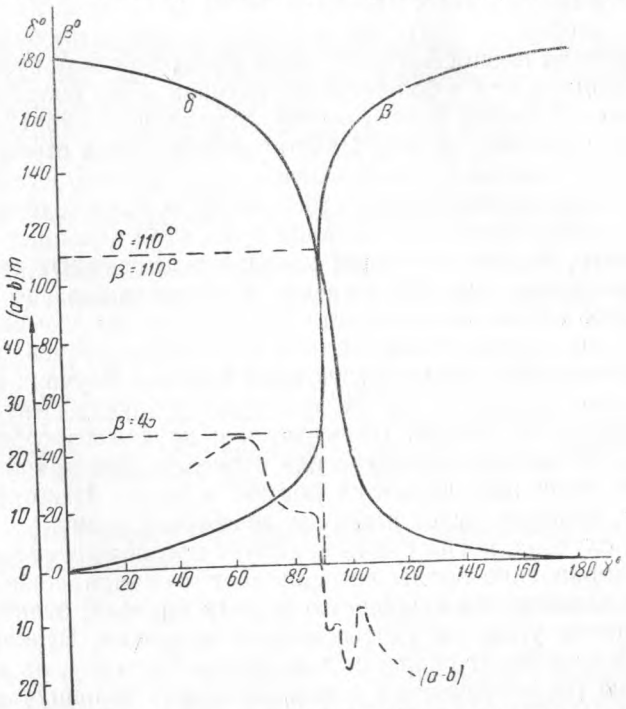


Рис. 121. К определению предельного угла разворота судна при дрейфе с остановленной машиной

отрицательных значений y. Пара углов, для которых эта разность окажется равной нулю, будет характеризовать предельный угол разворота судна по отношению к ветру и угол дрейфа «на стопе».

По рис. 103 $\delta_{пред}$ оказывается равным 110°, а $\beta_{пред}$ —в пределах от 110 до 45 [1]. Это достаточно точно соответствует действительности.

Легко показать, что разность $(a - b)$ для таких плавающих тел, как шар или прямоугольная пластина, погруженная без дифферента в воду, на всем диапазоне угла γ будет равна нулю, а следовательно, такое тело не будет разворачиваться под действием

[1] Такой широкий диапазон при выборе угла дрейфа обуславливается характером зависимости $\gamma_0 = f_2(\beta)$ и недостаточной точностью продувок. Истинное значение угла дрейфа будет равно среднему из этих двух значений, т. е. 77°,5.

ветра и дрейфа, т. е. положение его относительно направления ветра безразлично.

В том случае, когда разность $(a - b)$ на всем протяжении кривой не равна нулю, судно всегда становится либо точно носом, либо точно кормой к ветру. Различие положения в данном случае зависит от того, на корме или на носу — в надводной или подводной части его сосредоточена преобладающая площадь парусности.

В свете приведенных рассуждений на первый взгляд кажется, что целесообразнее всего строить суда с симметричной относительно миделя площадью надводной и подводной парусности. Но если вспомнить, что в большинстве случаев ветер сопровождается волнением с фронтом волны, перпендикулярным направлению ветра, то это окажется не так. Действительно, волна стремится развернуть судно лагом к фронту. Это в свою очередь вызывает увеличение рыскливости движущегося судна и как следствие влечет за собой необходимость перекладки руля, что уменьшает скорость. Кроме всего, положение лагом к волне в штормовых условиях и при вынужденном дрейфе опасно. Следовательно, желательно, чтобы судно стремилось привестись к ветру, а это возможно в том случае, когда парусность надводной части сосредоточена на корме. Этим обстоятельством и пользуются в крайних случаях на парусных и мелких моторных судах, поднимая в случае вынужденного дрейфа парус на бизани. Пользуются и другим способом — уходят от ветра на одном кливере или стакселе. При такой парусности судно устойчиво держится кормой к ветру. Некоторую роль при этом, конечно, будет играть и дифферент судна.

В тех случаях, когда судно дрейфует при значительном волнении, и направление волны не совпадает с направлением ветра, судно развернется по отношению к нему на угол, отличающийся от расчетного угла, не учитывающего волнение. Величина угла разворота зависит от скорости и направления ветра, от направления и силы (по отношению к размерам судна) волнения и от аэро- и гидродинамических свойств корпуса судна. Так, например, при испытаниях найденный расчетным путем и наблюдениями в натуре предельный угол разворота при невзволнованной поверхности воды оказался равным 95°. То же судно, дрейфуя при зыби, лежало по отношению к ветру под углом 110°. Курсовой угол зыби при этом был равен 80°, высота волны достигала 1 *м*.

3. Зная предельный угол разворота судна к ветру, а следовательно, и направление дрейфа или угол дрейфа «на стопе», легко рассчитать и скорость дрейфа.

Для большинства современных судов этот угол близок к 90°. При таком угле разворота и угол дрейфа близок к этой величине.

Чтобы сделать расчетную формулу универсальной и пригодной для вычисления угла дрейфа при любых углах разворота, т. е. для случаев, когда направление дрейфа может и не совпадать с направлением ветра, воспользуемся вторым уравнением (54) системы,

Такой выбор делается по причине очень простой и справедливой для абсолютного большинства судов зависимости поперечных составляющих сил A и R от δ и β. Эта зависимость, как известно, имеет синусоидальный вид:

$$Y_0 = C_{0(90°)} \sin\beta\, \rho_0/_2\, S_{0(90°)} V_0^2, \tag{59}$$

$$Y = C_{(90°)} \sin\delta\, \rho/_2\, S_{(90°)} V^2. \tag{60}$$

Следовательно, для всех случаев дрейфа «на стопе» достаточно будет знать значения коэффициентов сопротивления для надводной и подводной частей судна при δ и β, равных 90°.

Так как рассматривается установившееся движение, то можно записать

$$C_{(90°)} \sin\delta\, \rho/_2\, S_{(90°)} V^2 = C_{0(90°)} \sin\beta\, \rho_0/_2\, S_{0(90°)} V_0^2, \tag{61}$$

при этом кажущийся ветер равен $\bar{V} = \bar{V}_{ист} - \bar{V}_o$.

Решая уравнение (61) относительно скорости дрейфа, найдем

$$V_0 = V_{ист}\left[\cos\delta_{ист}\frac{N\sin\delta}{N_0\sin\beta - N\sin\delta} \pm \right.$$

$$\left. \pm \sqrt{\frac{N\sin\delta}{N_0\sin\beta - N\sin\delta}\left(\cos^2\delta_{ист}\frac{N\sin\delta}{N_0\sin\beta - N\sin\delta} + 1\right)}\right], \tag{62}$$

где $\delta_{ист}$ — угол между направлением истинного ветра и направлением движения судна,

$$N = C_{(90°)}\, \rho/_2\, S_{(90°)},\quad N_0 = C_{0(90°)}\, \rho_0/_2\, S_{0(90°)}$$

Для расчета по этой формуле надо сначала определить по рис. 121 углы $\delta_{ист}$ и β. Так как δ зависит от V_0, вычисления надо производить последовательными приближениями. Но на помощь в данном случае приходят два обстоятельства. Дело в том, что для самоходных судов V_0 мало по сравнению с V; невелико также и отклонение направления дрейфа от направления истинного ветра. Поэтому величина V и тем более δ будут близки соответственно величинам $V_{ист}$ и $\delta_{ист}$. Для парусных судов, у которых скорость движения и угол отклонения от направления ветра значительные, этого допущения делать нельзя.

При принятом для самоходного судна, лежащего в дрейфе, допущении $\delta_{ист} = 180°$, формула (62) запишется так:

$$V_0 = V_{ист}\left[\frac{N\sin\delta}{N_0\sin\beta - N\sin\delta} \pm \right.$$

$$\left. \pm \sqrt{\frac{N\sin\delta}{N_0\sin\beta - N\sin\delta}\left(\frac{N\sin\delta}{N_0\sin\beta - N\sin\delta} - 1\right)}\right]. \tag{63}$$

Для наблюдателя, находящегося на судне, эта формула упростится, так как он имеет возможность непосредственно измерять скорость кажущегося ветра. В этом случае

$$V_0 = V\sqrt{\frac{N \sin \delta}{N_0 \sin \beta}}. \qquad (64)$$

Эта формула позволяет также приближенно рассчитывать скорость дрейфа по скорости истинного ветра.

Для случаев дрейфа судна, когда оно лежит примерно лагом к ветру и дрейфует по ветру, формула (64) принимает еще более простой вид, а именно:

$$V_0 = V\sqrt{\frac{N}{N_0}}. \qquad (65)$$

Следует напомнить, что при составлении этих формул влияние течения на скорость кажущегося ветра, а следовательно, и на ветровой дрейф не учитывалось. Но в большинстве случаев скорости морских течений несравненно меньше скоростей ветра, учет влияния которого представляет практический интерес, и поэтому влияние течений через кажущийся ветер на величину дрейфа окажется незначительным.

Определение величин ρ, ρ_0, $S_{(90°)}$, $S_{0(90°)}$ не вызывает каких-либо затруднений; имеющийся материал продувок позволяет найти для различных судов и величины $C_{(90°)}$, $C_{0(90°)}$.

Некоторые вопросы возникают при выборе коэффициента $C_{0(90°)}$. Если коэффициент сопротивления надводной части практически не зависит от Re, то для подводной части эта зависимость становится более заметной, а для условий дрейфа «на стопе», когда скорость дрейфа может изменяться в 50 и более раз, прежде чем решить вопрос о возможности не учитывать этой зависимости, надо привести некоторые доказательства. Кроме того, $C_{0(90°)}$ зависит также от величины волнового сопротивления, от волнения и, наконец, от соотношений размеров подводной части судна.

Двумя первыми факторами можно пренебречь. Скорость дрейфа различных судов с остановленными машинами обычно колеблется в пределах от 1 до 50 *см/сек*. Скорости, меньшие 1 *см/сек*, практически мало интересны, а скорости более 50 *см/сек* встречаются нечасто. Следовательно, Re будет изменяться в 50 раз. На рис. 78 дана зависимость коэффициента подъемной силы от числа Рейнольдса. Оказывается, что при изменении Re в 10 раз величина коэффициента менялась в пределах 0,04 при изменении угла атаки исследуемого тела вращения от —3 до 20°. Следовательно, есть основания утверждать, что для менее обтекаемого тела, каким является дрейфующее судно, изменения коэффициента сопротивления, даже при большом диапазоне изменения Re, не будут значительно отличаться от приведенной величины изменений.

Такую погрешность без особого ущерба для точности можно не учитывать. В тех же случаях, когда ветер либо очень слаб, либо очень силен, надо брать коэффициенты сопротивления, определенные при крайних значениях Re для приведенного диапазона скоростей дрейфа.

Если сопоставить величину волнового сопротивления при наблюдающихся скоростях дрейфа судна «на стопе» с общим сопротивлением, то окажется, что она ничтожно мала, а следовательно, влияние волнового сопротивления на величину коэффициента сопротивления можно не учитывать.

Влияние отношения размеров подводной части на величину коэффициента сопротивления было освещено выше.

Также указывалось, что коэффициенты сопротивления подводной части судна при углах набегания потока, близких к 90°, примерно равны коэффициенту сопротивления цилиндров, обдуваемых потоком, направленным по нормали к образующей.

Таким образом, для судна, подводные части которого не продувались, можно воспользоваться данными, полученными для цилиндров. Коэффициенты сопротивления, определенные при Re равном $8{,}8 \cdot 10^4$, для цилиндров с различным отношением образующей к диаметру были также приведены.

Наименее исследованным является влияние волнения на величину коэффициента сопротивления. Этот вопрос целесообразно рассмотреть совместно с вопросом о волновом дрейфе судна, т. е. о дрейфе под действием давления волны на борт.

На судно, дрейфующее с остановленными машинами, кроме ветра, действует набегающая волна и вызывает его смещение. Величина смещения зависит от элементов волнения, от соотношения длины и высоты волны с размерами судна и от смещения судна под действием ветра и течения. Эти факторы влияют на величину кажущейся скорости распространения волны — той скорости, которая определяет действие волнения на судно.

Из теоретических работ, посвященных данному вопросу, известны только работы Н. Е. Жуковского. К сожалению, в этих работах проведено исследование действия волнующейся жидкости малой глубины на неподвижное плавающее тело, либо на плавающие тела, движение которых ограничено колебаниями вокруг центра тяжести (килевая качка) и вертикальными перемещениями.

При определении волнового давления на неподвижное тело, частично погруженное в воду, оказывается, что суммарная горизонтальная составляющая давления всегда имеет положительную величину, т. е. направлена в сторону распространения волны. Это показывает, что свободно плавающее тело под действием волнового давления должно получить поступательное перемещение с периодически изменяющейся скоростью.

Скорость смещения судна под действием волнового давления можно определить, если подсчитать величину его и характер изме-

нения во времени. Но наблюдения над дрейфом судна указывают, что эта задача лишена пока практического интереса не только в силу очень малой скорости этих смещений, но и в силу невозможности практически обнаружить его, так как волнение изменяет силу сопротивления движению судна и этот эффект оказывается таким значительным, что затушевывает эффект воздействия волнового давления. Так, например, многочисленные наблюдения за скоростью дрейфа судна с остановленными машинами показали, что скорость дрейфа уменьшается, если судно при прочих равных условиях дрейфует на волне. Подтверждением этого является и постоянно наблюдаемое (даже при попутных ветрах) уменьшение скорости движения судна при любых курсовых углах и размерах волнения.

Таким образом, при волнении любое поступательное движение судна замедляется. Это происходит за счет увеличения коэффициента сопротивления подводной части судна. Такое влияние волнения оказывается бо́льшим активного воздействия волнения на судно, вызывающего горизонтальное смещение.

Сказанное, без сомнения, справедливо для не очень большого волнения, но, вероятно, это справедливо и для любых волн и для судов любого водоизмещения. Более точный и обоснованный ответ на этот вопрос можно дать после того, как накопится материал экспериментальных исследований коэффициента сопротивления подводной части судна, движущегося при различных условиях волнения.

4. На практике определение дрейфа судна с остановленными машинами сводится к следующим операциям.

Прежде всего по измеренному курсовому углу ветра определяется угол дрейфа, т. е. направление смещения судна (см. рис. 121). Затем, зная углы δ, β и скорость кажущегося ветра V, подставляют эти величины в одну из формул для дрейфа судна «на стопе». $C_{(90^\circ)}$ и $C_{0(90^\circ)}$ для данного судна должны быть известны.

Формула (65) была проверена по наблюдениям за дрейфом судна в натурных условиях.

Данные наблюдения были таковы:

Суммарный снос	55° 31 *см/сек*
Течение, измеренное вертушкой с заякоренного катера	121° 20 *см/сек*
Ветер	190° 8 *м/сек*
Волнение	200° H=0,5 *м*, l=3,5 *м*
Положение диаметрали судна	110°

При таких данных можно было считать, что дрейф совпадает с направлением ветра ($\delta=\beta=90^\circ$). Коэффициент сопротивления $C_{(90^\circ)}$ был взят равным 1; отношение длины судна к осадке — 25. Таким образом, пользуясь таблицей коэффициентов для цилиндров с различным отношением l/d, можно взять для судна, на котором производились испытания,

$$C_{0(90^\circ)} = 0{,}9.$$

Подсчитанная по формуле (65) скорость дрейфа судна оказалась (если считать $\rho/\rho_0=1/800$) равной 39 *см/сек*. Эта же скорость, определенная из наблюдений, равнялась 37 *см/сек*. При этом необходимо помнить, что влияние волнения при расчете не учитывалось.

Аналогичная же проверка формулы была проведена по наблюдениям дрейфа морского катера. При береговом ветре катер вначале дрейфовал по невзволнованной поверхности воды, но по мере удаления от берега выходил на волну, которая в конце дрейфа достигала 60 *см* (размеры катера в метрах: длина по ватерлинии— 13,3, максимальная осадка — 0,85). Если в начале дрейфа расчетная и наблюденная скорости катера были примерно равны, то в конце, при движении по взволнованной поверхности, расчетная скорость заметно превысила наблюденную.

§ 4. СПОСОБЫ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ВОЛНЕНИЯ И ВЕТРОВОГО ТЕЧЕНИЯ НА ДВИЖЕНИЕ СУДНА

Хотя вопрос о влиянии волнения и тем более влиянии дрейфового течения на движение судна непосредственно и не связан с вопросами, которым посвящена настоящая книга, все же нельзя обойти их молчанием при описании способов учета смещений судна, происходящих за счет дрейфа и асимметричного рыскания. Поэтому укажем здесь приближенные способы, позволяющие на практике учитывать влияние волнения и дрейфового течения на движение судна.

1. Как уже говорилось, с появлением парового флота основное внимание исследователей было направлено на определение влияния ветра и вызванного им волнения на снижение скорости судна.

В первых работах, относящихся к 1899—1905 годам, попытки найти зависимость снижения скорости различных судов от ветра и волнения делались на основании изучения записей в вахтенных журналах. Интересовавшие исследователей материалы собирались и путем рассылки специальных опросных листов. В 1907 году в журнале «Записки по гидрографии» появилась статья Кускова, в которой было сделано обобщение результатов работы.

Основной недостаток этих работ заключается в том, что в них рассматривался, как правило, итог всех причин, снижающих скорость судна без попытки расчленить их. Такими причинами являются дрейфовые и иные течения, волнение, ветер, изменение осадки судна, изменение к. п. д. винта, рыскание и ряд других менее важных причин. Правда, некоторые авторы пытались в своих работах провести расчленение причин, влияющих на снижение скорости судна.

Позже, в 1932 году аналогичную работу проделал Н. Н. Струйский. Он использовал 6287 записей в навигационных журналах некоторых судов Каспийского пароходства, курсировавших на линии Баку — Астрахань. Обрабатывая эти записи, автор стремился

установить связь между курсовым углом и скоростью ветра, с одной стороны, и изменением скорости движения судна, с другой. При этом он полагал, что каждому ветру должно соответствовать определенное волнение. Те случаи, когда такого соответствия не наблюдалось, автор не рассматривал. Струйский учитывал также действие течения и влияние на снижение скорости осадки судна.

Описанная выше группа работ, основывалась на материале, полученном из наблюдений в натурных условиях. Другая группа работ носила экспериментальный характер. Эксперименты проводились на гладкой и взволнованной поверхности с самоходными и буксируемыми моделями судов. Но авторов этих работ интересовали в основном вопросы кораблестроения и, в частности, поведение судовых машин при значительном волнении. Одним из выводов этих работ было утверждение о том, что падение скорости при волнении происходит не только вследствие увеличения сопротивления, оказываемого водой движению судна, но и вследствие уменьшения к. п. д. винта.

Проведенные наблюдения показали, что скорость судна немного увеличивается только при попутных ветрах 1—2 балла. При дальнейшем увеличении скорости попутного ветра скорость судна начинает падать. Боковой ветер также снижает скорость движения судна, но по сравнению со встречным ветром такой же силы это снижение в полтора-два раза меньше. Абсолютное уменьшение скорости у малых и тихоходных судов оказывается бóльшим, чем у больших и быстроходных. Мелкосидящие суда (при прочих равных условиях) при спокойном море всегда идут быстрее нагруженных, но эта разность в ходе уменьшается с возрастанием ветра и волнения.

Первые два вывода указывают, что основная причина, замедляющая движение судна — не ветер, а вызванное им волнение. Это справедливо для большей части диапазона скоростей ветра в его средней части. При очень малых и очень больших скоростях ветра влияние его на судно становится бóльшим, чем влияние вызванного им волнения.

Абсолютные потери скорости движения судов, вызванные столкновением их с волнами, различны. Это объясняется неодинаковым соотношением живой силы судов, т. е. произведением их массы на скорость движения, и размером волны. Чем меньше отношение произведения массы судна на скорость его движения к данному размеру волны, тем больше снижается скорость движения судна.

При движении по невзволнованной и взволнованной поверхности воды мелкосидящих и глубокосидящих судов наблюдается разница в величине потери скорости. Это подтверждает также вывод о влиянии волнения на к. п. д. винта. И действительно, у глубокосидящих судов режим работы винтов при волнении будет более благоприятным, чем у мелкосидящих, а следовательно, и скорость их изменится меньше.

Изменение скорости движения судна под действием ветра и волнения легко определить по показаниям лага. Целесообразно заранее определить величину снижения скорости судна для различных скоростей и осадок судна, различных курсовых углов и высот волн, а также различных курсовых углов и скоростей ветра.

Определения следует проводить для ветра и волнения отдельно. Для этого надо проводить наблюдения за снижением скорости сначала при ветре без волнения, что удается осуществить вблизи от берега при береговом ветре, а затем на волнении, вычитая долю снижения скорости, приходящуюся на ветер.

Проделать такие наблюдения для всех значений скорости движения судна, осадки и дифферента его, курсовых углов и высот волны, курсовых углов и скоростей ветра сложно. Поэтому следует ограничиться тремя основными скоростями хода судна (малый, средний, полный), основными значениями курсовых углов: 0, 45, 90, 135 и 180°, наиболее часто встречающимися значениями осадки (при условии равного киля) и некоторыми крайними и средними значениями высоты волны и скорости ветра. Наблюдения по двум последним характеристикам можно постепенно пополнять по мере встречи на практике с новыми значениями их. С достаточной для практики точностью снижение скорости движения судна при промежуточных значениях скорости, осадки, волнения и ветра можно определять интерполированием.

Сведения при наблюдениях об изменении скорости в долях узла или в метрах в секунду удобно собрать в таблицу, составленную по следующей форме.

Для волнения

Высота волны = . . . *м* . . . . балл	Осадка = . .					Осадка = . .					Осадка = . .					Осадка = . .				
Курсовой угол волны в ° / Ход судна	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Малый																				
Средний . . .																				
Полный . .																				

Для ветра форма таблицы должна быть такой же, как и для волнения, но в левом верхнем углу вместо «Высота волны» и «Курсовой угол волны» следует написать «Скорость ветра = ... *м/сек*» и «Курсовой угол ветра».

Для составления таких таблиц, помимо специальных наблюдений, можно использовать рабочие переходы судна. Изменение ско-

рости можно измерять или по лагу, или пользуясь точной обсервацией. Таблицы будут требовать корректировки только в случае значительных изменений конструкции судна.

2. Смещение судна течением происходит со скоростью, равной скорости течения.

Поправку к курсу на скорость дрейфового течения можно вычислить следующим способом. Скорость дрейфового течения определяется по формуле

$$v = \frac{A}{\sqrt{\sin \varphi}} V, \qquad (66)$$

где:

φ — широта места;

V — скорость истинного ветра в *м/сек;*

A — некоторый коэффициент (определяемый по наблюдениям за дрейфовыми течениями). Среднее значение этого коэффициента по наблюдениям Струйского и других авторов может быть принято 0,0127, если скорость ветра и скорость течения выражены в одних и тех же единицах измерения — в метрах в секунду.

Направление дрейфового течения изменяется с глубиной. В глубоких морях в северном полушарии верхний слой воды по теоретическим расчетам движется под углом 45° по отношению к направлению действия ветра вправо от него. На мелководье можно считать, что направление дрейфового течения на поверхности совпадает с направлением ветра.

Зная скорость дрейфового течения, вычисленную по формуле (66), надо найти приближенно и направление его, руководствуясь приведенными выше указаниями. Затем следует определить для нахождения поправки к курсу составляющую этого течения, перпендикулярную курсу, и составляющую, параллельную курсу, для вычисления поправки на истинную скорость движения судна. Если теперь разделить составляющую дрейфового течения, направленную перпендикулярно курсу, на истинную скорость движения судна, то по таблицам значений тангенса углов легко получить поправку к курсу на течение в угловом измерении. Знак поправки зависит от направления течения относительно курса судна.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

РЫСКЛИВОСТЬ И ВЕТРОВОЕ ЗАРЫСКИВАНИЕ СУДНА

§ 1. ЯВЛЕНИЕ РЫСКЛИВОСТИ СУДНА. ПРИЧИНЫ РЫСКЛИВОСТИ И АСИММЕТРИЧНОГО РЫСКАНИЯ СУДНА. ВРЕДНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РЫСКЛИВОСТИ

1. Отклонение судна от курса, не зависимое от действия руля, принято называть рыскливостью. Иногда это название относят лишь к стремлению судна развернуться под действием ветра носом к нему или, как говорят, привестись к ветру. Разворот судна по

ветру в таких случаях называют увальчивостью. Прекращение начавшегося отклонения и возвращение судна на курс достигаются при помощи руля. Но, действуя рулем, невозможно точно скомпенсировать все непрерывно изменяющиеся причины, вызывающие отклонение судна от курса. В результате под действием этих причин и работы руля диаметральная плоскость судна начинает совершать колебания относительно линии заданного курса. В нашей работе рысканием судна будут называться именно эти колебательные движения диаметральной плоскости. Такое определение имеет основание хотя бы потому, что характер возникающих колебаний в значительной мере обуславливается первичными причинами, вызывающими отклонение судна от курса. Кроме того, становясь на более общую точку зрения, разворот вправо и влево от курса под действием руля при наличии другой причины, вызывающей разворот судна, можно определить как рыскливость и увальчивость, сменяющие друг друга при изменении формы подводной части корпуса судна. Отсюда следует, что рыскание вообще нельзя рассматривать независимо от работы руля.

Понятие о рыскливости тесно связано с понятием об устойчивости судна на курсе. Устойчивость движения и рыскливость судна являются очень важными и в то же время еще мало изученными областями. Особенно это касается рыскливости.

Устойчивость движения детально исследовал акад. А. М. Ляпунов. Устойчивым он считал движение, при котором возмущение (отклонение от курса или изменение скорости) с течением времени либо уменьшается, либо не возрастает, оставаясь малой величиной.

Опираясь на теорию акад. А. М. Ляпунова, устойчивость движения судна исследовал А. М. Басин. Он исследовал как общий случай движения судна, так и частный — движение судна на прямом курсе. Оказывается, что движение в таком случае будет всегда устойчивым к возмущениям скорости, а для устойчивости на курсе необходимо, чтобы центр гидродинамических сил (без учета аэродинамических сил) располагался между центром тяжести и кормой судна. При движении на прямом курсе без ветра или при ветре в нос это условие не соблюдается, но при некоторых условиях движения оно может иметь место. Для этого необходим либо значительный поворот пера руля, либо определенное соотношение, при некоторых значениях курсового угла ветра и угла дрейфа, скорости движения и скорости ветра, или, наконец, наличие дополнительной значительной силы, приложенной близко к корме судна. Отсюда следует, что отдельные частные случаи движения судна могут оказаться устойчивыми. К таким случаям, например, относятся движение на крутой циркуляции и движение буксирующего судна.

Ограничившись этими замечаниями об устойчивости движения судна, вернемся опять к рыскливости его. Из сказанного следует, что и общий характер и количественные характеристики

рыскания зависят от условий движения судна. При неустойчивом движении рыскливость будет большей по сравнению с рыскливостью в случаях устойчивого движения судна. Это подтверждается наблюдениями за рыскливостью на циркуляции и рыскливостью буксирующего судна.

В количественном отношении рыскание характеризуется амплитудой отклонения диаметральной плоскости от линии заданного курса и стремительностью — угловой скоростью разворота. Кроме того, рыскание подразделяется на затухающее, незатухающее, симметричное и асимметричное. Асимметрия рыскания может быть двоякого рода, а именно: асимметрия величины угла отклонения вправо и влево от курса и асимметрия во времени лежания на правых и левых рысках. Такой случай, когда имеют место оба вида асимметрии, назовем рысканием с полной асимметрией в противоположность случаю, когда асимметрия неполная, т. е. когда судно рыскает на одинаковое число градусов вправо и влево, но лежит различное время на этих рысках или, наоборот, когда время одинаково, а углы различны.

Итак, величина и характер рыскания зависят от первичного возмущающего момента, от гидро- и аэродинамических характеристик судна и режима работы руля.

Рассмотрим первичные причины, вызывающие рыскание судна. Причины эти можно разделить на две группы.

В первую группу войдут причины, непосредственно связанные с судном и работой его органов движения и управления. К таким причинам относятся: асимметрия корпуса и рулевого устройства, различие в режиме работы машин и к. п. д. винтов (при двух винтах) и занос кормы (при одном винте). Ко второй группе относится действие ветра и волнения на судно. Действие ветра при этом оказывается сложным. С одной стороны, возникает вращающий момент силы давления ветра на надводную часть судна, с другой — ветер вызывает дрейф, вследствие чего появляется вращающий момент силы сопротивления в подводной части судна. Отсюда и проистекает зависимость рыскания от гидро- и аэродинамических характеристик судна.

По характеру действия одни причины (ветер, дрейф, асимметрия корпуса) стремятся развернуть судно в одну сторону, и, следовательно, заставляют его рыскать асимметрично, а другие (давление волны, идущей под углом к курсу, и различие в величинах упорных усилий на винтах) отклоняют его в обе стороны от курса.

Полная асимметрия чаще всего наблюдается, когда судном управляет рулевой, стоящий на вахте, хотя ему и ограничивают пределы рыскания. Гирорулевой уменьшает угловую асимметрию, но время лежания на правых и левых рысках при одностороннем возмущении остается все же неодинаковым.

Как уже говорилось, рулем невозможно точно скомпенсировать изменяющийся суммарный возмущающий момент, в резуль-

тате чего диаметральная плоскость начинает колебаться относительно курса. Но ни работа рулевого — человека, ни даже гирорулевого не может стереть характерные черты рыскания, обусловленные видом основного возмущения как в случае затухающего рыскания, так и в случае возникших незатухающих колебаний.

2. Рыскливость судна следует отнести к отрицательным явлениям как с точки зрения экономичности, так и с точки зрения безопасности плавания. В книге А. Н. Крылова «Теория корабля» приводится ряд примеров, свидетельствующих об этом. Так, например, в 1869 году броненосная батарея «Кремль», отличавшаяся чрезмерной рыскливостью, протаранила фрегат «Олег», находившийся с ней в совместном плавании. В 1883 году эта же батарея протаранила коммерческий пароход «Ютланд», когда обгоняла его на параллельном курсе. Та же причина — чрезмерная рыскливость — привела к тому, что «Iron Duke» протаранил «Vonguard», а «Crosser Kurfürst» протаранил «Kaiser Wilhelm». Там же мы находим указание, что пять боевых кораблей русского флота: «Александр III», «Бородино», «Суворов», «Орел» и «Слава», отличались этим же пороком. При испытаниях они стремительно рыскали, причем, сбившись с курса, входили в самопроизвольную циркуляцию, и вывести их из нее удавалось, лишь сбавив ход и застопорив одну из машин. Как потом оказалось, чрезмерная рыскливость этих кораблей объяснялась вырезами в кормовых дейдвудах (прямоугольные треугольники с катетами 3 и 7 *м*), которые были сделаны для улучшения управляемости. Когда отверстия были заделаны, чрезмерная рыскливость судов исчезла. Это указывает на огромную роль в определении рыскливости гидродинамических характеристик судна, в частности, положения точки приложения силы сопротивления. Смещение ее к носу увеличивает рыскливость.

В приведенных примерах рыскливость после первичного отклонения, начавшейся циркуляции и появления угла дрейфа возрастала настолько, что ликвидировать ее не удавалось даже полной перекладкой руля на борт. Этот факт в свою очередь указывает и на решающую роль действия ветра и вызванного им дрейфа в определении рыскливости.

Во всех работах, к сожалению, очень немногочисленных, где упоминалось о рыскливости судна и приводились отдельные примеры, влияние ветра на этот элемент движения либо не учитывалось совсем, либо ему отводили второстепенную роль. Но из сказанного можно сделать иной вывод. Роль ветра в явлении рыскливости очень велика, и, возможно, причиной многих аварий явилось чрезмерное увеличение ее, вызванное ветром.

Приведенные примеры аварий — не единственные примеры отрицательных последствий рыскливости, о чем свидетельствуют соображения, указывающие на снижение экономичности плавания и точности определения места судна по счислению при значительной рыскливости.

Совершая плавание между двумя пунктами по некоторой вследствие рыскливости кривой, судно идет не по кратчайшему пути, и, следовательно, время перехода увеличивается.

Очевидно, что удлинение пути между двумя точками при движении с симметричным рысканием, если приближенно принять путь за ломаную линию, определится (рис. 122) по формуле:

$$\Delta s = AC - AB = AB\left(\frac{1}{\cos\varphi} - 1\right), \qquad (67)$$

где:

Δs — удлинение пути;

φ — угол рыскания.

В случае асимметричного рыскания (рис. 123) может оказаться, что после завершения полного периода рыскания судно не вернется на линию заданного курса, а при систематическом повторении такой асимметрии будет с каждым новым периодом все дальше и дальше отходить от намеченного пути. Это явление было обнаружено при исследовании дрейфа судна, проводившемся в натурных условиях зимой 1943 года, и тогда же впервые систематически изучено.

При определении угла дрейфа было обнаружено, что с ветром бакштаг судно дрейфует на ветер. По-

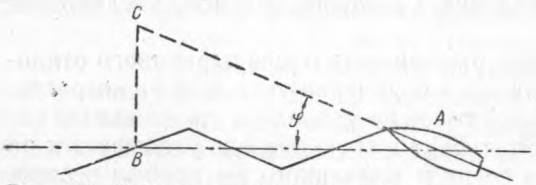


Рис. 122. Схематический путь судна, рыскающего симметрично

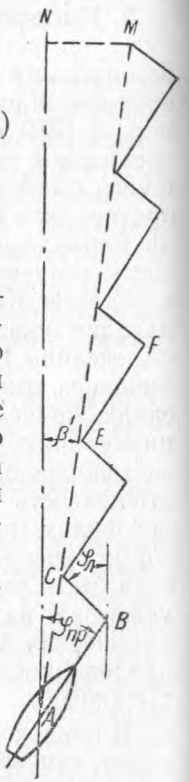


Рис. 123. Схематический путь судна, рыскающего асимметрично

скольку на первый взгляд это противоречило физическим законам, наблюдения были многократно повторены с тщательным определением места судна и наблюдением за направлением ухода с курса по створу. Но и повторные наблюдения привели к тому же результату: при курсовом угле ветра, большем 90°, судно дрейфовало на ветер при углах, меньших 90°, уходило с линии заданного курса по ветру. Полное объяснение этого явления было найдено после детального наблюдения и измерений рыскания судна. Попытка двигаться при ветре бакштаг, по возможности строго соблюдая угловую симметрию рыскания, не привела ни к чему — судно вновь

уходило на ветер. Тогда осталось одно — замерить при таком движении время лежания судна на правом и левом рысках. Оказалось, что время рыска на ветер было заметно больше времени рыска по ветру.

Таким образом, кроме смещения с линии курса под действием силы давления ветра на борт, судно дополнительно смещается вследствие асимметричного рыскания. Моменты сил A и R в зависимости от курсового угла ветра и дрейфа могут приводить судно к ветру либо уваливать его под ветер. В зависимости от этого и дополнительное смещение будет направлено либо в сторону действия ветра, либо против него.

Наблюдения показывают, что уход с курса вследствие асимметрии рыскания одного порядка с величиной ветрового дрейфа и зачастую может превышать его. В том случае, когда судно зарыскивает на ветер, а уход с курса вследствие этого зарыскивания больше ветрового дрейфа, судно будет смещаться с курса на ветер. Обычные навигационные приборы на судах этого смещения не регистрируют. Курсограммы обычных курсографов имеют очень малый масштаб времени, и асимметрию во времени, не зная о ней, обнаружить по ним затруднительно. Возможно, что именно поэтому уход судна с курса на ветер так долго и не находил объяснения. Штурманам это явление было известно давно. Это подтверждается правилом, выработанным на практике, — не брать для большинства судов при прокладке поправку на дрейф в том случае, когда курсовой угол ветра больше 90°.

Примером такого судна является любое, приводящееся при бакштаге на ветер.

Когда уход с курса вследствие рыскливости совпадает по направлению с ветровым дрейфом, суммарное смещение воспринимается как неожиданно большой для данного судна ветровой дрейф.

Ниже будет дан способ определения ухода судна с курса, происходящего вследствие зарыскивания. Третьим следствием рыскливости судна будет фактическое уменьшение скорости движения, вызванное перекладкой руля.

Продувки модели с поворачивающимися рулями обнаруживают значительные изменения коэффициентов C_{0x} и C_{0y} в зависимости от t.

При угле дрейфа 5° и угле $t = 0°$ C_{0x} и C_{0y} по этим продувкам соответственно равны 0,02 и 0,04, но уже при i=30° C_{0x} = =0,05, а C_{0y}=0,12. Это увеличение коэффициентов сопротивления приводит к снижению скорости судна при рыскании.

Чтобы представить себе порядок величины снижения скорости, обратимся к наблюдениям за снижением скорости судна во время циркуляции. Мы вправе это сделать, поскольку движение судна фактически представляет собой кривую, состоящую из отрезков неустановившихся циркуляций для их маневренного и эволюционного периодов.

Из исследований движения судна на циркуляции известно, что отношение скорости при установившейся циркуляции к скорости до начала циркуляции при циркуляционном угле дрейфа, колеблющемся в пределах от 4 до 13°, для различных судов меняется в пределах от 0,5 до 0,9. Угол перекладки руля при этих испытаниях в среднем равнялся 30°.

Данными о падении скорости судна в маневренный, т. е. начальный и эволюционный, последующий за маневренным периоды циркуляции мы не располагаем, но если для грубой оценки принять ее равной половине падения скорости, наблюдающегося к моменту наступления установившегося движения на циркуляции, т. е. третьего периода ее, то снижение скорости за счет перекладки руля при рыскливости составит 5—25% скорости, с которой двигалось судно при условии отсутствия рыскливости.

В работе Архиповой и Соломиной, проделанной совместно с автором, приводится пример расчета потери времени за счет трех описанных выше причин, порожденных рысканием, для судна, совершающего переход между Одессой и Батуми протяженностью 563 мили; средний угол рыскания равен 5°.

Первая причина — фактическое удлинение пути — приводит к тому, что судно движется на данном переходе лишние 2,2 мили и расходует на прохождение их девяти с половиной узловым ходом лишние 14 минут.

Вторая причина — уход судна с курса вследствие асимметричного по времени рыскания и проистекающего отсюда нового удлинения пути заставляет судно терять еще примерно 30 минут.

Третья и самая главная причина — потеря времени за счет снижения фактической скорости — приводит к таким результатам: судно с ходом 10 узлов, если принять снижение скорости, обусловленное рыскливостью, равным всего лишь 5%, будет итти со скоростью 9,5 узла и потратит на переход около 60 часов вместо 56 при 10-узловом ходе, потеряв, таким образом, 4 часа.

Сложив потери времени от трех причин, находим общую потерю, обусловленную рыскливостью судна, равную для данного перехода 4 часам 44 минутам. При этом следует помнить, что величина угла рыскливости и потеря скорости взяты отнюдь не завышенными, а последняя, скорее, несколько заниженной.

Для судна с машиной мощностью 1500 *л. с.* такая потеря времени будет стоить примерно 2,5 *т* угля, и это только для одного небольшого судна при небольшом переходе. Если учесть все плавающие суда и общую мощность их машин, то потери времени и угля, вызванные рыскливостью судна, окажутся огромными.

Эти примеры и ряд других свидетельствуют о необходимости изучения рыскливости для разработки способов учета ее влияния и способов борьбы с ней.

Определим теперь, какие же причины, вызывающие рыскливость судна, — основные и наиболее часто встречающиеся.

Асимметрия корпуса судна встречается не часто, величина ее незначительна и она всегда может быть так или иначе ликвидирована. Асимметрия в работе двух винтов — явление для исправных механизмов редкое. Занос кормы, как правило, невелик, и влияние этого эффекта на рыскливость судна незначительно. Таким образом, эти три возмущения, сбивающие судно с курса, — не основные.

Перемещающееся вдоль борта давление волны вызывает симметричное рыскание, но, как показывает наблюдение, роль этой причины в создании рыскливости все же оказывается второстепенной по сравнению с ролью действия ветра и дрейфа. Подтверждение для такого утверждения мы находим в наблюдениях за рыскливостью, проводившихся летом 1944 года.

Мы приведем два наиболее показательных случая. В одном из них при ветре 2,4 *м/сек* с курсовым углом 125° и волнении менее 0,5 *м*, примерно такого же направления, судно рыскало со значительной асимметрией:

$$\varphi_{прав}=0^{\circ},5, \qquad \varphi_{лев}=1^{\circ},2,$$

$$t_{прав}=18'', \qquad t_{лев}=31''.$$

В другом случае, при ветре с курсовым углом 18° и скоростью 17 *м/сек* и волнении того же направления с высотой волны 2 *м* рыскливость характеризовалась следующими цифрами:

$$\varphi_{прав}=1^{\circ},25, \qquad \varphi_{лев}=1^{\circ},15,$$

$$t_{прав}=14'', \qquad t_{лев}=66''.$$

Цифры, характеризующие рыскливость, в обоих случаях являются средними из нескольких серий наблюдений. Эти цифры показывают, что изменение величины волнения в значительных пределах практически не сказалось на рыскливости. Объясняется это малым периодом волн, в течение которого судно с большой массой не успевает отклониться от курса под действием давления волны на большую величину. Таким образом, рыскание от волнения в значительной мере зависит от массы судна, высоты, периода или длины волны.

Незначительное расхождение величин рыскания, обнаруживающееся в приведенных примерах, показывает, что в явлении рыскливости для некоторых судов основную роль играет не величина скорости ветра, а курсовой угол его. Скорость же ветра сказывается на величине рыскливости через угол дрейфа.

Таким образом, основная причина определяющая рыскание судна, — это ветер и вызванный ветром дрейф. Количественная сторона явления рыскания зависит от величины моментов проекций сил A и R на ось y, которые в свою очередь зависят от скоро-

сти ветра, его курсового угла, от угла дрейфа и скорости судна. При постоянной скорости движения судна рыскливость в основном зависит от курсового угла ветра, так как угол дрейфа при изменении скорости ветра изменяется на незначительную величину.

3. Определив ведущую роль вращающих моментов сил A и R в создании рыскания судна, рассмотрим изменение их в зависимости от курсового угла ветра и угла дрейфа для различных судов и сравним кривые моментов, характеризующие эти изменения, чтобы иметь возможность судить хотя бы предположительно об их рыскливости. Воспользуемся для этого буксировками перевернутых надводных частей (упоминавшихся в главе первой) моделей танкера, быстроходного грузового парохода и лайнера и продувками надводной и подводной частей современного быстроходного судна. Эти суда — наиболее распространенные.

Для приближенного сравнения величины рыскливости различных судов по величине отклоняющего с курса возмущения подсчитаем моменты сил A и R для четырех названных моделей при различных курсовых углах ветра. Чтобы иметь возможность сравнивать результаты, будем считать, что скорость движения, угол дрейфа, скорость и направление ветра и площади надводной и подводной частей для всех судов одинаковы.

Угол дрейфа судов при движении со скоростью 8—13 узлов редко превышает 15°. Но известно, что точка приложения силы при изменении угла дрейфа в этом диапазоне практически не смещается и находится на расстоянии $^1/_{10}$—$^1/_5$ длины судна от носового перпендикуляра. Поэтому при расчетах, учитывая постоянство скорости, будем считать вращающий момент силы R постоянным при длине плеча от носового перпендикуляра, равной $^1/_5$ длины судна.

Чтобы исключить этот момент из рассмотрения и тем самым упростить расчеты, момент силы A при различных δ определим относительно точки приложения силы R.

В работе Хьюза нет данных о проекции площади моделей и указаний, к какой площади относились вычисленные коэффициенты сопротивления. Поэтому, определяя силу A, мы вынуждены будем в дальнейшем взять условную площадь, равную произведению длины модели на ее среднюю высоту. При условии равенства сил для всех моделей, сравнивая вращающие моменты, можно рассматривать только плечи этих сил, определенные относительно точки приложения силы R (рис. 124).

Знаки плюс и минус характеризуют в данном случае направление вращения судна относительно ветра, а следовательно, и знак асимметрии.

Нулевое значение плеча свидетельствует о существовании угла δ, при котором возмущение, а следовательно, и рыскание равно нулю. Угол дрейфа принят нами постоянным, но, вообще говоря, он может меняться и при малых скоростях движения значительно превысить 15°; каждому углу дрейфа соответствует угол,

при котором рыскливость теоретически должна равняться нулю, а практически будет минимальной, вследствие того что ветровое возмущение лишь главная, но не единственная причина рыскания. Величина наивыгоднейшего в смысле рыскливости курсового угла ветра непосредственно не зависит от скорости его. Один из приведенных выше примеров—рыскание при ветре 17 *м/сек* с курсовым углом 18°—убедительно подтверждает справедливость сказанного.

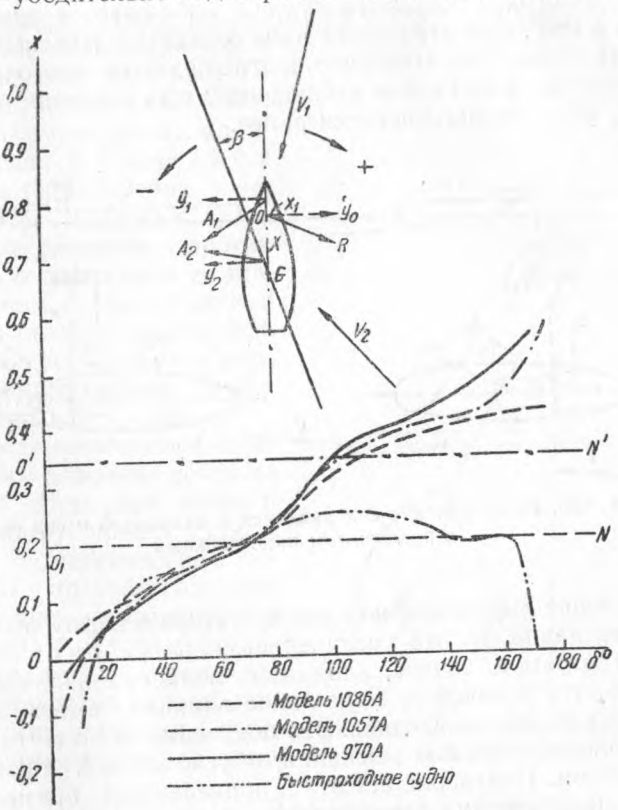


Рис. 124. Зависимость плеча вращающего момента силы A, определенного относительно вертикальной линии, проходящей через точку приложения силы R от угла δ

В самом деле, угол δ, соответствующий наименьшему рысканию, у подавляющего большинства судов является острым углом. Понятно, что этот курсовой угол ветра будет наивыгоднейшим и с точки зрения сохранения управляемости судна.

Из рис. 124 видно, что область углов δ, при которых судно приводится, больше области углов δ, при которых судно уваливает. Но на самом деле это не совсем так. Дело в том, что положение точки приложения силы R (точка O) соответствует тому

случаю, когда руль расположен в диаметральной плоскости. Если руль повернут, что необходимо для удержания судна на курсе при ветре, то точка O переместится ближе к корме (на рисунке линия $O'N'$ соответствует положению силы R при i=30°) и область углов δ, при которых судно приводится, окажется значительно более узкой.

Максимум возмущения, как показывает рисунок, у всех судов, кроме модели быстроходного судна, наблюдается при углах δ, близких к 180°. При этих углах надо ожидать и максимальной рыскливости судна. Это отчетливо подтверждается многочисленными наблюдениями, в том числе наблюдениями за рысканием судна при δ =125°, уже упоминавшимися ранее.

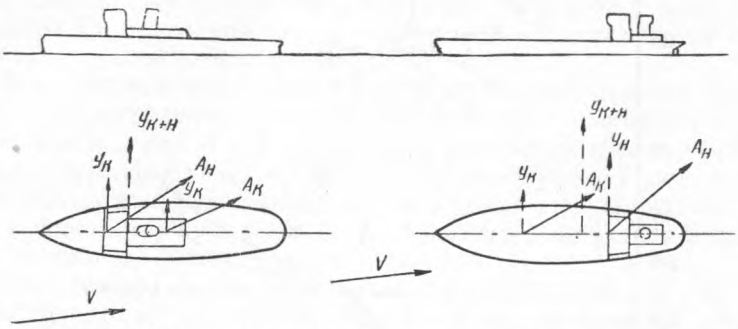


Рис. 125. Расположение сил давления в надводной части судна с различными надстройками

Увеличение рыскливости судна при ветре в корму было подмечено очень давно, но это увеличение склонны были объяснять влиянием волны и, точнее, влиянием волнения на работу руля. Возможно, что в какой-то мере такое влияние имеет место, но роль его все же незначительна. Это подтверждается всегда наблюдаемой закономерностью рыскания, обусловленной только ветровым фактором. Подтверждает это и приведенный пример, когда волнение практически отсутствовало, а таких примеров много. Конечно, нельзя отрицать возможности существования отдельных случаев, когда удары волн в корму и оголение руля при подъеме ее на волну могут привести к рысканию, граничащему даже с потерей управляемости.

Кривые возмущающих моментов показывают, что минимальная рыскливость будет наблюдаться у судов с симметричной относительно мидель-шпангоута площадью надводной части судна без значительной концентрации ее в середине.

Увеличение площади в носовой части приводит к уменьшению рыскливости при курсовых углах ветра, больших 90°. Чрезмерное увеличение площади в этой области увеличивает рыскливость при бейдевинде. Наиболее неблагоприятной является концентрация

надстроек в кормовой части судна, приводящая к увеличению рыскливости на большей части диапазона изменения угла δ.

Определить величину вращающего момента при курсовых углах ветра, очень близких к 0 и 180°, экспериментально невозможно, и поэтому приходится прибегать к экстраполяции. Но экстраполирование может привести к значительным ошибкам, так как изменение момента при углах, очень близких к 0 и 180°, чревато всякими неожиданностями. Причина этих неожиданных изменений станет ясной, если обратиться к силуэту судна (рис. 125). В тех случаях, когда надстройки высоко поднимаются над палубой, при углах δ, близких к 0 и 180°, точка приложения суммарной силы давления ветра может резко сместиться против нормального положения ее при симметричном расположении площади в сторону надстройки, так как проекция площади корпуса окажется меньше проекции площади надстройки.

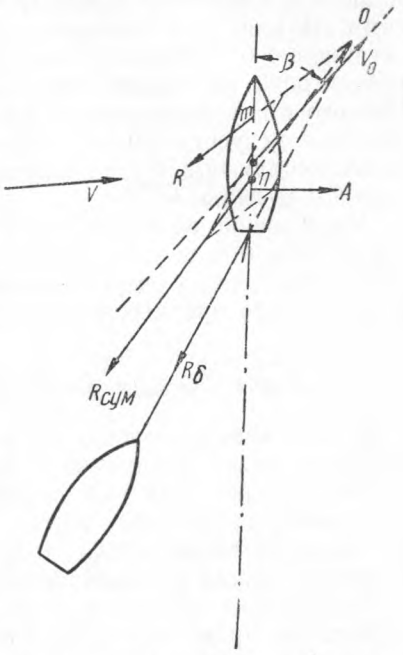


Рис. 126. Силы, действующие на буксирующее судно

О точке приложения суммарной силы давления ветра на надводную часть при ветре в нос или корму можно судить, пользуясь геометрическими построениями, пренебрегая при этом различием коэффициентов сопротивления отдельных надстроек и корпуса, считая, что ветер действует на тело с прямоугольными уступами, соответствующими основным надстройкам.

4. Характер рыскливости судна коренным образом изменяется, если оно буксирует другое. При расположении судов, указанном на рис. 126, точка приложения n суммарной силы сопротивления движению сместится к корме, следовательно, изменится и величина вращающего момента этой силы, определенного относительно точки m приложения силы R.

Чтобы представить себе, как это скажется на величине возмущающего момента, надо на рис. 124 изменить положение начала координат на величину, равную расстоянию mn между точкой приложения силы R и силы $R_{сум}$.

Значения моментов, отсчитанные от линии $O'N'$, показывают, что рыскливость буксирующего судна при углах δ, больших 90°, уменьшается по сравнению с рыскливостью того же судна в случае

одиночного движения, а при углах δ, меньших 90°,— несколько увеличивается. Наличие судна на буксире изменяет и положение нулевого значения возмущающего момента.

Уменьшить рыскливость можно выбором такого направления движения и курсового угла ветра, при котором возмущающий момент будет равен нулю. Но радикальным средством борьбы с рыскливостью является выбор наиболее рациональной формы корпуса судна и рационального расположения надстроек. Однако оптимальное расположение надстроек при различных курсовых углах ветра должно быть неодинаковым и, кроме того, расположение их связано с особенностями конструкции судна, не позволяющими руководствоваться только стремлением уменьшить рыскливость его. Поэтому для уменьшения рыскливости можно рекомендовать пользоваться искусственными, меняющимися по величине и положению площадями. Об этих устройствах более подробно будет сказано в конце главы.

Уменьшение возмущающего вращающего момента повлечет за собой уменьшение угла перекладки руля и амплитуды рыскливости, а это в свою очередь приведет к уменьшению или полному исчезновению вредных последствий рыскания.

§ 2. ФОРМУЛЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЫСКАНИЯ

1. Условившись рассматривать рыскливость судна под действием только основных причин — ветра и дрейфа, покажем путь аналитического решения этой задачи. Для простоты будем рассматривать плоское движение, считая, что вертикальные перемещения судна ничтожно малы или что эти перемещения, а также бортовая и килевая качка не сказываются на величине рыскания. При такой постановке задачи мы должны будем исходить при решении ее из системы уравнений (29), (30), (31), (32), (33).

Указанные уравнения удается значительно упростить, если принять во внимание, что углы дрейфа в этой задаче можно считать углами малыми. Действительно, угол ветрового дрейфа, как известно, невелик. То же самое можно сказать в рассматриваемом случае движения и про циркуляционный угол дрейфа. Разъясним это утверждение.

Угол дрейфа на циркуляции возникает по той причине, что нос судна повернут внутрь циркуляции — траектории центра тяжести во время поворота, как это показано на рис. 127. Угол между направлением диаметральной плоскости и направлением истинной скорости движения центра тяжести судна, совпадающим в каждый новый момент времени с направлением касательной к циркуляции, и будет называться циркуляционным углом дрейфа.

Известно, что этот угол тем меньше, чем положе циркуляция. Для данной циркуляции он имеет наименьшее значение в начальный период, т. е. сразу после перекладки руля. Но движение судна с рысканием как раз и можно рассматривать как движение на

очень пологих циркуляциях в начальный или, как его принято называть, в маневренный период этих циркуляций.

В результате упрощений, которые оказывается возможным ввести вследствие малости угла дрейфа и ряда других упрощений, решение системы оказывается не столь уже сложным. Если, в частности, допустить, что вращательное движение судна не зависит от его боковых смещений, то задача сведется к решению одного лишь уравнения (31) — уравнения моментов сил, действующих на судно. Такое допущение для движения судна с рысканием с определенной степенью приближения сделать можно в силу малости углов дрейфа.

Как показали исследования, вид члена уравнения (31), характеризующего величину момента силы сопротивления воды движению судна, возникающего вследствие вращательных движений, для различных условий движения неодинаков. При больших скоростях движения судна и небольшой скорости ветра его следует брать пропорциональным произведению скорости поступательного движения на угловую скорость вращения судна $V_0\omega$, а в случае малых скоростей движения и большой скорости ветра этот член следует брать пропорциональным квадрату угловой скорости ω^2. При строгой же постановке задачи в тех случаях движения судна, когда вращающий момент определяется не только силой сопротивления воды движению судна (руль), а другими причинами (ветер, неравномерная работа двух винтов) член уравнения, характеризующий сопротивление воды вращению судна, должен представлять собой сумму членов $\kappa_1 V_0\omega + \kappa_2\omega^2$.

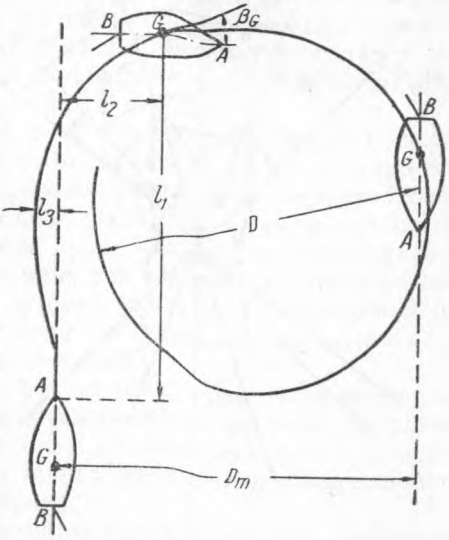


Рис. 127. Движение судна на циркуляции

При исследовании разворота судна под действием ветра с остановленными машинами момент сопротивления воды берется пропорциональным квадрату угловой скорости.

Имея в виду исследовать общий характер рыскания судна и выявить причины, приводящие к возникновению различных типов рыскания, мы рассмотрим упрощенную задачу, ограничиваясь решением одного уравнения моментов. Кроме того, так как нас в первую очередь интересуют случаи движения с малой скоростью при большой скорости ветра, в уравнении моментов член, характери-

зующий сопротивление, оказываемое водой вращению судна, будем считать пропорциональным квадрату угловой скорости вращения его диаметральной плоскости.

Для того чтобы решить уравнение моментов и определить характер разворота судна, надо знать аэро- и гидродинамические характеристики судна, скорость и курсовой угол ветра, а также задаться определенным режимом работы руля.

Мы не будем здесь приводить всего хода решений, а дадим лишь окончательные выводы для двух режимов работы руля: режима, возникающего при работе рулевого-человека, и режима гироскопического рулевого управления.

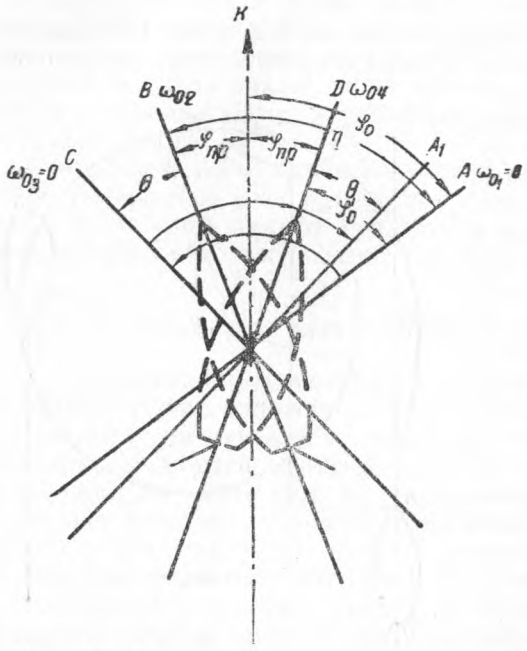


Рис. 128. Различные фазы незатухающего рыскания судна без ветра

2. Каждый рулевой-человек неизбежно вносит субъективные черты в режим работы руля, но два обстоятельства, а именно: задаваемые рулевому пределы рыскания вправо и влево и невозможность непрерывно в течение нескольких часов следить за вращением диаметральной плоскости и непрерывно же реагировать на это движение поворотом руля, обуславливают основные общие черты характера режима управления.

Поэтому, идя на некоторое приближение, будем считать, что рулевой-человек работает по следующей схеме. Он перекладывает руль на соответствующий борт в момент, когда судно под действием некоторого возмущения развернулось до одного из крайних пределов рыскания. В этом положении руль остается до тех пор, пока судно в обратном вращательном движении не достигнет противоположного предела рыскания, когда рулевой переложит руль на противоположный борт. Такие перекладки будут совершаться в течение всего движения.

Приведенная схема лишь приближенно соответствует действительности, но она дает нам возможность получить простое решение

уравнения моментов. При этом принятое допущение не исказит основных черт рыскания и причин, обуславливающих возникновение различных типов рыскания. Так как время, необходимое на перекладку руля, несравненно меньше времени полного периода рыскания судна, то можно при решении уравнений моментов считать, что перекладка происходит мгновенно. Следовательно, рулевой момент в течение рыскливости будет оставаться постоянным по величине, дважды изменяясь по знаку.

Рассмотрим теперь, каков будет режим рыскания при принятом режиме работы руля.

В момент, когда диаметральная плоскость в своем вращательном движении под действием некоторого возмущения подойдет к допускаемому пределу рыскания D (рис. 128), судно будет иметь некоторую угловую скорость вращения ω. После перекладки руля скорость вращения уменьшается и через некоторый промежуток времени будет равна нулю. За это время диаметральная плоскость судна отклонится от положения D на некоторый угол и займет положение A. После этого начнется вращение судна с нарастающей угловой скоростью в противоположную сторону.

Когда положение диаметральной плоскости совпадет с положением B, соответствующим другому пределу рыскания, судно будет обладать некоторой новой угловой скоростью вращения. После очередной перекладки руля эта скорость начнет уменьшаться. В момент, когда она станет равной нулю, судно будет находиться в положении C. С этого момента начнется ускоренное вращательное движение до положения D, где руль вновь будет переложен на противоположный борт, и описанное движение диаметральной плоскости начнет периодически повторяться.

Таким образом, мы видим, что за время полного периода рыскания судно совершит два раза ускоренное и два раза замедленное вращательное движение. При этом угловая скорость вращения равна нулю в точках A и C, в точках же B и D угловая скорость достигает максимального значения.

Для того чтобы найти значения угловых скоростей движения судна, величину углов отклонения от курса в положениях A и C и время полного периода рыскания необходимо решить уравнение моментов, задав определенное значение рулевого момента, меняющегося мгновенно в положениях B и D. Но так как расположение сил инерции, сопротивления и активной силы, а следовательно, и направления моментов их в течение полного периода рыскания изменяется, то будет меняться и вид решения. Таким образом, не удается дать непрерывного решения уравнения, и придется вести решение по этапам, используя конечные результаты подсчетов более раннего этапа как начальные условия для последующего.

Решая уравнение моментов для случая замедленного вращения (рис. 129), получим следующее выражение для угловой скорости:

$$\omega = \sqrt{\frac{N}{\theta}}\ \mathrm{tg}\left(\mathrm{arc\,tg}\,\omega_0\sqrt{\frac{\theta}{N}} - t\sqrt{\theta N}\right), \qquad (68)$$

а для угла поворота судна:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{1}{2\theta} \ln \frac{1+\omega_0^2 \frac{\theta}{N}}{1+\operatorname{tg}^2\left(\operatorname{arc\,tg}\,\omega_0 \sqrt{\frac{\theta}{N}} - t\sqrt{\theta N}\right)}, \qquad (69)$$

где:

t — время, отсчитываемое от момента перекладки руля;

ω_0 — угловая скорость судна в момент перекладки руля;

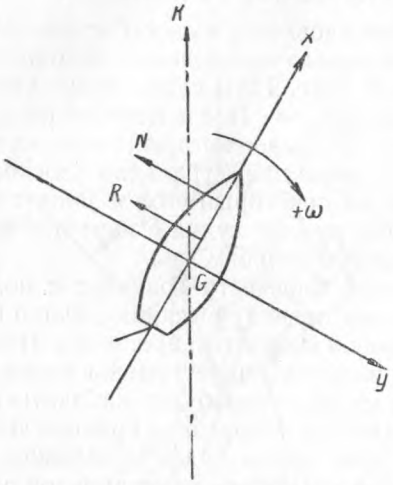


Рис. 129. К исследованию рыскливости судна

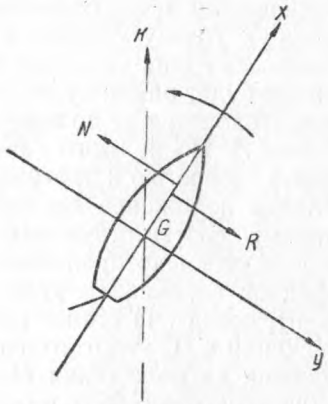


Рис. 130. К исследованию рыскливости судна

θ — обозначает $\frac{P}{I_z}$ (P — коэффициент, характеризующий момент сопротивления, оказываемого водой вращению судна, I_z — момент инерции судна относительно оси, проходящей отвесно через его центр тяжести).

$$N = \frac{Yb \pm Y_0 a \pm nl}{I_z}$$

(Yb — вращающий момент силы давления ветра; $Y_0 a$ — вращающий момент силы сопротивления воды поступательному движению судна; nl — момент силы, действующей на перо руля).

В свою очередь P равно $\kappa L_0^3 S_{0(90^0)}$,

где: κ — коэффициент, зависящий от формы подводной части судна, определяемый экспериментально; L_0 — длина судна; $S_{0(90^0)}$ — площадь диаметрального сечения подводной части судна.

Формула (68) показывает, как изменяется с течением времени t скорость вращения судна от некоторого начального значения ω_0 до нуля под действием суммарного момента $Yb \pm Y_0 a + nl$.

Формула (69) позволяет вычислить величину угла поворота φ в любой момент времени t. Обе формулы справедливы при $\omega_0 > 0$.

Очевидно, что скорость вращения становится равной нулю тогда, когда будет равен нулю двучлен, стоящий в формуле (68) под знаком тангенса, или когда

$$t\sqrt{\theta N} = \operatorname{arc\,tg}\,\omega_0\sqrt{\frac{\theta}{N}}. \tag{70}$$

Из этого равенства можно определить время, необходимое для прекращения вращения судна при начальной угловой скорости ω_0. Оказывается,

$$t_{(\omega=0)} = \frac{\operatorname{arc\,tg}\,\omega_0\sqrt{\frac{\theta}{N}}}{\sqrt{\theta N}}. \tag{71}$$

В свою очередь, если подставить условие (70) в формулу (69), то получим формулу для вычисления угла поворота судна от положения D до положения A, когда угловая скорость станет равной нулю:

$$\varphi_{t(\omega=0)} = \varphi_0 + \frac{1}{2\theta}\ln\left(1 + \omega_0^2\,\frac{\theta}{N}\right), \tag{72}$$

где φ_0 — некоторый начальный угол поворота, например, угол положения D, отсчитанный от направления заданного курса.

Под действием момента $Yb \pm Y_0 a + nl$, достигнув нулевого значения ω, судно начнет вращаться в другую сторону. При этом ω изменит знак и начнет возрастать.

На этом этапе рыскания расположение сил будет иным (рис. 130), и решение уравнения моментов будет также иметь другой вид.

Для угловой скорости будем иметь следующую формулу:

$$\omega = \sqrt{\frac{N}{\theta}}\,\operatorname{th}\left(\operatorname{arth}\,\omega_0\sqrt{\frac{\theta}{N}} + t\sqrt{\theta N}\right), \tag{73}$$

а для угла разворота:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{1}{2\theta}\ln\frac{1-\operatorname{th}^2\left(\operatorname{arth}\,\omega_0\sqrt{\frac{\theta}{N}} + t\sqrt{\theta N}\right)}{1-\omega_0^2\,\frac{\theta}{N}}. \tag{74}$$

Если начальная угловая скорость равна нулю, а именно такой случай имеет место в рассматриваемой нами задаче, то уравнения (73) и (74) упростятся и будут выглядеть так:

$$\omega = \sqrt{\frac{N}{\theta}}\,\operatorname{th} t\sqrt{\theta N}, \tag{73'}$$

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{1}{2\theta}\ln\left(1-\operatorname{th}^2 t\sqrt{\theta N}\right). \tag{74'}$$

Вращение судна в соответствии с формулами (73′), (74′) будет происходить на основании наших предположений до тех пор, пока диаметральная плоскость его не займет положение B (см. рис. 128). Время, которое потребуется для достижения судном положения B, можно определить по формуле (74′), положив $\varphi_0=0$, а φ равным углу AOB. Решив равенство (74′) относительно t, находим

$$t_{\varphi_{AOB}}=\frac{\operatorname{arth}\sqrt{1-e^{2\varphi_{AOB}\theta}}}{\sqrt{\theta N}}. \qquad (75)$$

Если найденное по формуле (75) время подставить в формулу (73′), то можно вычислить угловую скорость, которой будет обладать судно, подойдя ко второму пределу рыскливости, т. е. достигнув положения B.

Два последних этапа полного периода рыскливости будут вновь происходить в соответствии с закономерностями, выраженными формулами (68), (69) и (73′), (74′), но значения начальной угловой скорости и суммарного вращающего момента изменятся: ω_0 будет равно угловой скорости, которой обладает судно в положении B, а суммарный вращающий момент будет равен $Yb\pm Y_0a—nl$. Как видим, если в первом случае величина рулевого момента прибавлялась к суммарному моменту сил A и R (при наличии угла дрейфа), то во второй половине полного периода рыскания величина рулевого момента будет вычитаться из величины суммарного момента сил A и R. Эта причина и приведет к асимметрии рыскания.

Рассматривая формулу (73′), мы видим, что в нее входит не обычный, а гиперболический тангенс. Эта функция, как известно, при возрастании аргумента, в данном случае времени t, стремится к своему пределу — единице. Следовательно, теоретически угловая скорость ω не возрастает бесконечно, а стремится к некоторому пределу, зависящему от величин N и θ, и достигнет его при $t=\infty$. Но гиперболический тангенс вначале очень быстро приближается к своему пределу. При аргументе, равном 1,5, гиперболический тангенс уже равен 0,9, а при аргументе, равном 2, он практически достигает своего предела — единицы. Таким образом оказывается, что при вращении судна ω достигнет своего предела в самом начале движения при развороте на незначительное число градусов.

Приведенные выше формулы дают возможность вычислить амплитуду рыскания при известных заданных пределах B и D, полный период рыскания и угловую скорость при рыскании для любого момента времени.

Если формулы (68), (69) были справедливы для $\omega_0=0$, то формулы (73′), (74′) справедливы для случаев вращения, когда начальная угловая скорость меньше предельной. Предельную же уг-

ловую скорость для данных условий легко получить из формулы (73′), если положить $\operatorname{th} t\sqrt{\theta N}=1$.
Тогда

$$\omega_{пред}=\sqrt{\frac{N}{\theta}}. \tag{76}$$

Прежде чем перейти к определению периода и амплитуды рыскания судна, исследуем уравнения (68), (73) и выясним, как меняется скорость вращения судна и от каких величин она зависит. Для этого перепишем эти уравнения, подставив вместо θ и N их значения:

$$N=\frac{Yb\pm Y_0a\pm nl}{I_z}, \qquad \theta=\frac{P}{I_z}=\frac{kL_0^3S_{0(90^\circ)}}{I_z}.$$

Поскольку в данном случае направление вращения нас не интересует, используем полученное уравнение и для правого и для левого вращений, запомним только, что в некоторых случаях N определяется суммой $(Yb \pm Y_0a) + nl$, a в некоторых — разностью этих величин.
Итак,

$$\omega_1=\pm\sqrt{\frac{Yb \pm Y_0a \pm nl}{k\,L_0^3S_{0(90^\circ)}}}\operatorname{tg}\left[\operatorname{arc\,tg}\omega_0\sqrt{\frac{k\,L_0^3S_{0(90^\circ)}}{Yb \pm Y_0\,a \pm n\,l}}-t\,\frac{\sqrt{(Y\,b \pm Y_0\,a\pm nl)k\,L_0^3S_{0(90^\circ)}}}{I_z}\right], \tag{77}$$

$$\omega_2=\pm\sqrt{\frac{Yb \pm Y_0a \pm n\,l}{k\,L_0^3S_{0(90^\circ)}}}\operatorname{th}\left[\operatorname{ar\,th}\sqrt{\frac{k\,L_0^3S_{0(90^\circ)}}{Yb \pm Y_0\,a \pm n\,l}}+t\,\frac{\sqrt{(Y\,b \pm Y_0\,a \pm n\,l)k\,L_0^3S_{0(90^\circ)}}}{I_z}\right]. \tag{78}$$

Известно, что время, необходимое для прекращения вращения, определяемое из формулы (71), равняется

$$t=\frac{\operatorname{arc\,tg}\sqrt{\dfrac{k\,L_0^3S_{0(90^\circ)}}{Yb \pm Y_0a \pm nl}}}{\sqrt{(Yb \pm Y_0a \pm nl)\,kL_0^3S_{0(90^\circ)}}}\,I_z, \tag{79}$$

откуда следует, что вращение судна прекратится тем быстрее, чем больше будет суммарный вращающий момент, направленный в сторону, противоположную вращению, т. е. при вращении на ветер, и чем больше будут длина судна, площадь подводной части

диаметральной плоскости и коэффициент сопротивления вращению κ. Увеличение момента инерции, т. е. увеличение тоннажа судна, будет приводить к увеличению времени, необходимого для прекращения вращения. Зависимость от длины судна не будет чрезмерной, так как длина определяет и момент инерции и момент сопротивления, а поскольку увеличение одного из них приводит к увеличению t, а увеличение другого — к уменьшению, то суммарный эффект влияния L_0 на t будет незначительным.

Ускоренное вращение проще исследовать для случая, когда $\omega_0=0$. При рыскании этот случай всегда наступает после прекращения разворота.

При

$$\omega_0=0$$

$$\omega_2 = \pm\sqrt{\frac{Yb \pm Y_0 a \pm nl}{k L_0^3 S_{0(90^0)}}}\ \text{th}\ \frac{t\sqrt{(Yb \pm Y_0 a \pm nl)kL_0^3 S_{0(90^0)}}}{I_z}. \qquad (80)$$

Так как гиперболический тангенс при увеличении аргумента асимптотически стремится к единице, то и скорость вращения по формуле (80) при $t=\infty$ достигнет своего предельного значения, равного

$$\omega_{2пред} = \pm\sqrt{\frac{Yb \pm Y_0 a \pm nl}{k L_0^3 S_{0(90^0)}}}. \qquad (81)$$

Предельная скорость $\omega_{2\,пред}$, как это видно из формулы (61), увеличивается с увеличением суммарного момента $Yb \pm Y_0 a \pm nl$ зависящего от аэро- и гидродинамических характеристик корпуса судна и от характеристики работы руля. Эта скорость будет тем меньше, чем больше длина судна, площадь подводной части диаметральной плоскости и коэффициент κ, характеризующие момент сопротивления вращению судна.

Помня особенности изменения гиперболического тангенса и положив в формуле (80)

$$\frac{t\sqrt{(Yb \pm Y_0 a \pm nl)kL_0^3 S_{0(90^0)}}}{I_z} = 2,$$

найдем время, необходимое для достижения практически установившейся скорости вращения:

$$t = \frac{2I_z}{\sqrt{(Yb \pm Y_0 a \pm nl)kL_0^3 S_{0(90^0)}}}. \qquad (82)$$

Это время характеризует среднюю величину скорости ω_{2cp} в неустановившийся период вращения. Чем больше будет t, тем меньше будет среднее значение угловой скорости.

Очевидно, что время t будет большим, а среднее значение угловой скорости меньшим при увеличении момента инерции. Зависимость между величиной угловой скорости и вращающим моментом, естественно, будет прямо пропорциональной. Скорость вращения в неустановившийся период лишь незначительно зависит от длины судна, так как радиус инерции, зависящий от длины его, входит в выражение момента инерции в квадрате.

Рассмотрим еще одну причину, влияющую на скорость вращения судна и, следовательно, на характер рыскания.

Развернутое выражение для суммарного вращающего момента, действующего на судно, как известно, имеет такой вид:

$$N' = Y b \pm Y_0 a \pm nl. \qquad (83$$

При определенных соотношениях размеров судна с размерами волны судно может совершать значительные вертикальные перемещения. Тогда надводная часть его будет подвергаться в зависимости от положения на волне действию неодинакового по скорости потока воздуха. Действительно, как показали исследования, скорость ветра над гребнем волны больше скорости ветра над ложбиной.

Отсюда следует, что величина

$$N'_г = Y_г b \pm Y_0 a \pm nl, \qquad (84)$$

соответствующая гребню волны, будет меньше величины

$$N'_л = Y_л b \pm Y_0 a \pm nl, \qquad (85)$$

соответствующей условиям ветрового потока над ложбиной. Поэтому и скорость вращения судна в этих случаях будет неодинаковой, т. е.

$$\omega_{л\,ср} < \omega_{г\,ср},$$

Такой характер поведения судна при волнении — стремительное увеличение скорости рыскливости на гребне волны — отмечался многочисленными наблюдениями, но его склонны были приписывать изменению режима работы руля при подъеме на волну, сопровождающемуся иногда оголением руля.

Определим теперь период и амплитуду рыскания. Для этого уясним себе прежде, из каких этапов вращения будет складываться этот период. Как уже отмечалось, период рыскания состоит из четырех этапов: ускоренного движения [например, влево, из положения A (см. рис. 128) в положение B] при начальной скорости ω_0 в положении A, равной нулю; замедленного вращения из положения B в положение C при начальной угловой скорости, равной ω_{0_2}; вновь ускоренного вращения из положения C в положение D при начальной скорости ω_{0_3} в точке C, равной нулю, и, наконец, опять замедленного вращения из положения D в поло-

жение A при начальной скорости вращения ω_0. Положения B и D соответствуют заданным допускаемым пределам рыскания и характеризуют величину предполагаемой амплитуды. В момент достижения судном этих положений производится перекладка руля с борта на борт.

На рис. 128 положение A' указано несовпадающим с положением A. В каких случаях такое расхождение наблюдается и что оно означает? Оказывается, величина расхождения положений A и A' зависит от начального положения A и характеризует установившийся или неустановившийся режим рыскливости.

Будем пока считать, что ветер отсутствует и вращение судна происходит вследствие перекладки руля (при движении) с борта на борт на одинаковое число градусов.

В положение A, от которого будем вести отсчеты, судно могло попасть при различных обстоятельствах. Скорость его вращения в этом положении могла оказаться равной нулю после замедленного вращения слева направо или справа налево, происходившего вследствие каких-то причин, наконец, судно могло находиться в этом положении в состоянии покоя.

Для удобства рассуждений сделаем следующее обозначение углов:

$\varphi_{пред}$ — допускаемый угол рыскания;

$2\varphi_{пред}$ — допускаемая амплитуда рыскания;

$\varphi_{\omega\ макс}$ — угол разворота, при котором данное судно при данных действующих моментах достигает установившейся скорости вращения;

α — угол разворота, при котором некоторая начальная угловая скорость вращения данного судна затухает до нуля под действием определенных моментов;

φ_0 — начальное отклонение от заданного курса, равное $\eta - \varphi_{пред}$;

η — угол между направлением диаметральной плоскости судна в начальном положении A и в положении B при перекладке руля;

φ_0' — начальное отклонение, считая от допускаемого предела рыскливости.

Наибольший интерес представляют шесть случаев рыскания, которые последовательно разберем для одного и того же судна:

а) угол начального отклонения $\varphi_0 = \alpha + \varphi_{пред}$, при $2\varphi_{пред} \geqslant \varphi_{\omega\ макс}$.

Повернувшись на угол η из положения A в положение B, судно будет иметь установившуюся скорость вращения, которая уменьшается до нуля после перекладки руля в положение C после поворота на угол α. Так как $\alpha + \varphi_{пред} = 0$, то начальные условия для следующего этапа рыскания будут теми же самыми по абсолютной величине. Следовательно, судно, вращаясь вправо, вновь придет в положение A, когда скорость вращения опять станет равной нулю после очередной перекладки руля в положение D. Повторные повороты вправо и влево не внесут изменений в картину

рыскания, следовательно, она будет при таких условиях симметричной и установившейся (рис. 131, *а*);

б) угол начального отклонения $\varphi_0 > \alpha + \varphi_{пред}$ при $2\varphi_{пред} \geqslant \varphi_{\omega\, макс}$.

Достигнув в положении B максимальной скорости вращения, судно отклонится влево от K, гася энергию вращения, на угол $\alpha + \varphi_{пред} < \varphi_0$. Так как в этом положении условия совпадают с условиями первого случая вращения, то рыскание с этого момента будет также симметричным и установившимся, причем правые крайние положения A_1 никогда не будут достигать положения A (рис. 131, *б*);

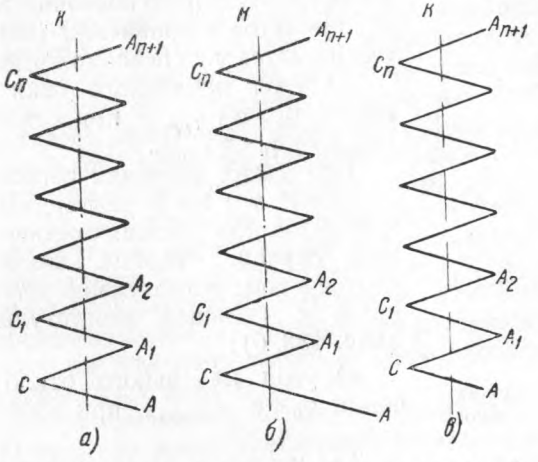


Рис. 131. Развертка незатухающих колебаний диаметральной плоскости судна при рыскании без ветра

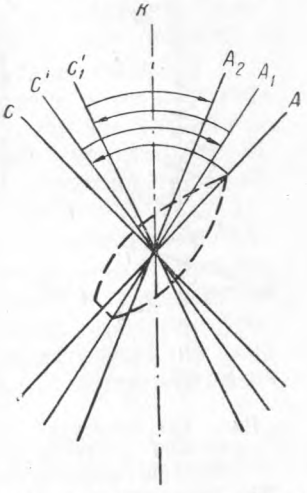


Рис. 132. Различные фазы затухающего рыскания без ветра

в) угол начального отклонения $\varphi_0 < \alpha + \varphi_{пред}$ при $2\varphi_{пред} \geqslant \varphi_{\omega\, макс}$.

В этом случае, начиная с левого крайнего положения, условия также совпадают с условиями первого случая, и рыскание приобретает установившийся характер, при этом отклонения вправо будут больше начального отклонения (рис. 131, *в*);

г) угол начального отклонения $\varphi_0 = \alpha + \varphi_{пред}$ при $\gamma_1 = \varphi_{пред} + \varphi_0 < \varphi_{\omega\, макс}$.

При таких условиях движения в положении B судно достигнет скорости $\omega < \omega_{макс}$ и поэтому в крайнем левом положении отклонится от курса K на угол $\alpha_1 + \varphi_{пред}$, меньший, чем угол $\alpha + \varphi_{пред}$ или начальный угол φ_0. Вращаясь вслед за этим вправо в положении D, судно будет иметь скорость $\omega_2 < \omega$, так как время, в течение которого нарастает скорость, будет меньшим. Гашение ее до нуля будет сопровождаться поворотом на угол $\alpha_2 < \alpha_1$. Следовательно, при угловой скорости вращения, равной нулю, после правого поворота положение A_1 не совпадет с положением A (рис. 132). При повторении вращений вправо и влево скорость в точках B и D становит-

ся все меньшей и меньшей, а фактическая амплитуда рыскания уменьшается и стремится к амплитуде допустимой (рис. 133, *а*).

Обычно на практике, когда в положениях *B* и *D* судно прекращает вращение, работа рулем прекращается до следующего возмущения, которое выведет его за пределы допущенного рыскания. Но если бы продолжать перекладку руля, то рыскание стало бы затухать и дальше. Предел такого затухающего рыскания определяется отношением времени перекладки руля к уменьшающемуся периоду рыскания. Дело в том, что при увеличении этого отношения допущение о постоянстве N', принятое в уравнении (68), оказывается уже невозможным;

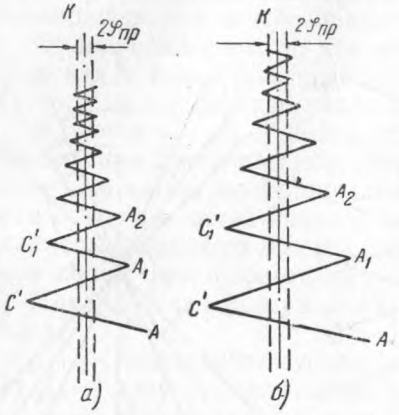


Рис. 133. Развертка затухающих колебаний диаметральной плоскости при рыскании без ветра

д) угол начального отклонения $\varphi_0 > \alpha + \varphi_{пред}$ при $\eta = \varphi_{пред} + \varphi_0 < \varphi_{\omega\,макс}$.

При таких условиях рыскание имеет тот же характер, какой имело при условиях четвертого случая. Разница заключается в том, что затухание начнется с большей амплитуды (рис. 133, *б*);

е) угол начального отклонения $\varphi_0 < \alpha + \varphi_{пред}$ при $\eta = \varphi_{пред} + \varphi_0 < \varphi_{\omega\,макс}$.

Так же как и в двух предыдущих случаях, рыскливость при этих условиях будет затухать. Можно было бы рассмотреть случаи рыскания при других соотношениях углов положений судна относительно заданного курса, но в этом нет особой нужды, так как они приводятся к двум рассмотренным группам случаев рыскания — к случаям затухающего рыскания и случаям рыскания с амплитудой, возрастающей до некоторого предела.

Проведенный анализ разных случаев рыскания при отсутствии ветра позволяет точнее определить характеристики рыскания: период и амплитуду, которые понадобятся во всех дальнейших исследованиях рыскания и позволят сделать ряд практических выводов.

Периодом рыскания условимся называть время, необходимое для перемещения судна во вращательном движении из крайнего правого положения в крайнее левое и из этого положения в правое или, наоборот, начиная с левого положения. Крайними положениями будем называть такие, в которых угловая скорость вращения равна нулю. За начало отсчета рыскания удобнее взять не положение судна, когда его диаметральная плоскость совпадает с заданным курсом, а одно из крайних положений. Такой выбор объясняется тем, что мы связали представление о периоде с ходом изменения величины угловой скорости. Скорость же при положе-

нии судна, когда оно лежит на курсе,— величина меняющаяся, а в момент начала рыскания вообще неопределенная.

Анализ рыскания показал, что оно может быть либо затухающим, либо установившимся. Последнему предшествует период неустановившегося рыскания с нарастанием или убыванием амплитуды до установившегося предела.

При затухающем рыскании заметно меняется только амплитуда, изменение же величины периода незначительно, так как уменьшение амплитуды сопровождается уменьшением угловой скорости рыскания.

Рассмотрение второго и третьего случаев рыскания показывает, что рыскание очень быстро стремится к своему пределу и уже со второго полупериода становится установившимся.

Предельный период рыскания судна зависит от угла поворота пера руля, но для данного судна при одной и той же величине i является величиной постоянной. Каждое судно характеризуется, кроме того, предельным минимальным периодом, соответствующим максимальному углу поворота пера руля.

Следует отметить любопытную особенность рыскания: изменение периода, происходящее в зависимости от изменений вращающего момента, сопровождается лишь очень незначительными изменениями величины амплитуды. Это объясняется тем, что угол вращения судна α остается при различных i практически постоянным, так как при изменении i соответственно меняется и угловая скорость в точках B и D.

Кроме поворота пера руля, как это видно из формул (74), (75), период при установившемся рыскании зависит от гидродинамической характеристики подводной части, влияющей на режим работы руля и величину коэффициента k, а также от длины судна и площади подводной части диаметральной плоскости. При этом период увеличивается с увеличением длины и площади.

Если величина перекладки руля незначительно сказывается на величине амплитуды, то влияние на величину ее длины судна L_0, площади $S_{0(90°)}$ и коэффициента сопротивления k оказывается значительным. Так как при одном и том же i скорость вращения судна увеличивается с уменьшением $kL_0^3 S_{0(90°)}$, то следовательно, увеличивается и угол α, т. е. увеличивается и амплитуда. Судно с большим значением $kL_0^3 S_{0(90°)}$ имеет меньшую амплитуду установившегося рыскания. Таким образом, мы приходим к выводу, что суда малых размеров обладают малым периодом рыскания и большой амплитудой, и, наоборот, рыскание больших судов характеризуется малой амплитудой и большим периодом. Понятие малое и большое судно в данном случае относится не только к тоннажу, но и к длине его, хотя эти две величины связаны между собой. Дело в том, что период и амплитуда установившегося рыскания, которое мы сейчас рассматриваем, определяется не установившейся скоростью вращения, независящей от момента инерции судна, а средней скоростью вращения, так как скорость в те-

чение одного периода меняется. Эта же величина, как известно, связана с величиной момента инерции.

Величина вращающего момента, гидродинамические характеристики подводной части судна, его размеры и момент сопротивления определяют характер и неустановившегося рыскания. С увеличением водоизмещения судна и его длины скорость изменения рыскания уменьшается, а с увеличением nl, k, $S_{0(90°)}$—увеличивается.

Разница между заданной амплитудой рыскания и амплитудой действительной—обозначим ее через $2\Delta\varphi_{пред}$—у различных судов различна и определяется по формуле (68), в которой начальное значение угловой скорости вращения равняется ее максимальной установившейся величине. Очевидно, что $2\Delta\varphi_{пред}$ зависит и от предельной скорости и от момента инерции судна. С увеличением момента инерции судна эта величина также увеличивается.

Теперь необходимо еще несколько слов сказать относительно влияния волнения на рыскание судна. Рыскание будет зависеть от волнения и вследствие того, что при волнении появляется дополнительное переменное давление на корпус судна. При апериодическом движении, каким является разворот судна «на стопе», давление волны на корпус и изменение вращающего ветрового момента вызовут некоторые малые колебания диаметральной плоскости судна, которые наложатся на постоянную скорость разворота. То же самое будет наблюдаться и при рыскании судна, когда период рыскания будет значительно больше периода волны. В тех же случаях, когда период изменения давления волны на корпус судна и период изменения величины ветрового момента, происходящего вследствие изменения ветрового режима над гребнем и над ложбиной волны, будут близкими к периоду рыскания, характер рыскания судна может измениться, а при определенных соотношениях этих периодов может возникнуть и резонанс рыскания. При этом следует иметь в виду, что если, как уже говорилось выше, период рыскания зависит от характеристик судна, угла перекладки руля и от заданной амплитуды рыскания, то период волнового давления на борт судна и изменения ветрового вращающего момента зависят от периода волны, ее длины, курсового угла и скорости движения судна. Все это вместе взятое позволяет сделать весьма важные выводы:

а) при принятом способе управления судном рыскание будет затухающим в тех случаях, когда заданная допускаемая амплитуда рыскания, характеризующаяся углом $2\varphi_{пред}$, будет меньше угла поворота судна $\varphi_{\omega\ макс}$, необходимого для того, чтобы угловая скорость стала установившейся.

Если угол $2\varphi_{пред} > \varphi_{\omega\ макс}$, амплитуда рыскания будет увеличиваться и стремиться к некоторому пределу.

Отсюда следует очень важный практический вывод.

Предел рыскания судна всегда надо задавать таким, чтобы соблюдалось неравенство:

$$2\varphi_{пред} < \varphi_{\omega\ макс}. \qquad (86)$$

Тогда рыскание будет затухающим и чрезмерные отклонения, вызванные внезапным возмущением, будут все время гаситься (рис. 134, *а*).

Если неравенство (86) не соблюдать, рыскание будет стремиться к пределу; к нему же стремятся, увеличиваясь или уменьшаясь по амплитуде, отклонения, вызванные внезапными возмущениями (рис. 134, *б*).

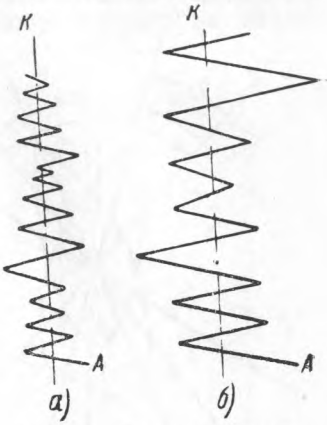


Рис. 134. Развертка колебаний диаметральной плоскости при затухающем и незатухающем рыскании с возобновляющимися возмущениями

Для того чтобы сделать правильный выбор величины $\varphi_{пред}$, необходимо знать для каждого судна $\varphi_{\omega\ макс}$ и его зависимость от угла поворота руля. У судов с очень малым $\varphi_{\omega\ макс}$ соблюсти неравенство (86) может оказаться практически невозможным. К таким относятся суда малого водоизмещения и малой длины с большой площадью руля. Момент инерции таких судов мал, а рулевой момент велик, и они отличаются большой рыскливостью, так как случай затухающего рыскания для них практически невозможен;

б) каждое судно обладает определенным установившимся периодом и определенной установившейся амплитудой рыскания. Установившийся период рыскания зависит от гидро- и аэродинамических характеристик судна, угла перекладки руля и заданной амплитуды рыскания. Установившийся период рыскания имеет минимальное значение (для заданного $\varphi_{пред}$) при максимальном угле перекладки руля.

Фактическая амплитуда рыскания зависит от заданной амплитуды, но не превышает ее больше, чем на 2α. Минимальное отклонение фактической амплитуды рыскания от допустимой наблюдается при максимальном значении угла перекладки руля, когда α оказывается минимальным.

Эти выводы справедливы для первой группы случаев рыскания, когда оно стремится к пределу;

в) декремент затухания рыскания определяется моментом инерции судна I_z, моментом сопротивления $\mathfrak{M}$ и углом поворота пера руля.

Рассмотрим теперь во всех деталях рыскание, когда на судно действует ветер и оно дрейфует. За начало отсчета опять примем одно из крайних положений, в котором угловая скорость вращения равна нулю. Этот выбор оказывается тем более удобным, что при движении с дрейфом направление истинного движения не совпадает с направлением диаметральной плоскости и с заданным курсом судна.

Различие в условиях, определяющих рыскание без ветра и при ветре, заключается в том, что при ветре суммарный вращающий момент при повороте в различные стороны неодинаков как по знаку, так и по абсолютной величине, в то время как при рыскании без ветра вращающий момент отличался лишь по знаку. Различие в величине моментов объясняется не только тем, что в одном случае рулевой и ветровой моменты складываются, а в другом вычитаются, но и тем, что при ветре, а следовательно, и дрейфе руль, переложенный на одинаковое число градусов на левый и правый борт, создает моменты, различные по абсолютной величине вследствие возникающего несовпадения нейтрального положения пера руля с плоскостью диаметрали.

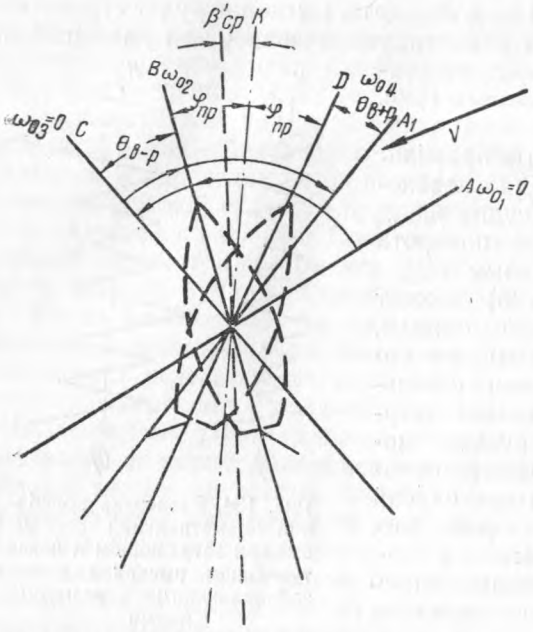


Рис. 135. Различные фазы рыскания судна при ветре

Разберем основные случаи рыскания, наблюдающиеся при действии на судно ветра. Для определенности предположим, что руль при вращении вправо и влево перекладывается на одинаковое число градусов. Момент перекладки соответствует моменту прохождения судном положений B и D (рис. 135). Если судно при заданном направлении ветра и вызванном им дрейфе уваливает по ветру, то суммарный момент при движении в сторону действия ветра равен $Yb+Y_0a+nl$ и будет больше суммарного вращающего момента при вращении на ветер, равного $Yb+Y_0a—nl$. Условимся обозначать через $\varphi_{\omega\ в+р\ макс}$ угол разворота, необходимый для достижения предельной величины угловой скорости вращения при действии на судно суммы моментов $N_1=Yb+Y_0a+nl$, а через $\varphi_{\omega\ в-р\ макс}$ — тот же угол при действии на судно момента, равного $N_2'=Yb+Y_0a-nl$. $\alpha_{в+р}$ пусть обозначает угол разворота, в течение которого гасится до нуля предельная угловая скорость, вызванная моментом N_1', а $\alpha_{в-р}$ — угол разворота, необходимый для гашения

скорости, вызванной моментом N_2'. Из формулы (71) видно, что $\alpha_{в+р}$ всегда будет меньше $\alpha_{в-р}$.

Рассмотрим первый случай, когда $2\varphi_{пред} \geqslant \varphi_{\omega\,макс}$ и $2\varphi_{пред} \geqslant \varphi_{\omega\,макс}$.

Тогда из любого начального положения A судно под действием момента N_1 дойдет до положения B, приобретя при этом максимальную угловую скорость вращения $\omega_{макс}$. В этом положении руль будет переложен на левый борт и суммарный момент станет равным N_2'. Под действием этого момента скорость $\omega_{макс}$ начнет уменьшаться и станет равной нулю, когда судно отклонится от положения B на угол $\alpha_{в+р}$. Согласно принятому условию, при начавшемся после этого вращении вправо, к положению D судно подойдет, вращаясь с предельной скоростью $\omega_{макс}$. Новый момент вращения, созданный в этом положении, будет опять равен N_1', и скорость $\omega_{макс}$ будет погашена в течение времени, за которое судно отклонится от положения D на угол $\alpha_{в+р}$. Начиная с этого момента, т. е. ровно через один период, при дальнейшем вращении влево и вправо значения скоростей в точках B и D каждый раз повторяются, следовательно, рыскание становится установившимся. Но так как $\alpha_{в+р} < \alpha_{в-р}$, то оно может быть асимметричным как по углу, так и по времени. Большее отклонение будет происходить в сторону действия ветрового момента.

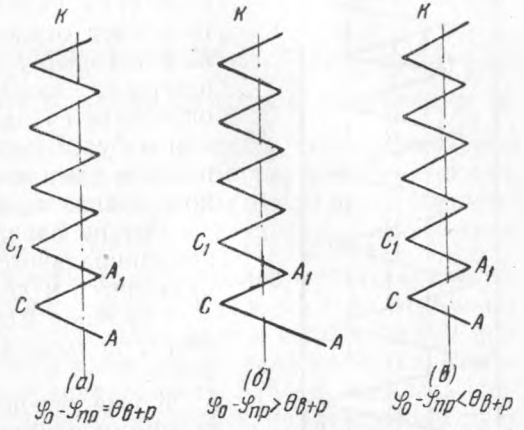


Рис. 136. Развертка колебаний диаметральной плоскости при незатухающем рыскании (при ветре)

Если начальный угол отклонения $\varphi_0 - \varphi_{пред} = \alpha_{в+р}$, то рыскание будет установившимся с первого периода (рис. 136, *а*), если $\varphi_0 - \varphi_{пред} <$ или $> \alpha_{в+р}$, то, как уже говорилось, рыскание будет установившимся, начиная со второго периода, а дальнейшие крайние отклонения вправо будут либо больше, либо меньше φ_0 (рис. 136, *б, в*).

Второй случай соответствует условию $2\varphi_{пред} + \alpha_{в-р} \leqslant \varphi_{\omega\,макс}$; $2\varphi_{пред} + \alpha_{в+р} < \varphi_{\omega\,макс}$ или $2\varphi_{пред} - \alpha_{в+р} < \varphi_{\omega\,макс}$; $2\varphi_{пред} + \alpha_{в-р} = \varphi_{\omega\,макс}$.

Вращаясь влево из любого начального положения A (рис. 137) в положение B, судно обладает либо максимальной скоростью вращения $\omega_{макс}$, либо скоростью, меньшей, чем эта величина, и

поэтому после перекладки руля максимальная величина отклонения от положения B может быть лишь равной или меньшей угла $\alpha_{в-р}$. Так как по условию $\alpha_{в-р} + 2\varphi_{пред} < \varphi_{\omega_{в-р\ макс}}$, то в дальнейшем рыскание начнет затухать. Затухание будет асимметричным, а среднее направление, около которого происходят колебания диаметральной плоскости судна, будет отклонено от заданного курса на некоторый угол $\beta'_{ср}$ в сторону действия ветрового момента. Предел затухания определяется заданным пределом рыскания и будет несколько превышать его. В пределе рыскание будет установившимся, но сохранит асимметрию.

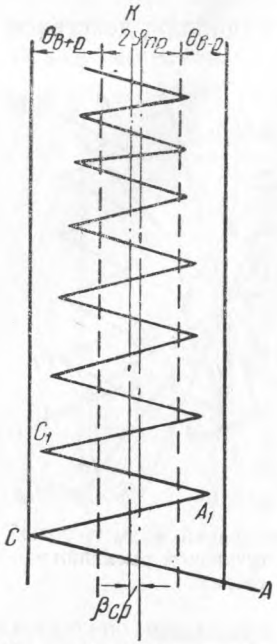


Рис. 137. Развертка колебаний диаметральной плоскости при затухающем рыскании (при ветре)

Другие случаи рыскания не имеют принципиального интереса, так как они приводятся к двум рассмотренным.

Обобщая сказанное о рыскании при ветре, приходим к следующим заключениям.

К уже установленной зависимости рыскания от качеств судна прибавляется зависимость от ветрового момента, а момент, создаваемый поворотом пера руля, оказывается зависящим не только от угла поворота i, но и от угла дрейфа судна. В свою очередь эти обе новые зависимости определяются аэро- и гидродинамическими характеристиками судна, а также скоростью и курсовым углом кажущегося ветра.

Ветер и дрейф создадут асимметричное рыскание, вызывая бóльшие отклонения в сторону действия ветрового момента. Если судно приводится к ветру, то и отклонения от курса при рыскании будут в сторону действия ветра бóльшими и, наоборот, меньшими в случае, когда судно уваливает.

Амплитуда и период рыскания, кроме зависимости от заданного угла $2\varphi_{пред}$, гидродинамических характеристик судна и угла перекладки руля, зависят от величины дополнительного момента, созданного ветром и дрейфом. Амплитуда возрастает с возрастанием дополнительного момента, а пределом расхождения величины заданной амплитуды с амплитудой действительной будет сумма углов $2\varphi_{пред} + \alpha_{в+р} + \alpha_{в-р}$. Период рыскания при этом меняется незначительно, так как наряду с увеличением амплитуды увеличится средняя скорость вращения, т. е. рыскание при ветре будет более стремительным.

Асимметрия рыскания возрастает, если угол $2\varphi_{пред} + \alpha_{в-р} < \varphi_{\omega_{в-р\ макс}}$, т. е. когда при движении навстречу ветру судно,

достигая положения D, не приобретает максимальной угловой скорости вращения. Чтобы избежать чрезмерной асимметрии, надо знать для каждого судна

$$\omega_{\substack{макс\\ в+р}};\quad \omega_{\substack{макс\\ в-р}};\quad \varphi_{\omega\,\substack{макс\\ в+р}};\quad \varphi_{\omega\,\substack{макс\\ в-р}};\quad \alpha_{в+р};\quad \alpha_{в-р} \tag{87}$$

и выбирать величину допускаемой амплитуды рыскания, сообразуясь с этими величинами.

В зависимости от соотношения углов $2\varphi_{пред}$, $\alpha_{в+р}$, $\alpha_{в-р}$, $\varphi_{\omega\,\substack{макс\\ в+р}}$, $\varphi_{\omega\,\substack{макс\\ в-р}}$ рыскание может быть установившимся или затухающим до некоторой малой амплитуды. Выбрать условия, соответствующие наиболее выгодному случаю рыскания — затухающему,— можно, зная значения углов (87) и добиваясь, чтобы имели место неравенства $2\varphi_{пред} + \alpha_{в-р} < \varphi_{\omega\,\substack{макс\\ в-р}}$ и $2\varphi_{пред} + \alpha_{в-р} < \varphi_{\omega\,\substack{макс\\ в-р}}$. Возникающее при ветре асимметричное рыскание — явление нежелательное, так как оно приводит к уходу судна с курса. С этим явлением можно бороться. Для этого перекладку руля в положениях B и D необходимо делать не на одинаковое число градусов, а так, чтобы момент N_1' равнялся по величине моменту N_2', или задавать различные $\varphi_{пред.\,пр}$ и $\varphi_{пред.\,лев}$. Такая возможность, конечно, существует не для любой скорости и курсового угла ветра и лимитируется качеством руля.

Теперь, воспользовавшись формулами (68), (69), (71), (73), (74), (75), дадим аналитическое выражение амплитуды и периода рыскания.

Так как для всего периода рыскания нельзя дать непрерывного решения и задачу приходится расчленять на четыре этапа, то и значение периода и амплитуды определяется суммой из четырех членов, характеризующих движение на каждом этапе. При этом результаты вычислений одного этапа будут начальными условиями этапа последующего.

Полный период рыскания складывается из вращений: от начального положения $A(\omega_0=0)$ до положения B (см. рис. 135) — первый этап; от положения B до положения C — второй этап; от положения C до положения D — третий этап и от положения D до положения A или A' — четвертый этап.

Обозначим искомый период рыскания через τ, а отклонение от заданного курса судна при рыскании через φ. Тогда

$$\tau = \frac{\operatorname{ar\,th}\sqrt{1-e^{2\theta\varphi_1}}}{\sqrt{\theta N_1}} + \frac{\operatorname{arc\,tg}\,\omega_{01}\sqrt{\dfrac{\theta}{N_2}}}{\sqrt{\theta N_2}} + \frac{\operatorname{ar\,th}\sqrt{1-e^{2\theta\varphi_2}}}{\sqrt{\theta N_2}} + \frac{\operatorname{arc\,tg}\,\omega_{02}\sqrt{\dfrac{\theta}{N_1}}}{\sqrt{\theta N_1}}, \tag{88}$$

где

$$N_1 = \frac{Y b + Y_0 a + nl}{I_z}; \qquad N_2 = \frac{Y b + Y_0 a - nl}{I_z},$$

$$\varphi_1 = \varphi_0 + \varphi_{пред}; \quad \varphi_2 = \alpha_{в-р} + 2\varphi_{пред}; \quad \omega_{01} = -\sqrt{\frac{N_1}{\theta}}; \quad \omega_{02} = \sqrt{\frac{N_2}{\theta}},$$

где в свою очередь $\alpha_{в-р} = \frac{1}{2\theta} \ln\left(1 + \omega_0 \frac{2\theta}{N_1}\right)$.

Для угла отклонения судна от заданного курса получаем такую формулу (см. рис. 135):

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{1}{2\theta} \ln\left(1 - \operatorname{th}^2 t_{0-1}\sqrt{\theta N_1}\right) -$$

$$- \frac{1}{2\theta} \ln \frac{1 + \omega_{01}^2 \frac{\theta}{N_2}}{1 + \operatorname{tg}^2\left(\operatorname{arc\,tg}\,\omega_{01}\sqrt{\frac{\theta}{N_2}} - t_{1-2}\sqrt{\theta N_2}\right)} -$$

$$- \frac{1}{2\theta} \ln\left(1 - \operatorname{th}^2 t_{2-3}\sqrt{\theta N_2}\right) +$$

$$+ \frac{1}{2\theta} \ln \frac{1 + \omega_{02}^2 \frac{\theta}{N_1}}{1 + \operatorname{tg}^2\left(\operatorname{arc\,tg}\,\omega_{02}\sqrt{\frac{\theta}{N_1}} - t_{3-4}\sqrt{\theta N_1}\right)}. \qquad (89)$$

В этой формуле приняты те же обозначения, что и в формуле (88). Индексы при t показывают, в течение какого промежутка времени надо пользоваться каждым членом формулы при вычислении отклонения судна от курса. После окончания вычислений по одному из членов формулы конечный результат становится начальным условием для последующих вычислений по очередному члену формулы (89).

Первым членом надо пользоваться от $t=0$ до $t_1 = \frac{\operatorname{ar\,th}\sqrt{1 - e^{2\theta\varphi_1}}}{\sqrt{\theta N_1}}$, вторым членом — при t, меняющемся от t_1 до $t_2 = t_1 + \frac{\operatorname{arc\,tg}\,\omega_{01}\sqrt{\frac{\theta}{N_2}}}{\sqrt{\theta N_2}}$, третьим членом — от t_2 до $t_3 = t_2 + \frac{\operatorname{ar\,th}\sqrt{1 - e^{2\theta\varphi_2}}}{\sqrt{\theta N_2}}$ и, наконец, четвертым членом формулы (89) — в течение времени от t_3 до $t_4 = t_3 + \frac{\operatorname{arc\,tg}\,\omega_{02}\sqrt{\frac{\theta}{N_1}}}{\sqrt{\theta N_1}}$.

В таком же виде можно написать и формулу для вычисления угловой скорости:

$$\omega = -\sqrt{\frac{N_1}{\theta}}\,\mathrm{th}\,t_{0-1}\sqrt{\theta N_1} - \sqrt{\frac{N_2}{\theta}}\,\mathrm{tg}\left(\mathrm{arc\,tg}\,\omega_{01}\sqrt{\frac{\theta}{N_2}} - t_{1-2}\sqrt{\theta N_2}\right) + \sqrt{\frac{N_2}{\theta}}\,\mathrm{th}\,t_{2-3}\sqrt{\theta N_2} + \sqrt{\frac{N_1}{\theta}}\,\mathrm{tg}\left(\mathrm{arc\,tg}\,\omega_{02}\sqrt{\frac{\theta}{N_1}} - t_{3-4}\sqrt{\theta N_1}\right) \tag{90}$$

Из рис. 130 и 135 видим, что особенностью колебаний диаметральной плоскости, возникающих при рыскании, является несовпадение максимумов скорости вращения, а стало быть и максимумов линейных скоростей различных точек судна при рыскании, с моментом прохождения диаметрали через нуль — заданный курс судна.

Максимумы скорости смещены вправо и влево от K и в большинстве случаев совпадают с положениями B и D. При симметричном рыскании оба максимума отличаются только по знаку и отстоят от K на одинаковом расстоянии. При асимметричном ветровом рыскании максимумы отличаются по абсолютной величине. Отстояние их от K будет также неодинаковым.

Из всего сказанного очевидно, что угловые ускорения будут максимальными сразу после изменения направления вращения, а также в первый момент после перекладки руля в положениях B и D.

§ 3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА УХОДА С КУРСА ВСЛЕДСТВИЕ АСИММЕТРИЧНОГО РЫСКАНИЯ

1. Проведенный в предыдущем разделе анализ случаев ветрового рыскания убеждает еще раз в том, что асимметричное рыскание неизбежно повлечет за собой постепенный уход судна с линии заданного курса.

Рассмотрим малый промежуток времени, в течение которого угол отклонения судна φ можно считать постоянным. Пусть будет постоянной для этого промежутка времени и скорость поступательного движения судна, определяемая по лагу.

Из рис. 138 видно, что уход судна с линии заданного курса за этот промежуток времени при угле отклонения, равном φ, будет определяться так:

$$\Delta y = u \sin\varphi\,\Delta t, \tag{91}$$

где:

u — скорость движения судна вдоль диаметрали (по лагу).

Так как в последующий промежуток времени φ изменится, то для определения Δy_2 в уравнении (91) вместо φ_1 следует взять новое значение φ_2. Суммарное отклонение Y определится суммой отклонений $\Delta Y_1+\Delta Y_2+\Delta Y_3+\cdots$

Сделаем теперь следующие построения. Отложим по оси x путь (рис. 139), пройденный судном по показаниям лага за время полного периода рыскания, а по оси y — углы отклонения φ, вычисленные для ряда промежутков ΔS (значения углов на рис. 139 взяты условно). По этим данным построим кривую изменения φ в зависимости от пройденного расстояния S [кривая $\varphi=f(S)$]. Если вычертить ординаты для середины каждого отрезка пути $\Delta S=u\Delta t$ и это значение φ считать постоянным для всего промежутка ΔS, провести линии, параллельные оси S, до пересечения с соседними ординатами или их продолжениями, то кривая $\varphi=f(S)$ изобразится приближенно в виде ломаной линии. Определим для каждого значения ΔS величину синуса соответствующего ему угла φ и построим на этом же чертеже кривую изменения $\sin\varphi=f'(S)$, изображенную приближенно также ломаной линией. Тогда, как это явствует из уравнения (91), площадь каждого прямоугольника, равная произведению $\Delta S_1 \sin\varphi$, характеризует в некотором масштабе величину ухода судна с курса за промежуток времени Δt_1, а площадь всех прямоугольников — величину ухода за время одного периода рыскания.

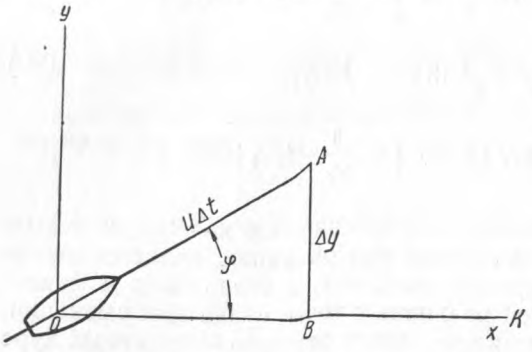


Рис. 138. Уход судна с курса вследствие рыскания

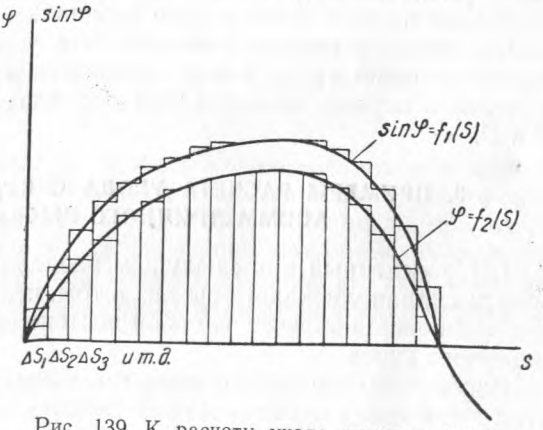


Рис. 139. К расчету ухода судна с курса вследствие зарыскивания

Если уменьшать промежутки времени Δt, то ломаные линии

будут все ближе и ближе совпадать с кривой $\varphi=f(S)$ и соответствующей ей кривой $\sin\varphi=f_1(S)$. Следовательно, для точного определения величины ухода судна с линии заданного курса необходимо определить планиметром площадь, ограниченную осью S и кривой $\sin\varphi=f_1(S)$, складывая площадь, находящуюся над осью S и под нею с разными знаками.

Для перевода значения найденной таким образом площади в величину ухода судна с линии заданного курса ее необходимо умножить на переводной множитель q, зависящий от масштаба S и φ:

$$Y_\tau = q\,(S_{пр} - S_{лев}), \tag{92}$$

где $S_{пр}$ и $S_{лев}$ — площади участков кривой $\sin\varphi=f_1(S)$, соответствующих углам отклонения судна от курса в правую и левую стороны.

Если асимметричное ветровое рыскание является установившимся, а скорость u постоянная, то смещение судна за m периодов рыскания будет равно $m\,Y_\tau$.

Поправку на уход судна с курса вследствие зарыскивания удобнее изображать не в линейном измерении, а в угловом. Угол отклонения прямой линии, на которую после завершения очередного периода рыскания попадает судно, от линии заданного курса зависит от величины периода рыскания скорости по лагу и выражается простой формулой (рис. 138)

$$\beta' = \text{arc}\sin\frac{Y_\tau}{u\tau}, \tag{93}$$

где $u\tau$ — путь, пройденный по лагу за время, равное одному периоду рыскания.

Для проверки наших выкладок и наглядной демонстрации влияния асимметрии ветрового рыскания на уход судна с линии заданного курса приведем пример расчета величин φ, τ и Y_τ.

Данные, характеризующие судно:

Водоизмещение	3000 *т*
Длина	60 *м*
Осадка	3 *м*
Средняя высота корпуса и надстроек над уровнем ватерлинии	10 *м*
Площадь руля	10 $м^2$

Данные о движении судна и ветре:

Курсовой угол кажущегося ветра	70°
Скорость ветра	10 *м/сек*
Угол дрейфа	5°
Скорость судна по лагу	4 *м/сек* (примерно 8 узлов)

Значения коэффициентов сопротивления и плеч сил A, R и силы, действующей на руль, относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести судна:

C_y — 1 (при курсовом угле ветра 70°, отнесенный к $S_{(90°}$,

C_{y_0} — 0,013 (при угле дрейфа 5°, отнесенный к $S_{0(90°)}$),

$C_{\substack{y_0 \\ руля}}$ — 0,6 (коэффициент сопротивления руля при повороте руля на 40°),

$в$ — 20 $м$,

$а$ — 25 $м$,

l — 30 $м$ (плечо силы, действующей на руль).

Допустим теперь, что угол перекладки руля в положениях B и D равен 40°, а допускаемый угол рыскания, характеризующий положения B и D, равен 4°($\varphi_{пред}$).

Определим прежде всего моменты N_1' и N_2', предположив, что ветер правого борта уваливает судно. Началом расчетов будем считать точку A, где судно находится при крайнем правом отклонении от курса и угловая скорость вращения равна нулю.

В данном конкретном случае суммарный вращающий момент при повороте по ветру будет равен

$$N_1' = Yb - Y_0 a - nl$$

и против ветра

$$N_2' = Yb - Y_0 a + nl.$$

Если считать

$$Y = C_{y(70°)} \rho/_2 S_{(90°)} V^2; \quad Y_0 = C_{y0(5°)} \rho_0/_2 S_{0(90°)} u^2;$$

$$n = C_{\substack{y0(40°) \\ руля}} \rho_0/_2 S_{руля} u^2$$

и подставить в эти выражения принятые значения входящих в них величин, то окажется

$$N_1' = 47\,900 - 76\,300 - 147\,000 = -175\,400 \ кгм,$$

$$N_2' = 47\,900 - 76\,300 + 147\,000 = +118\,600 \ кгм.$$

При этом за $S_{0(90°)}$ было принято произведение длины судна на осадку, а за $S_{(90°)}$ — произведение длины на среднюю высоту надстроек над ватерлинией: $\rho = 0{,}127$ $кг\,сек^2/м^4$; $\rho_0 = 102$ $кг\,сек^2/м^4$.

Определим теперь характер рыскания при заданных условиях. Для этого найдем углы $\varphi_{\substack{\omega\ макс \\ в+р}}$, $\varphi_{\substack{\omega\ макс \\ в-р}}$ и сопоставим их с углами $\varphi_{пред}+\alpha_{в+р}$; $\varphi_{пред}+\alpha_{в-р}$. Но для определения величин углов $\varphi_{\omega\ макс}$ и α необходимо знать величину момента инерции судна $I_z = mr^2$ и коэффициент, характеризующий момент сопротивления вращению $P = kL_0^3 S_{0(90°)}$.

Предположив для простоты расчета приведенную массу сосредоточенной на расстоянии r^2 от оси вращения, равном 15 *м*, получим значение момента инерции

$$I_z = \frac{3\,000\,000 \cdot 15^2}{9{,}81} = 0{,}69 \cdot 10^8 \text{ кг сек}^2/\text{м}.$$

В примерах для простоты будем считать, что в эту величину входит и момент инерции присоединенных масс, принятый нами постоянным. Допустив, что $k = m_{0вращ}\rho_0/2 = 25{,}5$, где $m_{0вращ} = 0{,}5$, найдем значение коэффициента P:

$$P = 25{,}5 \cdot 60^3 \cdot 60{,}3 = 9{,}72 \cdot 10^8.$$

Время, необходимое для того, чтобы скорость вращения установилась, определяется, как известно, по формуле (82).

В рассматриваемом конкретном случае при $N_1 = \frac{N_1'}{I_z}$ это время будет

$$t_1 = \frac{2I_z}{\sqrt{\theta N_1}} = \frac{2 \cdot 0{,}69 \cdot 10^8}{\sqrt{9{,}72 \cdot 10^8 \cdot 1754 \cdot 10^2}} = 10{,}5 \text{ сек},$$

а при $N_2 = \frac{N_2'}{I_z}$

$$t_2 = \frac{2I_z}{\sqrt{\theta N_2}} = \frac{2 \cdot 0{,}69 \cdot 10^8}{\sqrt{9{,}72 \cdot 10^8 \cdot 1186 \cdot 10^2}} = 12{,}4 \text{ сек}.$$

За время t_1 и t_2 судно развернется на некоторые углы, которые мы условились обозначать $\varphi_{\substack{\omega\,макс \\ в+р}}$, $\varphi_{\substack{\omega\,макс \\ в-п}}$.

Эти углы найдем по формуле (74), подставляя в нее значения t_1, t_2 и полагая $\omega_0 = 0$, $\varphi_0 = 0$;

$$\varphi_{\substack{\omega\,макс \\ в+р}} = \frac{1}{2\theta} \ln\left(1 - \text{th}^2 t_1 \sqrt{\theta N_1}\right) =$$

$$= \frac{3 \cdot 10^6}{2 \cdot 9{,}72 \cdot 10^8} \ln\left(1 - \text{th}^2\, 10{,}5\, \frac{\sqrt{9{,}72 \cdot 10^8 \cdot 1754 \cdot 10^2}}{0{,}69 \cdot 10^8}\right) = 0{,}096 \text{ радиан},$$

$$\varphi_{\substack{\omega\,макс \\ в+р}} = 5°{,}5.$$

Так как $t_2\sqrt{\theta N_2}$ по условию также равно 2, то очевидно $\varphi_{\substack{\omega\,макс \\ в+р}} = \varphi_{\substack{\omega\,макс \\ в-р}}$.

Для определения $\alpha_{в+р}$ и $\alpha_{в-р}$ по формуле (73) прежде надо подсчитать ω_{0_1}, ω_{0_2} и по формуле (71) t_{1-2} и t_{3-4}. Из формулы (73), положив гиперболический тангенс равным 1, получаем

$$\omega_{0_1} = -\sqrt{\frac{N_1}{\theta}} = \sqrt{\frac{1754 \cdot 10^2}{9{,}72 \cdot 10^8}} = -0{,}0134 \text{ радиан/сек},$$

$$\omega_{0_1} = 0{,}77 \text{ град/сек},$$

$$\omega_{0_2} = \sqrt{\frac{N_2}{\theta}} = \sqrt{\frac{1186 \cdot 10^2}{9{,}72 \cdot 10^8}} = 0{,}0114 \text{ радиан/сек},$$

$$\omega_{0_2} = 0{,}65 \text{ град/сек}.$$

t_{1-2}, t_{3-4}—время, в течение которого ω_{0_1}, ω_{0_2} уменьшается до нуля. Подсчитаем по формуле (71):

$$t_{1-2} = \frac{\operatorname{arc\,tg} \omega_{01} \sqrt{\frac{\theta}{N_2}}}{\sqrt{\theta N_2}} = \frac{\operatorname{arc\,tg} \sqrt{\frac{1754 \cdot 10^2}{1186 \cdot 10^2}}}{\frac{\sqrt{9{,}72 \cdot 10^8 \cdot 1186 \cdot 10^2}}{0{,}69 \cdot 10^8}} = 5{,}65 \text{ сек}.$$

$$t_{3-4} = \frac{\operatorname{arc\,tg} \omega_{02} \sqrt{\frac{\theta}{N_1}}}{\sqrt{\theta N_1}} = \frac{\operatorname{arc\,tg} \sqrt{\frac{1186 \cdot 10^2}{1754 \cdot 10^2}}}{\frac{\sqrt{9{,}72 \cdot 10^8 \cdot 1754 \cdot 10^2}}{0{,}69 \cdot 10^8}} = 3{,}62 \text{ сек}.$$

В формуле (69) при определении α по условию аргумент тангенса надо положить равным нулю. Тогда оказывается, что углы отклонения на этих этапах рыскания определяются по формулам

$$\alpha_{в+р} = \frac{1}{2\theta} \ln (1 + \omega_{0_2}^2 \theta) = \frac{0{,}69 \cdot 10^8}{2 \cdot 9{,}72 \cdot 10^8} \ln \left(1 + \frac{1186 \cdot 10^2 \cdot 9{,}72 \cdot 10^8}{9{,}72 \cdot 10^8 \cdot 1754 \cdot 10^2}\right) =$$

$$= 0{,}0185 \text{ радиан},$$

$$\alpha_{в+р} = 1^\circ{,}06,$$

$$\alpha_{в-р} = \frac{1}{2\theta} \ln (1 + \omega_{0_1}^2 \theta) = \frac{0{,}69 \cdot 10^8}{2 \cdot 9{,}72 \cdot 10^8} \ln \left(1 + \frac{1754 \cdot 10^2 \cdot 9{,}72 \cdot 10^8}{9{,}72 \cdot 10^8 \cdot 1186 \cdot 10^2}\right) =$$

$$= 0{,}0323 \text{ радиан},$$

$$\alpha_{в-р} = 1^\circ{,}85.$$

Сопоставляя величины $2\varphi_{пред} + \alpha_{в+р}$ с величиной угла $\varphi_{\omega\ макс}$, убеждаемся, что $2\varphi_{пред} = \alpha_{в+р} > \varphi_{\omega\ макс}$, следовательно, рыскание будет незатухающим и при $\varphi_0 = \alpha_{в+р} + \varphi_{пред}$ установившимся с первого периода и асимметричным.

Амплитуда рыскания при таких условиях будет равна сумме $2\varphi_{пред} + \alpha_{в+р} + \alpha_{в-р} = 8^\circ{,}0 + 1^\circ{,}05 + 1^\circ{,}85 = 10^\circ{,}91$.

Период рыскания вычисляется по формуле (88). Продолжительность этапов замедленного движения уже известна; продолжительность этапов ускоренного и установившегося движения находится по формуле

$$t = \frac{\operatorname{ar\,th}\sqrt{1-e^{-2\vartheta\varphi_{(1,2)}}}}{\sqrt{\vartheta N}},$$

где $\varphi_1 = \alpha_{в-р} + 2\varphi_{пред}$, $\varphi_2 = \alpha_{в+р} + 2\varphi_{пред}$, а N принимает значение N_1 или N_2, в зависимости от направления вращения:

$$t_{2-3} = \frac{\operatorname{ar\,th}\sqrt{1-e^{-2\vartheta(0{,}14+0{,}0323)}}}{\frac{\sqrt{9{,}72\cdot 10^8\cdot 1186\cdot 10^2}}{0{,}69\cdot 10^8}} = 19{,}8 \text{ сек},$$

$$t_{0-1} = \frac{\operatorname{ar\,th}\sqrt{1-e^{-2\vartheta(0{,}14+0{,}0185)}}}{\frac{\sqrt{9{,}72\cdot 10^8\cdot 1754\cdot 10^2}}{0{,}69\cdot 10^8}} = 13{,}7 \text{ сек}.$$

Тогда период рыскания τ будет равен сумме

$$\tau = t_{0-1} + t_{1-2} + t_{2-3} + t_{3-4} = 49{,}9 \text{ сек}.$$

Пользуясь этими же формулами, можно определить асимметрию рыскания во времени. Для этого φ надо положить равным $\alpha_{в+р} + \varphi_{пред} = 0{,}1019$ радиан, $\alpha_{в-р} + \varphi_{пред} = 0{,}088$ радиан, тогда $t'_{0-1} = 10{,}0$ сек, $t'_{2-3} = 13{,}6$ сек.

Теперь мы располагаем всеми данными для вычисления времени, в течение которого судно было отклонено вправо от курса и влево от курса. Обозначив часть периода, в течение которого судно было отклонено вправо через $\tau_{пр}$, а через $\tau_{лев}$ — время отклонения влево от курса, запишем

$$\tau_{пр} = t'_{0-1} + (t_{2-3} - t'_{2-3}) + t_{3-4} = 10{,}0 + 19{,}8 - 13{,}6 + 3{,}62 = 19{,}82 \text{ сек},$$

$$\tau_{лев} = (t_{0-1} - t'_{0-1}) + t_{1-2} + t'_{2-3} = 13{,}7 - 10{,}0 + 5{,}65 + 13{,}6 = 29{,}95 \text{ сек}.$$

Таким образом, асимметрия по времени равна 10″,13.

Посмотрим теперь, на какое расстояние в течение одного периода рыскания уйдет судно с линии заданного курса вследствие этой асимметрии рыскания.

Если графическое решение формулы (89) производить детально, следя за изменением угла φ, то вычисления оказываются довольно громоздкими. Чтобы не занимать много времени и места этими вычислениями и намереваясь показать приближенный результат движения с асимметричным по времени рысканием, по-

строим схематическую кривую изменения угла φ, воспользовавшись для этого уже вычисленными углами отклонения судна в моменты времени t_0; $t_1=t_0+t'_{0-1}$; $t_2=t_0+t_{0-1}$; $t_3=t_{0-1}+t_{1-2}$; $t_4=t_{0-1}+t_{1-2}+t'_{2-3}$; $t_5=t_{0-1}+t_{1-2}+t_{2-3}$; $t_6=t'_{0-1}+t_{1-2}+t_{2-3}+t_{3-4}$.

Будем для простоты считать, что угол φ изменяется от одного момента к другому линейно. Величины углов отклонения судна от заданного курса для этих моментов известны и равны:

$t_0+5{,}°06$; $t_4 0°{,}00$;
$t_1 0°{,}00$; $t_5+4°{,}00$;
$t_2-4°{,}00$; $t_6+5°{,}06$.
$t_3-5°{,}85$;

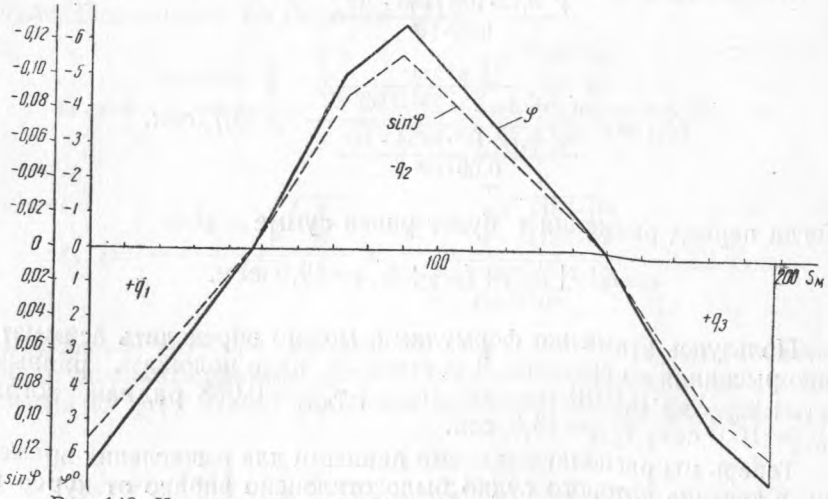


Рис. 140. К расчету ухода судна с курса вследствие асимметричного рыскания

Путь, пройденный судном за отрезки времени

$$t_1-t_0,\ t_2-t_1,\ t_3-t_2,\ t_4-t_3,\ t_5-t_4,\ t_6-t_5,$$

равен

$S_1=4\cdot 10{,}0=40{,}0$ *м*; $S_4=4\cdot 13{,}6=54{,}5$ *м*;
$S_2=4\cdot 3{,}7=14{,}8$ *м*; $S_5=4\cdot 6{,}2=24{,}8$ *м*;
$S_3=4\cdot 5{,}65=22{,}6$ *м*; $S_6=4\cdot 3{,}62=14{,}5$ *м*.

На основании этих значений φ и S построим кривую $\varphi=f(S)$ (рис. 140). На этом же рисунке (пунктирная ломаная линия) дано изменение $\sin\varphi$ в зависимости от пройденного пути. Теперь мы уже знаем, что площадь этой последней кривой, умноженная на некоторый постоянный коэффициент, зависящий от масштаба, в

котором откладываются S и $\sin\varphi$, представляет собой отклонение судна от курса за время одного периода рыскания. Отдельные участки площади будут характеризовать уход с курса при рыскании за соответствующие отрезки времени.

Определив площадь кривой $\sin\varphi$, состоящую из трех частей— q_1, q_2 и q_3, находим, что площадь части кривой с отрицательными ординатами больше площади частей кривой с положительными ординатами на 641 *мм*^{2}.

При выбранном масштабе для S и $\sin\varphi$ 1 *мм*^{2} соответствует

$$S\sin\varphi=1\cdot 0{,}002,$$

т. е. 0,002 *м* отхождения от курса.

Следовательно, в рассмотренном примере Y_τ будет отрицательным (влево от курса — в данном случае по ветру) и равным 1,28 *м* за один период рыскания.

Чтобы оценить этот уход с курса в угловом измерении, воспользуемся формулой (93).

Оказывается, что

$$\beta'=\arcsin\frac{y_\tau}{u_\tau}=\arcsin\frac{1{,}28}{172}=0{,}00744 \text{ радиан},$$

$$\beta'\cong 25',6.$$

Разобранный пример наглядно характеризует один из случаев рыскания, демонстрирует причину возникновения асимметрии рыскания на конкретных цифрах и дает количественное представление о величине ухода с курса при асимметричном рыскании. Мы видим, что даже малая асимметрия—всего лишь в 10, 13 секунды— уже приводит к заметному отклонению от курса, а надо сказать, что полученная асимметрия очень далека по величине от зачастую встречающейся на практике. Ветровая асимметрия рыскания нередко исчисляется десятками секунд при периоде рыскания порядка одной минуты.

2. Подсчитаем теперь значения характеристик рыскания в предположении, что момент силы сопротивления воды вращательным движениям судна пропорционален произведению V_0 на ω. Величины, характеризующие судно и движение, возьмем те же, что и в первом примере.

Найдем время t, в течение которого скорость вращения диаметрали становится практически постоянной. Примем за такую скорость скорость, равную 0,9 предельного значения ее.

Формула для угловой скорости при начальных условиях $\omega=0$ при $t=0$ будет выглядеть так:

$$\omega=\frac{N\pm nl}{2p}\left(\frac{1}{e^{2pt}}-1\right),$$

где:

N — суммарный момент сил A и R (без руля);

nl — постоянное значение рулевого момента;

$$2p = \frac{m_{o\ вращ}\rho_o V^{2/3} V_0}{I_z};$$

$m_{0вращ}$ — коэффициент вращательной части момента силы сопротивления R, равный 0,036;

V — объем подводной части судна.

Отсюда следует, что время, необходимое для достижения предельного значения скорости, в этом случае не зависит от величины вращающего момента. Это время будет равно

$$t = \frac{2,3}{2p} = \frac{2,3 I_z}{m_{o\ вращ}\rho_o V^{2/3} L^2 V_o} = \frac{2,3 \cdot 0,69 \cdot 10^8}{0,036 \cdot 102 \cdot 208 \cdot 60^2 \cdot 4} = 14,4 \text{ сек};$$

так как e^{2pt} (по условию), следовательно, $2\ pt \cong 2,3$.

За неимением других данных коэффициент вращательной части момента сопротивления $m_{0вращ}$ был приближенно подсчитан по данным для жесткого дирижабля «Акрон», приведенным в работе Федяевского.

Подсчитаем, на какой угол развернется судно за это время при вращении по ветру и на ветер. Если решить соответствующую задачу и положить, что при $t=0$, $\omega=0$, $\varphi_0=0$, то для первого случая получим

$$\varphi_1 = \frac{N+nl}{(2p)^2}\left(1-e^{-2pt}\right) + \frac{N+nl}{2p}\, t = 9°,16,$$

а для второго случая, т. е. при вращении на ветер,

$$\varphi_2 = \frac{N-nl}{(2p)^2}\left(1-e^{-2pt}\right) + \frac{N-nl}{2p}\, t = 6°,21.$$

Предельные скорости, которые будут развиваться при этом, оказываются равными

$$\omega_{1\ пред} = \frac{N+nl}{2p} = 0,92 \text{ град/сек},$$

$$\omega_{2\ пред} = \frac{N-nl}{2p} = 0,62 \text{ град/сек}.$$

По соответствующим формулам было подсчитано также время, необходимое для того, чтобы судно, вращающееся с предельной угловой скоростью, прекратило вращение под действием соответствующего момента. Оказалось, что при вращении по ветру $t_1=5,76$ сек., а при вращении на ветер $t_2=3,64$ сек.

Углы, на которые развернется судно за время t и t_1, оказываются равными $\varphi_{t_1}=1,°12$, $\varphi_{t_2}=0,°26$.

Сопоставляя значения предельной скорости вращения диаметральной плоскости судна, вычисленные при двух различных предположениях о зависимости вращательной части сопротивления воды от V и ω, убеждаемся, что они расходятся на значительную величину. Это указывает, что при принятых значениях скорости движения и скорости ветра расчет следует вести, учитывая оба члена вращательной производной.

3. При работе гирорулевого амплитуда рыскания судна невелика.

Из предыдущих разделов известно, что при малой амплитуде рыскания угловая скорость вращения судна не будет достигать своего установившегося значения и будет малой. В то же время угловое ускорение именно в этой области изменения угловой скорости имеет большие значения, о чем свидетельствует вид функции th, входящей в выражение для угловой скорости.

При рассматриваемом втором способе управления судном член N в уравнении моментов оказывается непостоянным и зависящим либо от φ, либо от времени t.

Сопоставляя члены, входящие в уравнение моментов для рассматриваемого случая управления судном, мы убеждаемся в том, что благодаря малости угловой скорости вращения и большим ускорениям момент сопротивления воды вращательным движениям судна в 40—60 раз меньше других моментов, входящих в это уравнение. Следовательно, при приближенном решении этого уравнения членом, характеризующим момент силы сопротивления воды вращательным движениям судна, можно пренебречь. Исключая этот член, мы переходим от исследования гидродинамической системы к исследованию системы механической.

Гирорулевой перекладывает руль пропорционально углу отклонения судна от курса. Так как рулевой момент приближенно пропорционален синусу угла поворота пера руля, то при условии равенства единицы коэффициента пропорциональности h, связывающего угол поворота пера руля i и угол отклонения судна от курса φ, уравнение рыскания судна при работе гирорулевого будет формально аналогично уравнению колебания маятника.

Следовательно, при таких условиях рыскание судна должно быть затухающим и иметь постоянный период (рис. 141).

Распространяя подмеченную аналогию на случай движения судна, управляемого гирорулевым при действии на судно ветра, убеждаемся, что рыскание судна в таких условиях будет напоминать колебания маятника при действии на него, кроме момента силы тяжести, другого постоянного отклоняющего момента.

Очевидно, что при этом рыскание судна будет затухающим, асимметричным, а диаметральная плоскость будет стремиться занять положение, отклоненное на некоторый угол от заданного курса.

Но практически судно никогда не достигает этого положения, так как рыскание, не успев затухнуть, вновь увеличивается за счет нового возмущения.

Из сказанного еще раз становится очевидным, что управляемое гирорулевым судно в случае действия на него ветра будет также уходить с линии заданного курса вследствие асимметрии рыскания.

4. Выше был приведен способ расчета ухода судна с курса, вызванного асимметричным рысканием. Но этот способ сложен и в условиях плавания в таком виде непригоден, так как требует много времени, не дает возможности

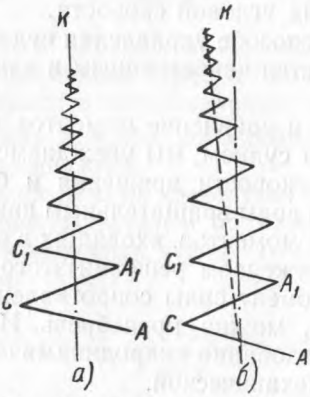


Рис. 141. Развертка колебаний диаметральной плоскости судна, управляемого гирорулевым при ветре и без ветра

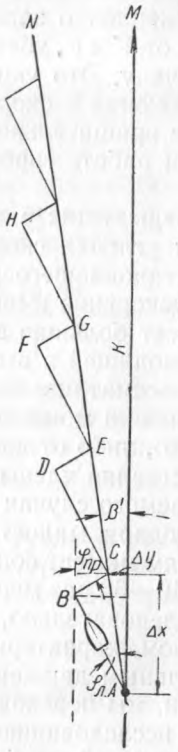


Рис. 142. Расчет ухода судна с курса вследствие асимметричного рыскания

быстро предвычислять величину ухода с курса и, следовательно, заблаговременно вносить поправку в прокладку. Для этих целей можно предложить другой очень простой, правда, приближенный способ предвычисления ухода с линии курса.

Если приближенно считать, что судно вследствие рыскания движется по некоторой ломаной линии *A, B, C, D, E, F, G, H* и т. д. (рис. 142), при этом рыскание асимметрично по времени, то судно будет постепенно отклоняться от линии заданного курса *K* и попадать к концу каждого периода рыскания в точки *C, E, G* и т. д. Эти точки, если рыскание установившееся, лежат на линии *AN*, которая отклонена от линии *AM* на угол β'. Этот угол и будет являться искомой поправкой при прокладке на карте пути судна.

Для того чтобы рассчитать угол β', необходимо знать величину угла рыскания φ и время лежания судна на правом и левом рысках.

Пусть при скорости движения u судно лежит на левом рыске в течение времени $t_{лев}$, а на правом рыске $t_{пр}$. При этом пусть $t_{лев} > t_{пр}$. Из рис. 142 видно, что интересующий нас угол

$$\beta' = \operatorname{arc\,tg} \frac{\Delta Y}{\Delta X}, \tag{94}$$

где $\Delta Y = u(t_{лев} - t_{пр}) \sin \varphi$, $\Delta X = u(t_{лев} + t_{пр}) \cos \varphi$.

Подставляя эти значения ΔY и ΔX в формулу (94), находим выражение для определения угла β' по значениям элементов рыскания $\varphi_{пр} = \varphi_{лев}$, $t_{пр}$, $t_{лев}$:

$$\beta' = \operatorname{arc\,tg} \frac{t_{лев} - t_{пр}}{t_{лев} + t_{пр}} \operatorname{tg} \varphi. \tag{95}$$

Очевидно, что в случае установившегося рыскания асимметричного как по времени, так и по углу φ, β' будет определяться формулой

$$\beta' = \operatorname{arc\,tg} \frac{t_{лев} \sin \varphi_{лев} - t_{пр} \sin \varphi_{пр}}{t_{лев} \cos \varphi_{лев} + t_{пр} \cos \varphi_{пр}}. \tag{96}$$

Для расчета угла β' на судне по компасу из 20—30 колебаний картушки определяются среднее значение углов рыскания $\varphi_{лев}$ и $\varphi_{пр}$ и среднее значение времени лежания на правом и левом рысках $t_{лев}$ и $t_{пр}$.

Угол β' точно так же, как и угол дрейфа β, во время плавания необходимо повторно определять при заметных изменениях курсового угла ветра, скорости его и скорости движения судна.

Если угол дрейфа принято всегда считать положительным (смещение относительно линии заданного курса по ветру считается положительным), то угол β' может иметь в этом смысле и положительный и отрицательный знаки, т. е. судно может смещаться и по ветру и против ветра.

Знак угла β' определяется знаком разности

$$t_{лев} \sin \varphi_{лев} - t_{пр} \sin \varphi_{пр}$$

и зависит от того, как реагирует судно на действие ветра — приводится к нему или уваливает. Это же в свою очередь, как уже упоминалось, зависит от курсового угла ветра, угла дрейфа и аэро- и гидромеханических характеристик судна.

§ 4. МЕРЫ БОРЬБЫ С РЫСКЛИВОСТЬЮ И ЗАРЫСКИВАНИЕМ

Описанные способы вычисления ухода судна с курса являются средством борьбы с одним из вредных последствий асимметричного рыскания, но это средство, как мы видим, пассивное.

Проведенные исследования показали, как зависит рыскание от режима работы руля. Таким образом появилась возможность рациональным выбором режима работы руля влиять на рыскание, добиваясь минимальных амплитуд и симметрии этого явления. Так, например, выбирая режим работы для руля при управлении судном рулевым-человеком или гирорулевым, можно не только уменьшить амплитуду рыскания, но и добиться того, чтобы рыскание было симметричным по углу и времени или затухающим к заданному курсу судна, а не к направлению, отклоненному от курса.

Исследования показали, и это указывает еще на одну возможность влиять на характер рыскания, что судам с определенным соотношением их геометрических размеров, водоизмещения и качества руля свойственно стремление к определенному режиму рыскания.

Следовательно, предусмотрев наивыгоднейшие соотношения этих характеристик судна при проектировании, можно добиться и наивыгоднейших качеств его, относящихся к режиму рыскания.

Удалось, например, установить, что затухающее рыскание при управлении судном рулевым будет тем вероятнее, чем больше длина судна и водоизмещение и чем меньше момент, создаваемый поворотом руля.

Но все эти средства в конце концов являются пассивными средствами борьбы, так как не влияют на причину рыскливости — вращающий момент, возникающий от действия ветра и дрейфа судна.

Исследование вращающего момента показывает, что этот момент в основном определяется курсовым углом ветра, расположением надстроек и формой надводной части корпуса судна.

Это справедливо для случаев движения с постоянным режимом работы машины и переменном ветре. Дело в том, что даже значительное изменение ветра может изменить угол дрейфа лишь в пределах 10—20°, а при таком изменении угла дрейфа положение точки приложения силы давления на подводную часть практически останется неизменным. Следовательно, и момент этой силы изменится лишь незначительно за счет незначительного же изменения скорости движения. Значительные изменения скорости движения судна, вызываемые изменением режима работы машин, конечно, заметнее будут сказываться на величине суммарного вращающего момента.

Пользуясь материалами буксировок надводных частей (модель 970А), быстроходного грузового парохода (модель 1057А) и лайнера (модель 1086А) (рис. 28, 29, 30, 124), проделанных Хьюзом, удалось построить кривые положения центра давления ветра и коэффициента вращающих моментов относительно точки приложения силы R в зависимости от курсового угла. При этом условия движения для всех моделей были приняты одинаковыми. Положение центра давления в подводной части (сила R) было выбрано для всех моделей постоянным и равным, считая от носа, 0,2 длины ее. Эта величина соответствует углу дрейфа 15°. Так

как длина моделей была принята одинаковой, то эта величина оказалась одинаковой для всех моделей.

Кривые изменения положения центра давления ветра для четырех судов изображены на рис. 124. Для получения коэффициентов вращающих моментов силы A величина плеч для различных углов δ была умножена на соответствующие коэффициенты нормальных составляющих этой силы.

Зависимости этих коэффициентов от δ для четырех судов изображены на рис. 34.

Полученные результаты позволяют сделать два основных вывода:

а) у всех судов при движении вращающий момент увеличивается с увеличением курсового угла ветра и достигает максимума при углах, близких к 130° [у модели 1 (быстроходное судно) 100°];

б) максимальный вращающий момент при движении наблюдается у судов с надстройками, сконцентрированными в кормовой части; смещение надстроек в носовую часть уменьшает величину вращающего момента.

Есть все основания полагать, что и рыскливость судна будет следовать такой же закономерности.

Очевидно, что для уменьшения рыскливости судна необходимо уменьшить величину вращающего момента. Идеальные условия будут достигнуты в том случае, когда точки приложения сил, действующих на надводную и подводную части судна, будут на одной вертикальной линии. В этом случае вращающий суммарный момент будет равен нулю.

Уменьшение величины вращающего момента может быть достигнуто рациональным расположением надстроек на судне, которое создает наивыгоднейшие условия в смысле уменьшения величины этого момента при различных курсовых углах ветра. Без сомнения, эти соображения всегда надо иметь в виду при проектировании судов.

Уменьшения вращающего момента можно добиться и иным путем. Для этого в надводной или подводной части судна в плоскости его диаметрали необходимо расположить дополнительные плоские поверхности, величина которых по желанию может изменяться или может перемещаться вдоль диаметрали вся поверхность. Обязательным условием для изменения величины этих поверхностей или смещения их является смещение только вдоль диаметральной плоскости, так как только при таких смещениях коэффициент сопротивления не будет заметно изменяться. В противном случае такое приспособление ничем принципиально не будет отличаться от руля.

Изменяя величину этих поверхностей или перемещая их, можно добиться смещения точек приложения сил A и R, а следовательно, уменьшения вращающего момента и рыскливости при любом курсовом угле ветра.

Такие приспособления следует предусматривать при проектировании в тех случаях, когда особенности назначения судна не позволяют придать надстройкам наивыгоднейшую форму и расположение, а также в тех случаях, когда имеется в виду уменьшить рыскливость уже построенного судна.

Из предыдущих рассуждений очевидно, что в случае постройки дополнительных поверхностей в надводной части их надо располагать ближе к носу, поверхности же в подводной части следует располагать ближе к корме.

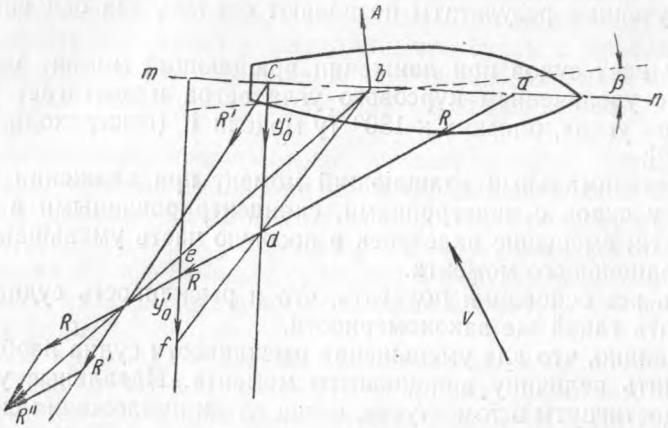


Рис. 143. Графический расчет величины добавочных площадей, необходимых для уменьшения рыскливости

На рис. 143 изображен упрощенный геометрический способ расчета величин дополнительных поверхностей, необходимых для сведения точек приложения сил A и R на одну вертикальную линию при различных курсовых углах ветра.

Из рис. 143 видно, что для смещения силы, действующей на подводную часть судна, из точки a в точку b необходимо по возможности ближе к корме приложить дополнительную силу R' такой величины и направления, чтобы суммарная сила $\bar{R}''=\bar{R}+\bar{R}'$ проходила через точку b. Для определения силы R' делаются следующие построения. Через точку C (положение центра дополнительной поверхности) проводится линия, перпендикулярная диаметральной плоскости mn. Сила R переносится в направлении ее действия в точку d до пересечения с линией Cd, перпендикулярной mn. Через точки b и d проводится линия bd. Если теперь провести через конец вектора R, перенесенного в точку d, линию, перпендикулярную диаметральной плоскости, то отрезок ef будет характеризовать величину нормальной составляющей силы R'.

Величина добавочной площади определяется по формуле

$$S'=\frac{2Y_0'}{C'_{0y(\beta)}\rho_0 V_0^2}. \qquad (97)$$

Отрезок *ef*, умноженный на масштаб, в котором откладывались силы R и A, дает величину нормальной составляющей силы R', т. е. Y_0'; $C_{0y(\beta)}'$ берется равным коэффициенту сопротивления плоской пластины, расположенной к потоку под углом, равным углу дрейфа судна.

Этот способ, как мы видим, дает лишь грубую оценку величины дополнительной площади, но именно это и требуется от него, так как более тщательный подбор величины этой поверхности должен производиться на судне во время движения опытным путем.

В разобранном примере для простоты расчета считалось, что изменение площади дополнительной поверхности при различных курсовых углах ветра должно происходить либо симметрично относительно точки C, либо вниз под киль так, чтобы центр давления на эту поверхность либо не смещался вовсе, либо находился все время на вертикальной линии, проходящей через точку C.

Точно таким же способом можно рассчитать и добавочные поверхности в случае расположения их в надводной части судна. Коэффициент сопротивления при этом должен быть выбран для соответствующего курсового угла ветра.

Подсчет площади дополнительных поверхностей, проделанный для трех исследуемых судов, показал, что величина их колеблется в пределах от 1 до 15 $м^2$ в случае расположения в подводной части и в пределах от 200 до 4000 $м^2$ при расположении их в надводной части. Площади в 200—4000 $м^2$ оказываются близкими по величине, а порой и превышают площади силуэта судна. Это показывает, что дополнительными поверхностями в надводной части можно добиться лишь частичного уменьшения вращающего момента, уменьшение же его до нуля будет возможно либо при удачном в этом смысле расположении надстроек на существующем судне, либо если это будет учтено на проектируемом.

Устройство дополнительных поверхностей в подводной части, кроме уже подмеченного, имеет еще одно преимущество. Дополнительные поверхности в подводной части будут уменьшать угол дрейфа и угловую скорость вращения судна при рыскании, дополнительные же поверхности в надводной части увеличат угол дрейфа.

С другой стороны, устройство переменных по величине поверхностей в подводной части сопряжено со значительными техническими трудностями, в то время как в надводной части эти устройства не вызывают каких-либо затруднений и с успехом могут быть заменены различного размера парусом, натягивающимся в диаметральной плоскости между штагом и передней мачтой.

Между прочим, подобные устройства уже использовались на парусных спортивных яхтах для уменьшения стремления яхты увалиться или привестись к ветру. С этой целью мачта на таких яхтах делалась передвижной. Здесь уместно будет упомянуть также об известном стремлении яхты приводиться или уваливать при

изменении глубины погружения опускного киля—шверта. Оказывается, что даже малые изменения в погружении киля вызывают заметные изменения этих тенденций.

Очевидно, что наиболее рациональным будет комбинированное устройство с переменной поверхностью дейдвуда и небольшими меняющимися поверхностями в надводной части судна.

В заключение можно указать на эксперимент, проделанный на морском катере, отличавшемся очень большой рыскливостью. При ветре бакштаг поднятый кливер уменьшил рыскание с 15—20° до 8—14°, т. е. почти в два раза.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПОТЕРЯ УПРАВЛЯЕМОСТИ СУДНА НА МАЛЫХ ХОДАХ ПРИ ВЕТРЕ И РАЗВОРОТ СУДНА «НА СТОПЕ»

§ 1. ПОТЕРЯ УПРАВЛЯЕМОСТИ СУДНА НА МАЛЫХ ХОДАХ ПРИ ВЕТРЕ

1. В предыдущих разделах неоднократно приходилось говорить о возможной потере управляемости судна при определенных соотношениях скорости его движения и скорости кажущегося ветра.

Потерей управляемости называется неспособность судна удержаться на курсе или повернуть в желаемом направлении при полной перекладке руля на борт.

Исследование потери управляемости судна имеет большой практический интерес, так как результаты этих исследований позволят повысить безопасность кораблевождения. Можно привести очень много примеров аварий, вызванных потерей управляемости. Аварии эти происходили вследствие недопустимого снижения скорости при прохождении узкостей или каналов, преждевременной отдачи буксира при выводе крупных судов из порта или при швартовке их в ветреную погоду. Причина этих аварий в конце концов кроется в конструктивных недостатках судна, обуславливающих слишком быстрое наступление потери управляемости. В сущности и способность судна бороться с штормом — противодействовать развороту лагом к волне — зависит от способности судна управляться при ветре.

К основным вопросам кораблевождения, связанным с потерей управляемости, относятся:

а) определение минимальной скорости движения судна при ветре, обеспечивающей удержание судна на курсе;

б) выбор безопасного курсового угла ветра для движения в шторм при вынужденном понижении скорости судна до возможного предела;

в) определение скорости для поворота, обеспечивающей сохранение управляемости в течение всего маневра;

г) определение допустимого снижения скорости во время швартовки при ветре.

На некоторые из этих вопросов, особенно при плавании в открытом море, можно найти ответ опытным путем, в большинстве же случаев необходимо предвычисление, которое может быть дано только на основании результатов эксперимента и теоретического исследования. Кроме того, исследование укажет способы улучшения управляемости судна при ветре изменением его конструкции (в основном путем рационального расположения надстроек).

Для исследования вопроса потери управляемости судна рассмотрим два уравнения движения его, а именно: уравнение нормальных к диаметрали составляющих сил, действующих на судно, и уравнение моментов этих сил. Будем рассматривать случай установившегося прямолинейного движения судна с дрейфом, так как только для такого случая удается пока найти простое решение. Силу, действующую на корпус и на руль, расчленять не будем. Тогда

$$C_y \rho/_2 S_{(90°)} V^2 = C_{0y} \rho_0/_2 S_{0\,(90°)} V_0^2, \tag{98}$$

$$C_y \rho/_2 S_{(90°)} V^2 b = C_{0y} \rho_0/_2 S_{0\,(90°)} V_0^2 a. \tag{99}$$

Предположим, что C_{0y} будет зависеть только от угла дрейфа β и от угла поворота пера руля i.

Зависимость же от скорости, происходящую вследствие изменения волнового сопротивления, учитывать не будем.

C_y, как известно, зависит в основном от курсового угла ветра ϑ.

Для критического момента, т. е. для момента, когда дальнейшее увеличение скорости ветра, соответствующее изменение курсового угла его или уменьшение скорости движения судна, вызывает потерю управляемости, эти уравнения запишутся так:

$$C_y \rho/_2 S_{(90°)} V^2 = C_{0_{умакс}} \rho_0/_2 S_{0\,(90°)} V_0^2, \tag{98'}$$

$$C_y \rho/_2 S_{(90°)} V^2 b = C_{0\,умакс} \rho_0/_2 S_{0\,(90°)} V_0^2 a', \tag{99'}$$

в которых $C_{0умакс}$ a' означают полный коэффициент нормальной составляющей сопротивления и плеч сил R для подводной части с рулем, повернутым на угол, при котором nl имеет максимальное значение.

Для удержания судна на курсе, как это видно из уравнений (98′), (99′), необходимо, чтобы плечи сил A и R относительно какой либо точки были равны

$$a = b. \tag{100}$$

Отсюда намечается следующий путь графо-аналитического решения этих уравнений для определения минимальной скорости движения судна, необходимой для сохранения управляемости при заданной скорости и курсовом угле ветра.

Величина плеча силы A зависит от курсового угла ветра и наиболее надежно определяется экспериментальным путем. На

рис. 144 нанесена эта зависимость, полученная из продувок в аэродинамической трубе (сплошная кривая). Если в этих же осях построить зависимость плеча силы $R_{(корп+руль)}$ от угла дрейфа при руле, повернутом до предела, то легко будет найти угол дрейфа, при котором будут соблюдаться написанные уравнения, т. е. длина плеч будет одинаковой. Этот угол дрейфа будет критическим, так

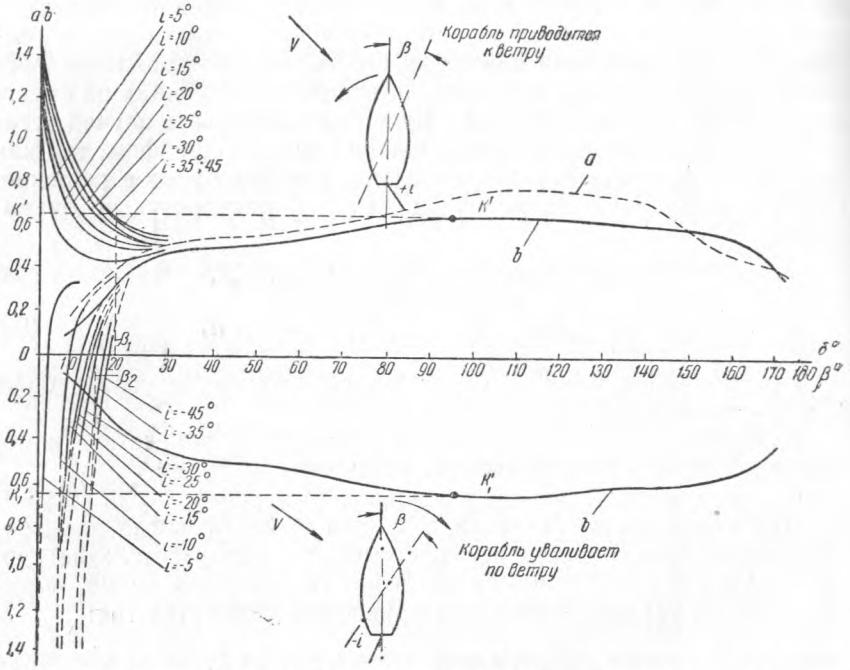


Рис. 144. График для определения условий потери управляемости судна

как дальнейшее увеличение его при увеличении скорости ветра или уменьшении скорости движения судна повлечет за собой потерю управляемости.

Для нахождения минимальной скорости движения надо решить уравнение (98′) относительно V_0:

$$V_0 = V \sqrt{\frac{C_y \rho S_{(90°)}}{C_{0\,y\,макс} \rho_0 S_{0\,(90°)}}} \,. \qquad (101)$$

Значения C_y и $C_{0y\,макс}$ находят из графиков продувок надводной и подводной (с повернутым рулем) частей судна.

V и δ для определения по графику берут из наблюдений или приблизительно вычисляют ожидаемые величины их, β для выбора $C_{0y\,макс}$ определяется по δ из графика на рис. 144. Между прочим, этот метод можно использовать и для определения некри-

тических углов дрейфа. Для этого необходимо построить семейство кривых a для корпуса, продутого с различными значениями угла поворота руля i и β. Во время плавания этот способ определения угла дрейфа требует наблюдения только курсового угла ветра и среднего положения пера руля.

Формулу (101) можно упростить, если коэффициенты C_y, $C_{y^0/макс}$ отнести к одной и той же площади. Если обозначить эти коэффициенты через C_y^s, $C^s_{^0y\ макс}$, то формула (101) примет такой вид:

$$V_0 = \frac{V}{\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}}} \sqrt{\frac{C_y^s}{C_{y0\ макс}}}. \qquad (102)$$

Зависимость C_y^s и $C^s_{y_0\ макс}$ от δ и β можно приближенно выразить аналитически. В таком случае отпадает необходимость пользоваться графиками их, а формулу можно записать так:

$$V_0 = 0{,}0354\, V \sqrt{\frac{F_1(\alpha)}{F_2(\beta)}}. \qquad (103)$$

Решающее значение при определении потери управляемости имеет режим работы руля. Режим работы руля зависит не только от угла перекладки его, но и от угла дрейфа.

Оказывается, что максимальная величина нормальной к диаметрали составляющей силы $R_{(корп+руль)}$ при различных углах дрейфа будет соответствовать и различным углам поворота руля. Это отчетливо обнаруживается и на рис. 144.

В зависимости от знака ветрового момента для удержания судна на курсе перо руля может быть повернуто и в сторону дрейфа (положительное направление) и в противоположную дрейфу сторону, а поворот судна может быть осуществлен и увеличением и уменьшением угла поворота i (см. рис. 144). Следовательно, величина вращающего момента силы $R_{(корп+руль}$ определяется не только углом дрейфа и величиной угла i, но и знаком угла поворота руля, так как в зависимости от знака угла i увеличение угла дрейфа вызывает либо увеличение, либо уменьшение угла атаки пера руля.

К чему поведет то обстоятельство, что при определении момента потери управляемости не учитывается изменение величины угла i (при котором эффект действия руля максимален) в зависимости от угла дрейфа? Оказывается, это приводит в некоторых случаях к завышению допустимой минимальной скорости движения судна. Действительно, найденная скорость будет соответствовать выбранному углу поворота руля, но может оказаться, что при найденном угле дрейфа этот угол не будет углом, при котором вращающий момент силы $R_{(корп+руль)}$ имеет максимальное значение. Тогда, следовательно, перекладывая руль, можно добиться сохране-

ния управляемости и при дальнейшем уменьшении скорости движения судна или увеличения скорости ветра. Вследствие того, что максимум значения момента силы $R_{(корп+руль)}$ может при этом сместиться и в сторону увеличения и в сторону уменьшения угла i, то и дополнительный поворот руля в таких случаях может оказаться с различными знаками.

Для того чтобы при определении минимальной скорости, необходимой для сохранения управляемости, учесть изменение режима работы руля в зависимости от угла дрейфа, на рис. 144 надо, кроме кривой a, соответствующей $i=0$, построить такие же кривые, взяв в качестве параметра различные значения этого угла. Эти кривые позволят выбрать по плечу ветрового момента b критический угол β при угле поворота руля, создающем максимальный момент.

Такой график можно использовать и для определения угла дрейфа по курсовому углу ветра и среднему углу поворота пера руля.

В случае значительных углов дрейфа препятствием для улучшения управляемости судна при ветре могут оказаться конструктивные особенности руля, ограничивающие поворот его малыми значениями i и не позволяющие тем самым достигать наивыгоднейших углов атаки пера руля.

Решенная таким путем задача о возможном снижении скорости движения судна позволяет установить путем сравнения наблюдаемой скорости с подсчитанной минимальной возможность дальнейшего снижения скорости движения судна. Ответить же на вопрос, насколько можно уменьшить скорость движения или каково допустимое увеличение скорости ветра без дополнительных допущений, строго говоря, нельзя. Дело в том, что уменьшение скорости движения судна вызовет изменение скорости и курсового угла кажущегося ветра, а следовательно, и величины ветрового момента. Чтобы решить эту задачу точно, надо воспользоваться методом последовательных приближений. Но скорость ветра в тех случаях, когда начинают учитывать его влияние на управляемость судна, всегда значительно больше скорости движения. Поэтому, если предположить, что изменение скорости судна не скажется на величине и направлении кажущегося ветра, то тогда найденную описанным выше путем минимальную скорость можно принять приближенно за предел, до которого можно уменьшить скорость движения судна при наблюдаемом курсовом угле и скорости кажущегося ветра.

Теперь укажем еще на одну особенность изменения плеча силы R и затем приведем конкретный пример определения допустимой минимальной скорости движения, обеспечивающей сохранение управляемости судна при ветре.

Ход кривых длины плеча a показывает стремление их приблизиться по мере увеличения β к кривой, соответствующей $i=0$. Это показывает, что с увеличением угла дрейфа роль руля уменьшает-

ся и изменения величины плеча от поворота пера руля становятся незначительными. Но, конечно, эти кривые не сольются с кривой для угла $i=0$, так как поворот руля повлечет за собой изменение вида проекции диаметральной плоскости судна. Сдвиг точки приложения силы давления будет происходить в силу изменения площади на корме. Следовательно, при некотором угле дрейфа кривые для различных i, слившись попарно ($+5$ с -5, $+10$ с -10 и т. д.), расположатся плотным пучком несколько ниже кривой для $i=0$. Судя по ходу кривых на рис. 144, это должно произойти при угле β, примерно равном 40—60°.

Область углов атаки от 90 до 180°, менее интересная для вопросов управляемости, не исследована. Одной из особенностей режима работы руля при углах β, близких к 180° (на задних ходах при ветре), будет то, что поворот его (до некоторых пределов) в сторону набегающего потока будет уменьшать, а поворот в сторону, противоположную потоку, увеличивать эффективность его работы (рис. 145).

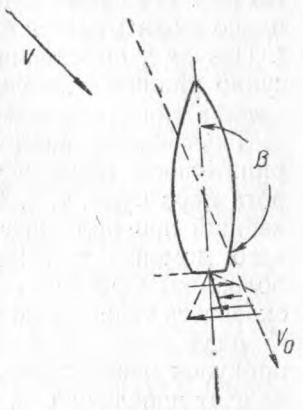


Рис. 145. Влияние угла дрейфа на режим работы руля на задних ходах

Пусть курсовой угол ветра равен 110°, а скорость ветра 10 *м/сек*. Из графика на рис. 145 видим, что углу $\beta = 110°$ соответствует максимальное значение плеча b (точка K). Проведем через эту точку прямую, параллельную горизонтальной оси. Тогда проекции на эту ось точек пересечения прямой K с кривыми a дадут значения углов дрейфа, с которыми будет двигаться судно при различных значениях i в скоростях движения V_0.

Критический угол дрейфа определяется проектированием на горизонтальную ось первой (считая справа) точки пересечения линии K с кривой a. В самом деле, все другие точки пересечения будут соответствовать меньшим углам дрейфа, а следовательно, большим скоростям движения.

Выбранный таким способом критический угол дрейфа будет соответствовать углу поворота пера руля, создающему максимальный момент с учетом изменения его режима зависимости от угла дрейфа. Действительно, меньшие углы поворота смогут компенсировать ветровой момент только при бóльших скоростях. Большие же углы поворота руля не смогут компенсировать данный ветровой момент вследствие ухудшения режима работы руля. Мы не располагаем материалом продувок при углах i, больших 45°, но, очевидно, кривые a для таких углов при $\beta=0—30°$ расположились бы ниже кривой для угла i, равного $+45°$ (для данного судна). Из сказанного, кроме всего, следует, что рис. 144 можно использовать для определения пределов поворота пера руля при конструировании рулевого устройства.

Отрицательный знак угла поворота пера руля по условию означает поворот в сторону, противоположную дрейфу, а положительный — в сторону дрейфа. Поворачивать руль в отрицательную область углов i приходится в тех случаях, когда судно под действием ветра уваливает. Наоборот, когда судно приводится к ветру, приходится поворачивать руль в положительную область углов i, т. е. в сторону дрейфа.

Режим работы руля при различных знаках угла i неодинаков. Из рис. 144 видно, что при одном и том же значении углов i и β плечо a оказывается бо́льшим при положительных значениях угла i. Поэтому, определяя критический угол дрейфа в случае, когда судно уваливает, нельзя считать его равным критическому углу дрейфа при стремлении судна привестись.

Построения, аналогичные предыдущим, проделанные для отрицательной области углов i, показывают, что тот же угол поворота пера руля, т. е. 45°, но с отрицательным знаком (наивыгоднейший при положительных i) обеспечивает компенсацию ветрового момента при меньших углах дрейфа, следовательно, при больших скоростях движения. Правда, этот угол поворота может оказаться теперь уже не наивыгоднейшим, так как на пути линии K могут встретиться кривые a для больших значений углов i, из продувок неизвестных. К сожалению, неполные продувки не позволяют проследить за условиями управляемости при углах свыше 45° и в положительной и в отрицательной области их.

Итак, для компенсации ветрового момента при $\delta = 110°$ наивыгоднейшее значение i равно 45°. Этому углу поворота соответствует критический угол дрейфа β, равный 17°. Подставляя в формулу (102) значение C_y при $\delta = 110°$ и C_{y_0} при $\beta = 17°$, а также значение скорости ветра $V = 10$ *м/сек*, находим

$$V_0 \cong 0{,}0354 \cdot 10\sqrt{7{,}05} = 0{,}95 \text{ м/сек},$$

откуда минимальная скорость движения судна при данном направлении и скорости ветра, необходимая для сохранения управляемости, оказывается равной 1,85 узла.

При том же самом отрицательном значении угла i критический угол дрейфа оказывается равным 13°. Подставляя новые данные в формулу (102), найдем

$$V_0 \cong 0{,}0354 \cdot 10\sqrt{7{,}05} = 1{,}18 \text{ м/сек}, \text{ или } 2{,}3 \text{ узла}.$$

Следовательно, если угол $i = 45°$ является предельным для обоих случаев, то при снижении скорости судно раньше потеряет управляемость в том случае, когда под действием ветра оно стремится увалиться [1].

Уравнение (102) и график на рис. 144 позволяют решить и другие задачи. Если необходимо определить безопасный курсовой

[1] Следует помнить, что V_0 — истинная скорость судна, следовательно, определяя минимальную скорость по лагу, надо значение V_0, полученное из расчетов, умножить на косинус угла дрейфа.

угол ветра, при котором судно с ограниченной скоростью может двигаться, не теряя управления в штормовую погоду, решение надо вести в таком порядке.

Задавшись предельной скоростью, которую может развить судно, надо решить уравнение (102) относительно C_{y0}:

$$C_{y0} = \frac{1}{800} \cdot \frac{V^2}{V_0^2} C_y. \qquad (104)$$

Теперь необходимо найти β и δ', при которых это соотношение соблюдается. Для этого ординаты графика $C_{y(\delta)}$ надо помножить на $1/800 \frac{V^2}{V_0^2}$ и затем, выбрав график $C_{y_0(\beta)}$ для наивыгоднейшего (по рис. 144) угла $\pm i$, сравнением найти δ и β, при которых ординаты обоих графиков $C_{y(\delta)}$, $C_{y0(\beta)}$ одинаковы. δ' в данном случае и будет безопасным курсовым углом ветра, при котором судно, движущееся со скоростью V'_0, при скорости ветра V' сохранит управляемость. Угол дрейфа судна при этом будет равен β'.

Решим теперь другую задачу. Пусть судно при некоторой скорости ветра V'' и курсовом угле δ'' движется со скоростью V_0''. Допустим, что скорость ветра начала возрастать, а курсовой угол остается неизменным. Требуется определить, до какого значения скорости ветра V можно двигаться с прежней скоростью и прежним курсом, а следовательно, приблизительно и курсовым углом ветра, чтобы сохранялась способность судна управляться?

Для того чтобы ответить на этот вопрос, надо по графику на рис. 144, взяв в качестве аргумента курсовой угол ветра, найти критический угол дрейфа при наивыгоднейшем повороте пера руля, с учетом знака поворота. По δ и найденному таким образом β определяются по соответствующим графикам значения $C_{y_0(\beta,i)}$ и $C_{y(\delta)}$ и, наконец, подставив эти значения в уравнение (102), решают его относительно V. Во всех этих задачах знак поворота пера руля находят либо из непосредственных наблюдений за средним положением пера руля, либо из графиков $m_{0\,y(\beta)}$ $m_{y(\delta)}$ по знаку момента.

В заключение опишем порядок выбора угла перекладки руля и скорости для совершения поворота судна на 360° при ветре.

Так как во время циркуляции скорость движения судна падает, меняется угол дрейфа, а следовательно, и режим работы руля и, кроме всего, меняются курсовой угол и скорость ветра, то может случиться так, что в некоторой точке циркуляции без дополнительной перекладки руля или увеличения скорости судно может перестать слушаться руля.

Точно решить эту задачу невозможно. Порядок же приближенного решения будет таков. Зная скорость судна на различных этапах циркуляции, направление и скорость истинного ветра, определяют курсовой угол и скорость ветра при нахождении судна в различных точках циркуляционной кривой. Выбрав по этим значениям (из графика на рис. 144) точку на циркуляции с курсовым

углом, соответствующим максимальному значению плеча b, и сопоставив найденный по значению b для выбранного угла δ критический угол β и соответствующую ему скорость со скоростью в данной точке циркуляции, можно приближенно судить о том, сохранит или не сохранит судно управляемость, т. е. будет ли оно продолжать разворачиваться в желаемом направлении при создавшихся условиях.

Для суждения об управляемости на циркуляции недостаточно знать только минимально допустимую скорость движения. Кроме того, необходимо знать и суммарный (циркуляционный плюс ветровой) угол дрейфа.

2. Об управляемости судна при ветре можно судить по графику (на рис. 144), построенному по материалам продувок его модели. Анализ этого графика позволяет не только выяснить способность данного судна управляться при ветре, но и дает возможность указать, какие изменения надо вводить в конструкцию судна, чтобы управляемость его улучшилась, и каков должен быть руль для того, чтобы при движении с дрейфом он работал наиболее эффективно.

Первое, что необходимо для хорошей управляемости судна при ветре,— это минимальные значения плеча ветрового момента при всех курсовых углах δ. Действительно, чем ниже кривая b будет расположена на графике, тем меньше понадобятся углы поворота пера руля при больших критических углах дрейфа для компенсации ветрового момента. Но коль скоро допустимые критические углы дрейфа будут большие, то, следовательно, управляемость судна будет сохраняться при очень малых скоростях движения.

По мере увеличения ординат кривой b, углы поворота руля, необходимые для компенсации ветрового момента, будут увеличиваться (см. рис. 144), а значение минимальной безопасной скорости расти. Если случится так, что максимальная ордината кривой b окажется больше любой ординаты всех кривых a, то это будет означать, что судно данной конструкции при курсовом угле, соответствующем максимальному значению b, вообще не может управляться.

При каких условиях может произойти такой случай? Чтобы ответить на этот вопрос, проследим за изменением плеча сил A и $R_{(корп+руль)}$ в зависимости от δ, β и i. Как и прежде, чтобы проще связать длину плеч нормальных составляющих сил $R_{(корп+руль)}$ и A с размерами судна, будем определять их относительно носового перпендикуляра.

Длина плеча b возрастает с увеличением угла δ, достигая максимума при определенном значении этого угла. Величина максимума и угол δ, соответствующий ему, зависят от расположения надстроек и формы надводной части корпуса судна.

Наименьшие размеры $b_{макс}$ будут у судна с надстройками, сосредоточенными в носовой части судна. У судов с надстройками,

сосредоточенными в кормовой части, $b_{макс}$ будет наибольшей и в предельных случаях может быть близкой по величине длине судна. Плечо нормальной к диаметрали составляющей силы $R_{(корп+руль)}$ зависит от угла дрейфа и угла поворота руля. Максимальное значение плеча a, если пренебречь размерами руля по сравнению с размерами судна, может быть равным длине судна. Но у некоторых судов с большим кормовым подзором и у яхт руль иногда расположен далеко к центру тяжести от кормового перпендикуляра. Следовательно, плечо b при некотором угле δ может превышать максимальную величину плеча a, и судно, имея тенденцию привестись, не сможет управляться при любой малой скорости ветра такого направления.

Вероятность таких условий особенно велика у судов с надстройками, сосредоточенными в кормовой части судна, рулем малой площади или рулем с плохим качеством и ограниченными возможностями поворота, не позволяющими достичь наиболее эффективных углов i. У таких судов даже в случае, когда b и не будет превышать a, скорость, необходимая для сохранения управляемости при ветре, может оказаться практически недостижимой или близкой к предельной. В последнем случае судно будет терять управляемость при шквалах и усилении волнения.

График на рис. 144 позволяет ответить и на другой вопрос, касающийся конструкции руля, а именно: определить максимальный угол, до которого необходимо обеспечить возможность поворота пера руля, чтобы наиболее эффективно использовать его при движении с дрейфом. Кривая a, соответствующая искомому углу $\delta_{макс}$, должна иметь наибольшие ординаты при любых углах дрейфа. График наглядно демонстрирует еще одну особенность управляемости судна при ветре. При отрицательных углах i, т. е. при движении с дрейфом и стремлении увалиться, нейтральное положение пера руля — положение, при котором вращающий момент равен нулю,— смещается в область отрицательных углов поворота. Поэтому, изменяя угол отклонения пера руля только в этой области около смещенного нейтрального положения, можно получить нормальные составляющие силы $R_{(корп+руль)}$ различными знаками и таким образом добиться поворота судна в обе стороны. Имея целью более наглядно отобразить эту особенность работы руля, на рис. 144 значения плеч a откладывались в зависимости от знака i в различных полуплоскостях, разделенных горизонтальной осью.

Из всего сказанного в настоящем параграфе становится очевидным большое значение построения для судна графиков управляемости, позволяющих ответить на ряд вопросов, связанных с управляемостью судна при ветре, а также дающих возможность ответить на ряд вопросов, связанных с архитектурой судна и конструкцией его рулевого устройства, разрешение которых необходимо для улучшения управляемости при ветре, а следовательно, для увеличения безопасности плавания.

На актуальность этих вопросов повседневно указывает практика, и особенное значение они приобретают при плавании по каналам, узкостям и рекам, ограничивающим выбор скорости и курса движения, а следовательно, и курсового угла ветра, имеющего столь большое влияние на управляемость судна.

§ 2. РАЗВОРОТ СУДНА «НА СТОПЕ»

1. При потере управляемости или при остановке машин судно, как уже говорилось, начинает разворачиваться под действием ветра.

В разделе о дрейфе судна «на стопе» рассматривался только случай установившегося движения, представляющий интерес для определения места судна, лежащего в дрейфе. Движение судна под действием ветра с остановленными машинами, предшествующее установившемуся дрейфу, тогда не рассматривалось, так как промежуток времени от начала дрейфа до установившейся скорости судна мал, смещение его также невелико, и это не может существенно сказаться на точности определения в открытом море по рассчитанной скорости дрейфа. Но исследование неустановившегося участка дрейфа судна с остановленными машинами представляет интерес для повышения безопасности плавания судна в штормовую погоду и повышения безопасности различного рода маневров, осуществляемых на ограниченных водных акваториях, узких проливах, заливах, бухтах, рейдах, с большим количеством стоящих на якорях судов и, наконец, на акватории порта.

Для практических целей представляется интересным определить время, необходимое для предельного разворота судна по отношению к ветру при различных значениях скорости его, и величину поступательного смещения за время разворота. Значение этих величин необходимо для безопасности маневрирования при постановке на якорь и снятии с якоря.

Кроме того, время полного разворота надо знать и для определения допустимого перерыва в работе машин в штормовую погоду, в течение которого судно еще не встанет в наиболее опасное положение — лагом к волне.

Мы не будем приводить здесь всего решения дифференциальных уравнений движения судна для такого случая движения, а дадим лишь окончательный вид формул для нахождения элементов движения судна.

Если учесть незначительную кривизну траектории движения центра тяжести судна при дрейфе «на стопе», допустить независимость поступательного движения от движения вращательного, то при условии изменения составляющих по нормали к диаметральной плоскости сил R и A по синусоидальному закону формула для вычисления поступательной скорости движения будет выглядеть так:

$$V_0 = V \sqrt{\frac{Q_1}{Q_2}} \operatorname{th} \frac{V}{m} \sqrt{Q_1 Q_2}\, t, \qquad (105)$$

где:

$Q_1 = C_{y(90^\circ)} S_{(90^\circ)} \rho/2$; $Q_2 = C_{0y(90^\circ)} S_{0(90^\circ)} \delta_0/2$;

m — масса судна (включая и присоединенную массу);

V — скорость ветра (по измерениям на судне).

Гиперболический тангенс очень быстро стремится к своему пределу, следовательно, скорость движения центра тяжести достигает своего близкого к установившемуся значения в течение очень короткого промежутка, и во всяком случае значительно меньшего, чем тот, который требуется для полного разворота судна под действием ветра. Следовательно, скорость движения центра тяжести судна при дрейфе «на стопе» с разворотом принимает

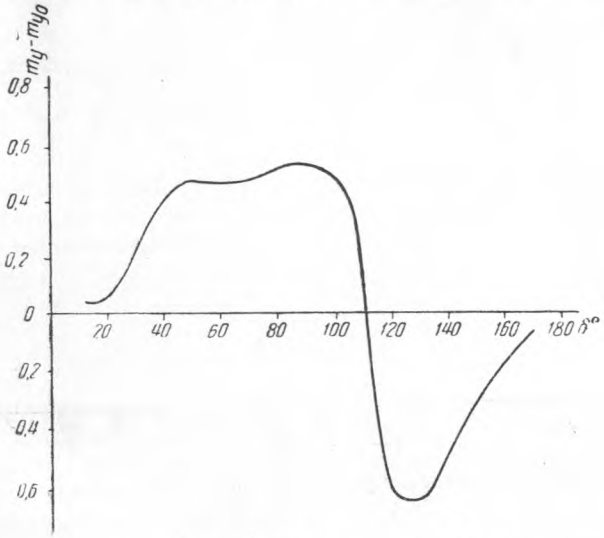


Рис. 146. Зависимость $m_y - m_{y_0}$ от δ

установившийся характер практически в самый начальный период его и затем в течение всего разворота и последующего за ним движения с предельным углом к ветру центр тяжести судна смещается с постоянной скоростью.

Исходя из тех же предположений и допущений, рассмотрим теперь уравнение моментов, чтобы проследить за картиной разворота судна вокруг оси, проходящей отвесно через центр тяжести. Но прежде чем перейти к этому, выясним, как меняется сумма моментов Yb, Y_0a, заставляющих судно вращаться, и как выражается при таком движении вращательная часть момента силы сопротивления $\mathfrak{M}$.

Изменение разности длин плеч составляющих Y, Y_0 изображено на рис. 120. На рис. 146 показано, как изменяется величина разности коэффициентов моментов $m_y - m_{y_0}$ при изменении δ. Сложность вида этой зависимости и большая роль в определении

ее, принадлежащая индивидуальным особенностям архитектуры судна, делают нецелесообразным в рассматриваемой задаче отыскание ее аналитического выражения. Характерная для большинства судов черта этой зависимости — незначительное изменение ее при углах δ от 50 до 100°, а для некоторых судов — от 95 до 160°. Приблизительно такой же характер изменения наблюдается и для величины суммы моментов составляющих Y, Y_0. Это косвенным образом подтверждается и постоянством угла наклона кривой (при δ от 20 до 85°) на рис. 147, изображающей изменение угла разворота судна в зависимости от времени, наблюденное в натурных условиях. При некотором угле δ, близком к 90°, раз-

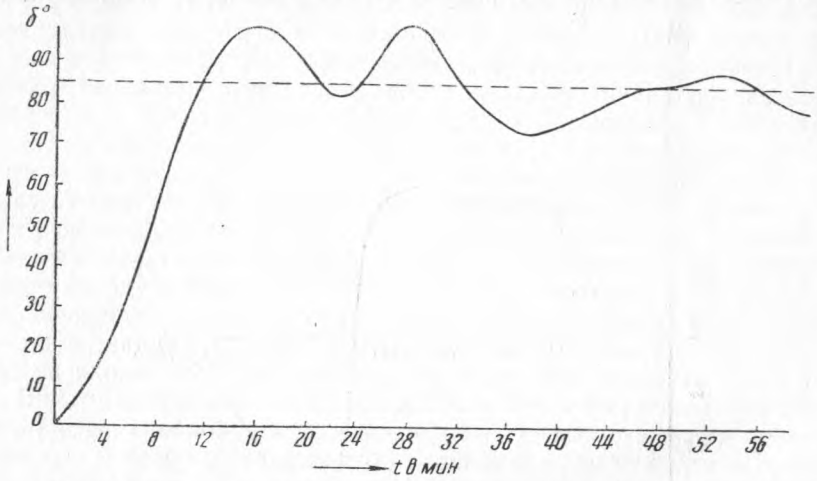


Рис. 147 Кривая изменения угла δ при развороте судна «на стопе» под действием ветра

ность $m_y - m_{oy}$ почти мгновенно меняет знак. В областях изменения углов δ, близких к 0 и 180°, характер изменения величины $m_y - m_{oy}$ мало исследован.

Из сказанного следует, что если рассматривать разворот судна — уваливание по ветру, исключив при этом область, близкую к $\delta = 0°$, то в уравнении моментов сумму двух первых членов его можно считать постоянной величиной, равной среднему значению ее для исследуемой области изменения углов δ. Так как скорость движения центра тяжести судна мала, будем считать, что вращательная часть момента силы сопротивления воды движению судна не зависит от V_0 и равна величине момента силы сопротивления, оказываемого водой вращению судна вокруг неподвижной оси, проходящей отвесно через центр тяжести.

Если предположить, что в таком случае сопротивление воды вращению элемента поверхности диаметральной плоскости пропорционально площади этого элемента и квадрату линейной скорости при вращении, то после решения уравнения моментов фор-

мула для вычисления угловой скорости вращения судна имеет такой вид (при условии, если начальная скорость вращения была равна нулю):

$$\omega = \sqrt{\frac{(N+N_0)_{cp}}{\varepsilon d}}\ \text{th}\ \frac{\sqrt{(N+N_0)_{cp}\,\varepsilon d}}{I_z}\,t, \qquad (106)$$

где: $d = S_{0(90^\circ)}\,L_0^3$; ε — коэффициент, зависящий от вида сечения подводной части судна диаметральной плоскостью; $(N+N_0)_{cp}$ — среднее значение суммы вращающих моментов сил A и R; I_z — момент инерции судна.

Из этого уравнения видно, что скорость вращения судна под действием ветра, точно так же, как и скорость дрейфа, быстро достигает своего установившегося значения и дальнейший разворот совершается с постоянной скоростью. Напишем теперь формулу для вычисления угла разворота судна ($\varphi_0 = 0$):

$$\varphi = \frac{I_z}{\varepsilon d}\,\text{lnch}\,\frac{\sqrt{(N+N_0)_{cp}\,\varepsilon d}}{I_z}\,t. \qquad (107)$$

Считая предельный угол разворота известным и равным $\varphi_{\delta\,пред}$, можно найти время, необходимое для разворота, решив уравнение (107) относительно t:

$$t = \frac{\text{arch}\,e^{\frac{\varphi_{\delta пред}\,\varepsilon d}{I_z}}}{\sqrt{(N+N_0)_{cp}\,\varepsilon d}}\,I_z. \qquad (108)$$

2. Обратимся теперь к примеру. Наблюдения за разворотом судна, по которым будем проверять φ, ω, V_0, t, полученные по формулам (106), (107), (108), производились во время испытаний, упоминавшихся ранее. Разворот судна определялся по изменению курса, дрейф — тщательной обсервацией по трем пеленгам и двум углам. Кроме того, по окончании наблюдений общая величина дрейфа была определена по показаниям лага. Для этого судно на встречных курсах дважды прошло расстояние между точками, соответствующими началу и концу наблюдений, отмеченными буйками во время дрейфа. Снос судна течением был исключен по данным вертушечных наблюдений, производившихся со стоящего на якорях в районе работ катера.

Геометрические размеры, положение центра тяжести и водоизмещение судна, на котором производились испытания, таковы: $L_0 = 70$ *м*, $\frac{S_{(90^\circ)}}{S_{0(90^\circ)}} = 15{,}55$, расстояние от носового перпендикуляра до центра тяжести $l_z = 27$ *м*, масса судна $m = 75\,000$ *кг*. Присоединенную массу (10% массы судна) — 7500 *кг* прибавим для простоты вычислений к m. Определим установившуюся скорость дрейфа и время, необходимое для достижения этой скорости. Коэффициенты сопротивления для подводной и надводной части были взяты из результатов продувок судна, сходного с испытуемым.

Согласно формуле (105) скорость достигает своего предельного значения при $t=\infty$, тогда

$$V_{0макс}=V\sqrt{\frac{Q_1}{Q_2}}. \qquad (109)$$

Подставив в это уравнение значения Q_1 и Q_2, равные соответственно $C_{y(90°)}S_{(90°)}{}^{\rho}/_{2}$ и $C_{y\,(90°)}S_{0(90°)}{}^{\rho_0}/_{2}$, для скорости ветра 8 *м/сек*, имевшей место при испытаниях, получим следующее значение максимальной скорости: $V_{0макс}=0{,}38$ *м/сек*.

Чтобы определить время, в течение которого скорость практически достигает своей установившейся величины, приравняем выражение, стоящее под знаком гиперболического тангенса, единице:

$$\frac{V}{m}\sqrt{Q_1\cdot Q_2}\,t_{V_{0макс}}=1, \qquad (110)$$

откуда, сделав необходимые преобразования и подставив значения входящих в эту формулу величин, найдем

$$t_{V_{0макс}}=\frac{m}{V\sqrt{Q_1\cdot Q_2}}=15{,}7 \text{ сек.}$$

На рис. 146 показан ход разворота судна под действием ветра в зависимости от времени t. Оказывается, что предельного угла разворота, равного 85°, судно достигло через 12 минут после начала разворота. Сопоставив это время с $t_{V_{0макс}}$, убеждаемся в допустимости предположения о постоянстве скорости дрейфа при развороте судна под действием ветра.

Предположим теперь, что коэффициент сопротивления вращению судна равен коэффициенту сопротивления подводной части при движении по нормали к диаметральной плоскости. Тогда коэффициент ε оказывается равным $\varepsilon=C_{0(90°)}{}^{\rho_0}/_{2}=0{,}95\cdot\frac{102}{2}\cong 48$, среднее значение суммы вращающих моментов сил A и R, если не учитывать область углов δ, близкую к 0°, можно приближенно принять равным 9000 *кгм*. Подставив эти значения, а также значения $C_{0(90°}$ в формулу (106) и положив второй сомножитель равным единице, найдем установившееся значение угловой скорости вращения судна:

$$\omega_{макс}=17{,}5\cdot 10^{-4} \text{ радиан/сек.}$$

Предельный угол разворота судна равен 85° или при измерении в радианах 1,48.

Следовательно, для того чтобы приближенно определить время, необходимое для полного разворота, надо это значение разделить на $\omega_{макс}$:

$$t_{\varphi\,\delta\,пред}=\frac{1{,}48}{17{,}5\cdot 10^{-4}}=845 \text{ сек.}\cong 14 \text{ мин.}$$

Сравнивая полученный результат с действительностью (см. рис. 146), убеждаемся в близком совпадении фактического времени полного разворота с рассчитанным, а следовательно, в справедливости полученных формул и принятых допущений.

Время полного разворота можно более точно определить по формуле (108).

Если в формуле (106) выражение, стоящее под знаком гиперболического тангенса, приравнять единице, то точно так же, как это было сделано при определении момента наступления установившейся скорости дрейфа, можно подсчитать время наступления установившейся скорости вращения судна:

$$t_{\omega_{макс}} = \frac{I_z}{\sqrt{(N+N_0)_{ср} \cdot d}}. \qquad (11\,1$$

Предположим, что у исследуемого судна при массе 75 000 *кг* элементы масс расположены так, что при определении момента инерции их можно заменить общей массой (с включением присоединенной массы), сосредоточенной на расстоянии 20 *м* от вертикальной оси, проходящей через центр тяжести судна.

Тогда

$$I_z = mr^2 = 82\,500 \cdot 20^2 = 33 \cdot 10^6.$$

После подстановки в формулу (111) найденных значений всех входящих в нее величин окажется, что

$$t_{\omega_{макс}} \cong 65 \text{ сек.}$$

Кривая изменения курсового угла ветра при развороте судна (см. рис. 146) подтверждает и этот вывод. Действительно, крутизна ее в течение всего разворота меняется незначительно.

В заключение обратимся к рис. 106 и 107, на которых нанесены траектория движения центра тяжести судна и положение его диаметральной плоскости.

Кривизна траектории в самом деле значительна лишь в начале разворота. Направление дрейфа приблизительно совпадает с направлением ветра. Если участок траектории, заключенный между точками, соответствующими началу и концу разворота ($t_0 = 8^h30'$; $t_1 = 8^h52'$) разделить на время, в течение которого судно перемещалось между ними, то средняя скорость окажется равной 0,35 *м/сек*. Сравнивая ее с рассчитанной скоростью, видим, что скорость дрейфа судна с остановленными машинами при различных курсовых углах ветра можно приближенно считать постоянной.

Определим теперь общий характер зависимостей $t_{\omega_{пред}}$, $\omega_{макс}$, $t_{\omega_{макс}}$, $V_{0макс}$, $t_{V_{0макс}}$ от скорости ветра, геометрических размеров судна и его водоизмещения.

Из формул (106), (110), (111) видно, что скорость дрейфа прямо пропорциональна скорости ветра, а скорость вращения прямо пропорциональна скорости ветра и скорости дрейфа судна.

Если $V_{0макс}$ зависит только от отношения коэффициентов и площадей надводной и подводной парусности, то $\omega_{макс}$ зависит, кроме того, от длины судна. С увеличением длины суда $\omega_{макс}$ уменьшается заметно, $t_{V_0\,макс}$, $t_{\omega\,макс}$ при увеличении скорости ветра уменьшаются, увеличение же массы и момента инерции приводит к увеличению их. Точно так же и время, необходимое для полного разворота судна, будет уменьшаться с увеличением скорости ветра и увеличиваться с увеличением водоизмещения судна. Кроме того, из судов одинакового водоизмещения предельного угла разворота быстрее достигнет тот, длина которого будет меньше.

3. В заключение рассмотрим еще один случай вращения судна. В данном случае имеется в виду вращение судна по инерции, затухающее вследствие сопротивления, оказываемого водой. Сопротивление, оказываемое вращению воздухом, как и в предыдущих случаях, учитывать не будем.

Выражение для угловой скорости такого вращения запишется так:

$$\omega=\frac{\omega_0}{1+\omega_0\theta t}, \tag{112}$$

где $\theta=\frac{kL_0^3S_{0(90°)}}{I_z}$.

Формула показывает, что ω будет равно нулю, когда $t=\infty$, но в то же время видно, что ω с течением времени довольно быстро уменьшается, и если положить $\theta\cong 10$, то уже в первые 10 секунд ω будет составлять меньше $^1/_{100}$ своей начальной величины ω_0.

При составлении уравнения для силы сопротивления воды был принят квадратичный закон, но этот закон справедлив лишь для значительных скоростей, Поэтому формула (112) при скоростях, близких к нулю, строго говоря, теряет силу, а для выяснения дальнейшего поведения судна требуется дополнительное исследование. Но для практических целей можно пользоваться и этой формулой. Выражение для угла разворота при таком движении, если положить, что при $t=0$ $\varphi=0$ выглядит так:

$$\varphi=\frac{1}{\theta}\ln(1+\omega_0\theta t). \tag{113}$$

t для вычисления φ необходимо определять из уравнения (112) на основании принятых допущений о пределах применения этой формулы.

Формулы типа (112), (113), а также формулы для расчета рыскания при различных условиях могут быть использованы для определения неустановившихся поступательных движений судна при швартовке в ветреную погоду.

Так как уравнения для поступательного движения формально имеют такой же вид, как и уравнения для вращательных дви-

жений, то в этих формулах надо будет лишь заменить моменты силами, угловую скорость — линейной, угол φ —расстоянием, момент инерции—массой. Конечно, соответственно надо брать и коэффициенты сопротивления для поступательного движения.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ДРЕЙФА И РЕГИСТРАЦИЯ УХОДА СУДНА С КУРСА ВСЛЕДСТВИЕ ДРЕЙФА И РЫСКАНИЯ СУДНА

§ 1. СПОСОБ РЕГИСТРАЦИИ УХОДА СУДНА С КУРСА. ОПРЕДЕЛИТЕЛИ УГЛА ДРЕЙФА. ГРАДУИРОВКА ОПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ ПУТЕМ НАБЛЮДЕНИЙ В НАТУРЕ

1. Наряду с расчетными способами определения угла дрейфа и ухода с курса вследствие зарыскивания большое значение имеют инструментальные способы, позволяющие непрерывно регистрировать эти элементы движения.

Преимущество таких способов заключается не только в быстроте определения, но и в том, что таким образом удается регистрировать дрейф и рыскание, непрерывно учитывая меняющиеся факторы, определяющие характеристики движения. Кроме того, появляется возможность по показаниям прибора получать сразу величину смещения с линии заданного курса.

Действительно, рассмотрим малый отрезок траектории движения центра тяжести судна, для которого элементы движения — угол дрейфа, угол рыскания и скорость движения — можно считать не меняющимися (рис. 148). Ось x на этом рисунке совпадает с направлением заданного курса судна. Если выразить величину отклонения от курса ΔY за время, в течение которого судно перемещается из точки O в точку D, угол рыскания через φ, угол дрейфа β и составляющую скорости движения вдоль диаметрали, определенную лагом, $u_{лаг}$, то окажется

$$\Delta Y = u_{лаг}\,\Delta t\,(\sin\varphi + \operatorname{tg}\beta\cos\varphi). \qquad (114)$$

Таким образом, если рассматривать всю кривую движения центра тяжести корабля (рис. 148, *б*), то уход судна с курса за любой промежуток времени от t_1 до t_2 определится графически (как это было показано в главе третьей, раздел 3, § 2) площадью, ограниченной кривой $\sin\varphi + \operatorname{tg}\beta\cos\varphi$, осью S и координатами кривой в моменты t_1 и t_2. Следовательно, если на ленте, сматывающейся пропорционально расстоянию, пройденному по показаниям лага, непрерывно откладывать меняющуюся величину $\sin\varphi + \operatorname{tg}\beta\cos\varphi$, то по записанной на ленте кривой с помощью планиметра легко получить величину смещения судна с курса. Для этого найденную площадь необходимо умножить на некоторый переводный коэф-

фициент K, зависящий от масштаба величины $\sin\varphi + \operatorname{tg}\beta\cos\varphi$ и пройденного пути S.

Из рис. 148,*а* видно, что таким же путем можно определить и проекцию смещения судна на линию заданного курса, т. е. вторую координату положения центра тяжести судна. Для этого на ленте должна откладываться величина $\cos\varphi - \operatorname{tg}\beta\sin\varphi$, тогда

$$\Delta x = u_{лаг}\,\Delta t\,(\cos\varphi - \operatorname{tg}\beta\sin\varphi). \qquad (115)$$

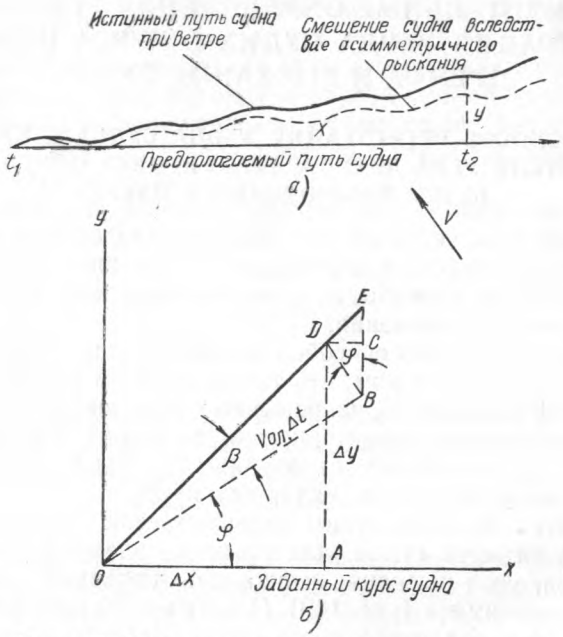


Рис. 148. Уход судна с курса вследствие дрейфа и рыскания

Это обстоятельство значительно повышает ценность прибора, построенного на этом принципе, так как появляется возможность определять положения судна после движения на переменных курсах, когда прокладка практически невозможна, причем определение места во время движения на переменных курсах будет производиться с учетом угла дрейфа.

Неудобства, связанные с необходимостью планиметрировать площади на ленте, очевидны. Они заключаются не только в сложности делать это в условиях плавания, но и в большом объеме этой работы, так как лента, сматываемая прибором, будет измеряться метрами и десятками метров.

Чтобы избежать этих неудобств, сделать прибор пригодным для работы в любых условиях плавания и могущим давать сведения о координатах судна без дополнительных вычислений в любой момент времени, в приборе устанавливается механический плани-

метр. При таком дополнении координаты судна указываются стрелками на двух циферблатах прибора, деления которых градуированы в метрах или долях кабельтова. В момент включения прибора на карте должна быть нанесена точка, соответствующая местоположению судна, и проведена линия курса (ось x) судна и линия, перпендикулярная ей (ось y). Показания одного из циферблатов будут давать проекцию смещения по оси x, другого — смещения по оси y. Стрелки на циферблате могут вращаться в обе стороны. Движение стрелки вправо или влево от нуля одного из циферблатов соответствуют смещению судна вправо или влево от оси x, а аналогичное движение стрелки другого циферблата — смещению судна вправо и влево относительно оси y.

Такое свойство прибора позволяет, кроме всего, использовать его в качестве индикатора курса судна. Действительно, допустим, что судно ушло на некоторое расстояние вправо от линии заданного курса. Тогда стрелка счетчика отклонится на некоторое число делений вправо от нуля. Чтобы вернуть судно на линию заданного курса надо, положив руль на левый борт, следить, когда стрелка счетчика, вращаясь теперь уже в левую сторону, достигнет нуля. Это и укажет, что судно вновь находится на прежней линии курса.

2. Как видим из описания принципиальной стороны регулирующей части прибора, для ее работы необходимо иметь на судне указатель пройденного пути, указатель курса и указатель угла дрейфа. Два первых указателя имеются почти на всех современных судах—это компас или гирокомпас и механический лаг. Определение пройденного пути и курса ведется с помощью этих приборов с достаточной точностью, и показания их могут быть использованы для приведения в действие соответствующих деталей регистрирующей части. Менее благополучно до последнего времени обстояло дело с определителем угла дрейфа. До последнего времени мы не располагали надежным указателем угла дрейфа судна, хотя попытка создать такой прибор предпринималась неоднократно.

Из предложенных в различное время приборов для определения угла дрейфа судна следует указать, во-первых, на флюгарку, помещаемую на кронштейне перед форштевнем, во-вторых, на буксируемое за кормой обтекаемое тело, в-третьих, на центробежно-инерционный указатель угла дрейфа и, наконец, указатель, позволяющий определить угол дрейфа по отношению скоростей бокового смещения и смещения вдоль диаметрали, измеряемых либо крылатками, либо гидродинамическими измерителями скорости.

Но все эти приборы обладают рядом недостатков, которые и помешали их широкому распространению на флоте.

Флюгарки пригодны лишь для измерения больших углов дрейфа и при условии отсутствия волнения. Уже незначительная бортовая и вертикальная качки судна делают показания флюгарки не-

определенными. Буксируемое за кормой обтекаемое тело должно отклоняться от диаметральной плоскости судна в направлении истинного смещения судна. Но чувствительность такого прибора, как показали испытания, оказалась очень небольшой. Кроме всего, показания прибора заметно искажаются рысканием судна.

Центробежно-инерционный указатель угла дрейфа свободен от недостатков описанных выше приборов. В основе этого прибора лежит измерение угла отклонения плоскости колебания маятника, подвешенного на движущемся судне. Маятник будет совершать колебания под действием силы инерции и центробежной силы, так как судно фактически находится в неустановившемся, периодически изменяющемся режиме движения на пологих циркуляциях в их начальный период, обусловленном рысканием. Но прибор этот дает плохие показания на малых судах из-за невозможности полностью избавиться от влияния вертикальной и бортовой качки.

На больших же судах его использованию препятствует бо́льшая равномерность их движения.

Неудачным оказался и последний из перечисленных нами способов измерения угла дрейфа. Дело в том, что слишком различны величины боковой и вдоль диаметрали скорости смещения. Это различие не позволяет определить их с одинаковой точностью, что необходимо для определения угла дрейфа. Данный способ определения не свободен также от значительных погрешностей, вызываемых вертикальной и бортовой качкой судна.

В отношении всех описанных выше способов следует сказать также, что они не безразличны к тому, где на судне будет расположен приемник угла дрейфа.

Здесь уместно также остановиться на зависимости величины угла дрейфа от места установки приемника.

Величина угла дрейфа в общем случае определяется отклонением вектора скорости движения судна от диаметральной плоскости его. Но при движении с поворотом или рысканием линейная скорость каждой точки судна складывается из линейной скорости поступательного движения и линейной скорости вращательного движения соответствующей точки судна. Так как радиусы вращения различных точек судна вокруг центра тяжести различны, то и линейные скорости их вращения и углы дрейфа в них будут различны. На рис. 149 видно, что при перемещении от центра тяжести к корме угол дрейфа увеличивается, при перемещении же в нос — угол дрейфа уменьшается, причем существует такая точка, где угол дрейфа равен нулю.

Так как для определения места судна интерес представляет лишь угол дрейфа в центре тяжести, то и приемники надо располагать по возможности ближе к центру тяжести судна.

3. Некоторые особенности гидродинамического режима подводной части судна при наличии угла дрейфа, обнаруженные при продувках моделей с поворачивающимся рулем, указали на возможность использования в качестве указателя угла дрейфа самого

пера руля. Такой способ определения угла дрейфа выгодно отличается от других тем, что не требуется дополнительных устройств на подводной части судна, а дополнительные устройства в системе рулевого управления очень просты. Большинство недостатков, связанных с движением судна в реальных условиях, отличавших изложенные выше способы, либо сведены до минимума, либо совсем отсутствуют.

Из продувок моделей подводной части судна известно, что нейтральное положение пера руля (положение, при котором вращающий момент силы $R_{корп+руль}$ равен нулю) изменяется в зависимости от величины угла дрейфа. Эта особенность гидродинамического режима подробно рассматривалась в главах второй и четвертой и легко обнаруживается из графиков продувок, приведенных на рис. 82, 83, 84.

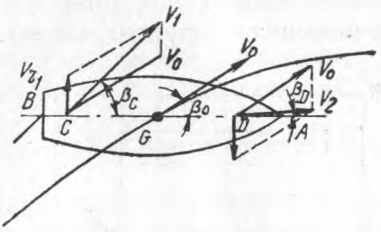


Рис. 149. Величины циркуляционного угла дрейфа для различных точек на судне

Зависимость между углом дрейфа и нейтральным положением пера руля оказывается для большинства судов однозначной и очень мало зависящей от других элементов движения.

Следовательно, если располагать для данного судна зависимостью $i_{m=0}=J_{(\beta)}$, то по наблюдениям нейтрального положения пера руля можно будет определять угол дрейфа.

Исключением являются суда специальных типов, у которых одному значению угла дрейфа соответствуют два нейтральных положения пера руля. Но указанное исключение является крайне редким, кроме того, оно отчетливо отображается на графиках и всегда может быть учтено.

Зависимость $\beta=J_{(i_{m_0=0})}$, построенная по данным, взятым из рис. 82, 84, изображена на рис. 150, 151. Как видим, при малых углах β она близка к линейной и отличается для различных судов лишь наклоном почти прямолинейного начального участка зависимости. Таким образом, мы видим, что определение угла дрейфа указанным способом сводится при наличии найденной путем продувок зависимости $\beta=J_{(i_{m_0=0})}$ к нахождению нейтрального, т. е. среднего положения пера руля во время движения судна. Если штурман не располагает для своего судна зависимостью $\beta=J_{(i_{m_0=0})}$, то ее можно найти путем несложных маневров на данном судне.

Нейтральное положение пера руля легко определять по динамометру, включенному в рулевые тяги. Такому положению пера руля соответствует нулевое показание динамометра. В этот момент и следует фиксировать по указателю пера руля угол его отклонения от положения, совпадающего с плоскостью диаметрали.

Нейтральное положение можно определять так же, как и среднее положение из некоторого равного числа наблюдений за максимальными правыми и левыми отклонениями пера руля. Действительно, рулевой, стремящийся удержать непрерывно рыскающее судно на курсе, будет при наличии угла дрейфа осуществлять перемещение положения пера руля не около направления, совпадающего с плоскостью диаметрали, как это было бы в случае отсутствия дрейфа, а около некоторого иного положения.

Самый простой способ — это непосредственные наблюдения и последующие вычисления среднего значения. При этом сначала подсчитываются средние значения правого и левого отклонения из 20—30 наблюдений, а затем — среднее положение с учетом знака отклонения — «право», «лево».

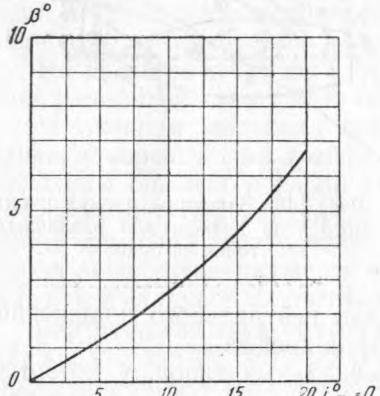


Рис. 150. Зависимость $\beta=J(i_{m_0=0})$ для бригантины

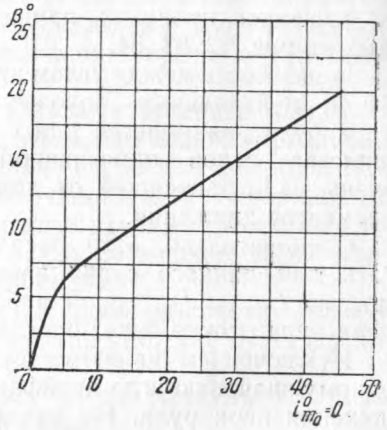


Рис. 151. Зависимость $\beta=J(i_{m_0=0})$ для быстроходного судна

Можно рекомендовать пользоваться для определения среднего значения i каким-либо осреднителем. Два таких осреднителя были испытаны при проверке этого способа в натурных условиях. Один осреднитель работал на принципе демпфирования. Вращение диска со стрелкой, подвешенного в цилиндре на бифиляре к планке на оси, повторяющей отклонения пера руля, демпфировались маслом. Второй испытанный способ осреднения был инерционный. Небольшой электрический двигатель непрерывно менял число оборотов пропорционально углу поворота пера руля. Среднему положению его соответствовала некоторая средняя скорость вращения. Чтобы определить ее, на ось двигателя был насажен тяжелый маховик.

Недостатком таких способов определения является то, что на средней величине сказывается время нахождения руля в правом и левом положениях, т. е. временная асимметрия, в то время как для поставленной задачи осреднять надо только по положению пера

руля. Но испытания показали, что вносимая таким образом при систематической временной асимметрии погрешность невелика, а для того чтобы исключить ее во время определения $i_{m_1=0} = i_{ср}$, рулевой должен стараться держать руль на правом и левом отклонении одинаковое время . Так как определения β производятся не часто,— это не представляет сколько-нибудь серьезных осложнений работы рулевого.

Все перечисленные способы определения пригодны лишь в том случае, когда после определения $i_{m_0=0}$ угол дрейфа β находят по графикам.

Использовать эти способы для работы прибора, регистрирующего уход судна с курса вследствие дрейфа и рыскания, нельзя, так как при непрерывной регистрации два последних способа осреднения повлекут за собой ошибку на временную асимметрию положения пера руля, возникающую вследствие действия на судно постоянного ветрового момента.

Чтобы избежать этой ошибки, для регистрации следует пользоваться другим способом.

Прибор механическим путем определяет и некоторым указателем отмечает среднее отклонение пера руля из каждой пары максимальных отклонений вправо и влево. Это среднее положение удерживается в течение полного постоянного периода колебания пера руля, соответствующего полному постоянному периоду рыскания, и затем мгновенно перемещается на новое среднее положение, соответствующее новой паре отклонений. Повторное осреднение средних положений для каждой пары отклонений теперь уже может производиться любым путем, так как влияние временной асимметрии исключено. Но при работе описанного выше регистратора нет необходимости делать повторные осреднения, так как эта операция осуществляется автоматически при планиметрировании.

Найденные таким путем значения $i_{m_0=0}$ на основании известной зависимости $i_{m_0=0}=I_{(\beta)}$ преобразуются механическим путем в значения β° и в таком виде даются в регистратор, где соответствующие механизмы откладывают значения кривых, изображаемых формулами (114), (115).

Теперь дадим описание способа определения зависимости $i_{m_0=0}=J_{(\beta)}$ натурными наблюдениями.

Проходя около точки A (рис. 152), отмеченной сброшенным буйком или каким-либо постоянным гидрографическим знаком, судно должно лечь курсом на какой-нибудь хорошо видный знак на берегу, но так, чтобы курсовой угол ветра по возможности был равен 90°.

Дальнейшее движение судна по отмеченному в точке A курсу должно соблюдаться строго по компасу, и поэтому для большой объективности следует сделать невозможным для рулевого видеть знак, на который был взят курс. Под действием ветра судно, сохраняя курс, будет смещаться с линии AB. Во время движения необходимо непрерывно записывать величины $\varphi_{пр}, \varphi_{лев}, t_{пр}, t_{лев}$ [для

определения по формуле (96) ухода с линии AB вследствие асимметричного рыскания] и одним из описанных выше способов определять среднее положение пера руля.

Через некоторый промежуток времени, зависящий от размеров водного пространства, на котором проводятся испытания видимости, скорости ветра, с судна сбрасывается буек (точка C). После того как судно вернется в точку A, следует определить по возможности более точно угол CAB, равный $\beta+\beta'$. Исправляя его на величину β', найденную по наблюдениям за рысканием, найдем угол β.

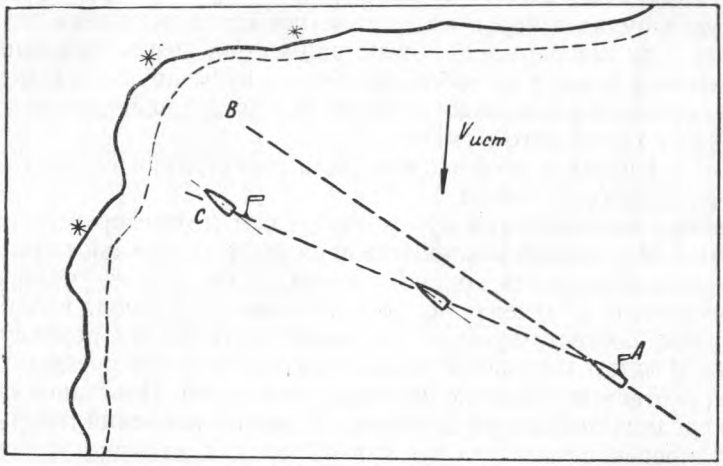


Рис. 152. Определение зависимости β от $I_{(i_{m_0=0})}$ в натурных условиях

Такие маневры повторяются, чтобы получить новые значения $t_{ср}=t_{m_0=0}$ для угла β до 15—20°. Увеличить или уменьшить β можно либо выбирая различные курсовые углы ветра, либо изменяя скорость движения судна.

На основании таких наблюдений и строится зависимость $i_{m_0=0}=J_{(\beta)}$ или $\beta=J'_{(i_{m_0=0})}$, которая будет служить в дальнейшем для определения β.

Повторные определения могут понадобиться лишь в случае серьезной реконструкции подводной части судна, надводной части его или руля. Если судну свойственны движения при резко изменяющихся осадках (танкер), такие наблюдения следует провести для основных из них и найти поправочные коэффициенты.

Следует отметить, что на характер зависимости $\beta=J'_{(i_{m_0=0})}$ влияет в какой-то мере степень обрастания судна.

Если наблюдения ведутся одним из описанных выше осреднителей, то нет нужды строить график найденной зависимости.

Проще шкалу осреднителя градуировать прямо в значениях угла дрейфа, т. е. внести найденную зависимость в шкалу прибо-

ра. Работать с таким прибором будет особенно удобно. Действительно, проградуированный однажды по углам дрейфа он будет в любой момент в дальнейшем указывать непосредственно его величину.

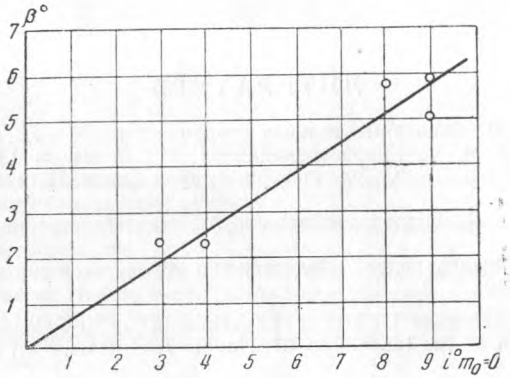


Рис. 153. Зависимость β от $J_{(i_{m_0=0})}$ для катера, определенная в натурных условиях

В заключение приведем пример таких определений, проведенных на небольшом плоскодонном катере, для углов дрейфа до 6°.

Полученная зависимость изображена на рис. 153. Как видим, и для этого катера зависимость $i_{m_0=0}=J(\beta)$ при малых β оказывается практически линейной.

ЛИТЕРАТУРА

Юрьев Б. Н., Экспериментальная аэродинамика, М.—Л., Оборонгиз, 1939.

Алферьев М. Я., Гидроаэромеханика, М., Речиздат, 1952.

Болотников В. Ф., Элементарный курс аэродинамики самолета. М., Оборонгиз, 1950.

Пранттль Л., Гидроаэромеханика, М., Издательство иностранной литературы, 1949.

Шотт К., Физика полета, Издательство технической и теоретической литературы, М., 1942.

Хьюз Г. (Hughes C) Model Experiments on the Wind Resistanse of Ships Transaction of the Institution of Nevel Architects, V.LXXII, 1930, p.p 310 – 329.

Гирс К. В. и Сабиран А. М., Аэродинамические характеристики речных судов, «Судостроение», 1939, № 9.

Фрей К. (Frey K.), Theorie des Segelns mit Abtriftberücksichtigung, Jahbuch der Schiffbautechnishen Gesellschaft, 1929.

Петерсон Е. (Peterson E.) Uber die Shiffsgeschwindigkeit beim Segeln, Schiffbau, Schiffahrt und Hafenbau, N 1, 1932.

Крылов А. Н., Качка корабля, Издательство военно-морской рабоче-крестьянской академии, М.—Л., 1938.

Гусев В. М., Федяевский К. К., Крылов Ю. М., Матусевич Н. Н., Простой приближенный способ определения угла дрейфа самоходного судна, Труды Государственного Океанографического института, вып. 9, Гидрометиздат, М.—Л., 1946.

Жуковский Н. Е., Полное собрание сочинений, т. IV, ОНТИ, НКТП СССР, Главная редакция авиационной литературы, М.—Л., 1937.

Кусков П. Ф., Влияние ветра и состояния моря на скорость пароходов. Журнал «Записки по гидрографии», т. XXVIII. Санкт-Петербург, Главное Гидрографическое управление, 1907.

Струйский Н. Н., Скорость хода судна в свежую погоду, Главное управление ВМС РККА, Л., 1932. Журнал «Записки по гидрографии», № 4.

Басин А. М., Устойчивость на курсе и управляемость самоходного судна. Сборник работ по гидромеханике судна, ЦНИИВТ, Государственное издательство технической и теоретической литературы, Л.—М., 1939.

Федяевский К. К., Материалы по аэродинамическому расчету воздушных кораблей. Часть III, Труды ЦАГИ, выпуск 225, М., 1936.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

От издательства 3
Введение 5
Глава первая. Некоторые вопросы гидроаэромеханики . . . 13
§ 1. Предмет гидроаэромеханики 13
§ 2. Движение жидкостей и сопротивление, оказываемое жидкостями движению тел 16
§ 3. Моделирование движения тел в жидкости и законы подобия 35
§ 4. Постановка экспериментальных исследований с моделями 41
Глава вторая. Общие уравнения движения судна и способы определения гидродинамических и аэродинамических сил, действующих на судно 45
§ 1. Общие уравнения движения судна 45
§ 2. Способы определения гидродинамических и аэродинамических характеристик судна 52
Глава третья. Дрейф судна 120
§ 1. Дрейф судна при прямолинейном установившемся движении. Способы определения силы упорного давления винта. Построение дрейфовых графиков и порядок определения угла дрейфа. Проверка способа расчета угла дрейфа и примеры расчета 120
§ 2. Дрейф буксирующего судна 140
§ 3. Дрейф судна с остановленной машиной 146
§ 4. Способы учета влияния волнения и ветрового течения на движение судна 155
Глава четвертая. Рыскливость и ветровое зарыскивание судна
§ 1. Явление рыскливости судна. Причины рыскливости и асимметричного рыскания судна. Вредные последствия рыскливости 158
§ 2. Формулы для вычисления элементов рыскания 170
§ 3. Примеры расчета ухода с курса вследствие асимметричного рыскания 191
§ 4. Меры борьбы с рыскливостью и зарыскиванием . . . 203
Глава пятая. Потеря управляемости судна на малых ходах при ветре и разворот судна «на стопе» 208
§ 1. Потеря управляемости судна на малых ходах при ветре . 208
§ 2. Разворот судна «на стопе» 218
Глава шестая. Инструментальные определения угла дрейфа и регистрация ухода судна с курса вследствие дрейфа и рыскания судна 225
§ 1. Способ регистрации ухода судна с курса. Определители угла дрейфа. Градуировка определителей путем наблюдений в натуре 225
Литература 234

Автор *Александр Михайлович Гусев*

Редактор издательства *В. И. Ананьин*
Корректоры *Е. С. Райхель* и *Э. Т. Санович*
Техн. ред. *А. К. Красная*

Сдано в производство 21/VIII 1954 г.
Подписано к печати 9/XI 1954 г.
Т-05895

Бумага 60×92¹/₁₆—7,375 б. л. = 14,75 печ. л.
Уч.-изд. л. 14. Тир. 3700. Изд. № 575 Зак. 1441

1-я тип. Водтрансиздата, Кожевническая 1-б

По вине автора, спецредактора и издательства допущены следующие опечатки.

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
8	10 сверху	к 1953 году	к 1943 году
9	21 „	определения места радиометодами судна	определения места судна радиометодами
17	3 снизу	давлению 13,6 *кг/см*², 1 *мм* вод. ст.—1 *кг/см*².	давлению 13,6 *кг/м*², 1 *мм* вод. ст.– 1 *кг/м*².
46	2 сверху	δ*м/сек*,	*м/сек*,
92	20 снизу	многих чертежах	многих чертах
101	3 сверху	для продолжительных углов i	для положительных углов i
115	4 „	найдем угол γ_0	найдем угол φ
128	3—4 снизу	Вычисленные значения силы A для различных δ и V рекомендуется наносить в форму, приведенную на стр. 130.	Вычисления значений силы A для различных δ и V рекомендуется производить по форме, приведенной на стр. 130.
133	4 сверху	(см. рис. 95).	(см. рис. 113).
136	12 снизу	Влияние изменения осадки на величину силы R	Влияние изменения осадки на величину силы A
139	6 сверху	д) Курсовой угол кажущегося ветра—1°2	д) Курсовой угол кажущегося ветра—125°
149	11 снизу	По рис. 103	По рис. 121
На стр. 180 вместо „рыскливость“ читать „рыскание“			
200	12 сверху	так как e^{2pt}	так как $e^{2pt}=10$
232	17 снизу	$t_{cp}=t_{m_0}=0$	$i_{cp}=i_{m_0}=0$

Зак. 1441