

**В. В. Рождественский**

# **Динамика подводной лодки**

## **Книга 2**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 656  
ББК 39.1  
В11

**В. В. Рождественский**  
В11 Динамика подводной лодки: Книга 2 / В. В. Рождественский – М.: Книга по Требованию, 2013. – 253 с.

**ISBN 978-5-458-28279-6**

Вопросы динамики подводной лодки при ручном и автоматическом управлении в погруженном положении. Силы, действующие на ПЛ, уравнения движения, методы их решения, критерии устойчивости и маневренности. Автоматическая стабилизация кинематических параметров ПЛ, принципы действия автоматических систем управления движением. Для студентов специальностей «Гидроаэродинамика» и «Судостроение и судоремонт» кораблестроительных вузов и факультетов, аспирантов, инженерно-технических работников конструкторских бюро и институтов судостроительной промышленности.

**ISBN 978-5-458-28279-6**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)



реверса главных движителей при заклинке горизонтальных рулей; 4) увеличение хода при затоплении отсека.

Наиболее просто осуществить одержание ПЛ при возмущениях, вызванных случайными причинами; обычно оказывается достаточной перекладка больших кормовых горизонтальных рулей.

Значительно более сложным является одержание ПЛ при повреждении больших кормовых горизонтальных рулей, особенно, если оно сопровождается их заклиниванием. Естественно, что наиболее опасно заклинивание БКГР на погружение. Однако в боевых условиях опасна также заклинка БКГР на всплытие, так как при этом ПЛ может всплыть и быть обнаружена. Наиболее действенным является совместное использование всех средств — продувания цистерн главного балласта, перекладки неповрежденных кормовых горизонтальных рулей, увеличение хода или использование реверса. Носовые рули в этом случае рассматриваются как дополнительное средство, поскольку из-за большого времени, необходимого на их выдвижение из надстройки, они не могут быть использованы в ряде случаев в момент возникновения аварии. Отметим, что эффективность продувания цистерн главного балласта в большой степени зависит от весового расхода воздуха, подаваемого в цистерну.

Ввиду больших скоростей погружения время прихода ПЛ на предельную глубину оценивается десятками секунд, а время продувания ЦГБ с помощью воздуха высокого давления значительно больше.

В существующих системах воздуха высокого давления эффективное продувание цистерн главного балласта не обеспечивается при скоростях хода свыше 20 узлов. Для повышения эффективности необходимо использование пороховых аккумуляторов давления, обеспечивающих продувание цистерн пороховыми газами за весьма короткий промежуток времени. В этом случае время продувания главного балласта составляет 10—12 сек.

Еще более опасным является повреждение и затопление отсека ПЛ, так как из-за больших ограничений по глубине время одержания сокращается.

Если авария произошла на глубине, равной или большей той, при которой наступает разрушение переборки, то количество поступающей внутрь прочного корпуса воды непомерно возрастает и авария приводит к гибели ПЛ.

Однако аналогичная картина может быть и при аварии на глубине, меньшей предельной по условиям прочности переборок в том случае, если время, необходимое для одержания ПЛ, связано с ограничениями по дифференту. Для предотвращения этого необходимо увеличивать скорость всплытия, которая зависит не только от быстроты продувания водяного балласта, но также и от вертикальной составляющей гидродинамической

реакции при движении ПЛ. Последняя, в свою очередь, определяется углами атаки, дифферента и скоростью движения ПЛ. Таким образом, снятие ограничения по дифференту может ускорить всплытие аварийной ПЛ.

Для оценки возможностей тех или иных противоаварийных средств вводится понятие о критерии эффективности. Для того, чтобы определить этот критерий на основании данных расчетов кинематических параметров движения при постоянных значениях параметра, характеризующего аварию, строятся зависимости

$$\frac{\eta_0}{\eta_{пред}} = f\left(\frac{v_0}{v_{max}}\right),$$

где  $\eta_{пред}$  — предельная глубина погружения;

$\eta_0$  — глубина погружения, на которой происходит одержание;

$v_0$  — скорость хода в момент одержания;

$v_{max}$  — максимальная скорость хода ПЛ.

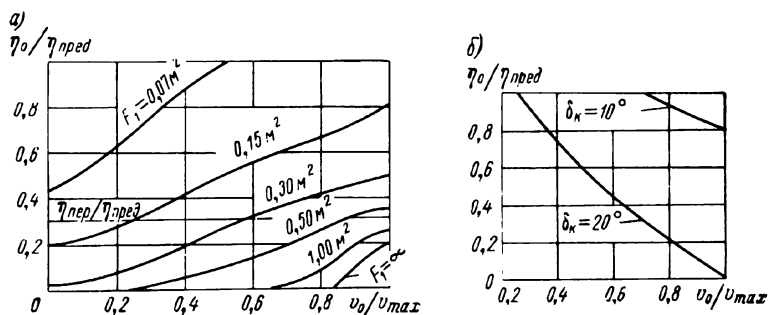


Рис. V.1. Зоны безопасности при одержании ПЛ: а — в случае затопления отсека; б — в случае заклинивания больших кормовых горизонтальных рулей.

Вниз от кривых расположены зоны безопасности

Критерием эффективности служит относительная площадь зоны безопасности, под которой понимается область предельно допустимых значений глубины погружения ПЛ и скорости хода в момент аварии, при которых возможно спасение ПЛ. На рис. V.1 даны кривые предельных значений кинематических параметров при одержании в случаях затопления отсека и заклинивания кормовых горизонтальных рулей, построенные при постоянных значениях площадей пробоев (рис. V.1, а) и при постоянных углах заклинивания кормовых горизонтальных рулей (рис. V.1, б). Зона безопасности на этих рисунках расположена под соответствующей кривой; отношение площади этой зоны к площади прямо-

угольника со сторонами  $\frac{\eta_0}{\eta_{пред}}$  и  $\frac{v_0}{v_{max}}$  называется коэффициентом

том безопасности  $\chi$ . Чем ближе этот коэффициент к единице, тем выше живучесть ПЛ.

Анализируя графики в пределах какой-либо зоны безопасности, можно прийти к выводу о том, что в случае затопления отсека прочного корпуса с точки зрения одержания при определенной пробойне целесообразнее иметь большую скорость движения ПЛ. При аварии, связанной с заклиной рулей, наблюдается обратный эффект — увеличение скорости хода ухудшает возможности одержания ПЛ. Указанное различие объясняется тем, что с ростом скорости при постоянном угле перекладки горизонтальных рулей угол дифферента возрастает пропорционально ее квадрату [см. формулу (IV.3.19)].

Одна из задач подводной непотопляемости — обеспечение всплытия аварийной ПЛ с грунта. В наиболее тяжелом случае, когда не работают движители, по существу единственным противоаварийным средством является продувание главного балласта.

В связи с ограниченным объемом цистерн главного балласта и определенным его распределением по длине ПЛ, зависящим от формы ее корпуса (рис. V.2), всплытие ПЛ с грунта не всегда осуществимо, так как характер всплытия значительно зависит от степени заглубления ПЛ в грунт и его состава.

## § 2. НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ АВАРИЙНОЙ ПЛ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ПЛАВУЧЕСТЬЮ ПРИ ОДЕРЖАНИИ ПО ГЛУБИНЕ И ДИФФЕРЕНТУ

Движение аварийной ПЛ под действием остаточной плавучести является пространственным, оно описывается уравнениями (II.1.4). Как было показано в главе II, эта система при введении некоторых допущений может быть разделена на две системы, соответствующие продольному и боковому движению. Продольное движение не зависит от бокового движения, однако параметры последнего существенно зависят от параметров движения в продольной плоскости.

Остановимся на движении в продольной плоскости и исследуем изменение кинематических параметров аварийной ПЛ при одержании ее по глубине и дифференту. Для решения задачи

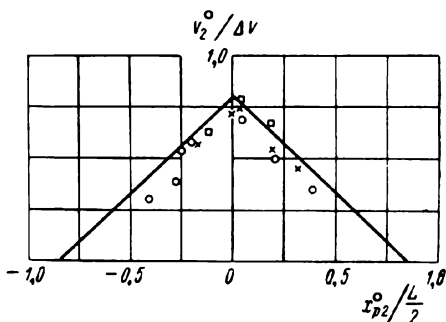


Рис. V.2. Распределение максимальных значений продуваемого относительного объема ЦГБ по длине ПЛ.

Точки относятся к ПЛ различного водоизмещения.

используем систему дифференциальных уравнений (II.3.1), добавив в их правые части выражение для силы и момента плавучести продутых объемов цистерн главного балласта, и выражения (1.2.4), (1.2.25) для определения переменных веса влившейся воды и продутых объемов.

Следует заметить, что возможны два варианта всплытия аварийной ПЛ: 1) одержание и вывод ПЛ на новый балансировочный режим в погруженном положении, 2) одержание ПЛ и всплытие ее на поверхность. Рассмотрим первый вариант всплытия. Уравнения движения, соответствующие этому варианту, имеют вид:

$$\begin{aligned}
 & m(1+k_{11})\dot{v}_x + mk_{12}\dot{v}_y + mV^{1/3}k_{16}\dot{\omega}_{z_1} - m(1+k_{22})v_{y_1}\omega_{z_1} - \\
 & - mk_{12}v_{x_1}\omega_{z_1} - mV^{1/3}k_{26}\omega_{z_1}^2 - T \cos \gamma_B - C_{x_1}(\alpha, \delta) \frac{\rho v^2}{2} V^{2/3} - \\
 & - p_1 \sin \psi + \sin \psi \sum_{i=1}^n p_{2i}; \\
 & m(1+k_{22})\dot{v}_y + mk_{12}\dot{v}_x + mV^{1/3}k_{26}\dot{\omega}_{z_1} + m(1+k_{11})v_{x_1}\omega_{z_1} + \\
 & + mk_{12}v_{y_1}\omega_{z_1} + mV^{1/3}k_{16}\dot{\omega}_{z_1} = T \sin \gamma_B + C_{y_1}(\alpha, \delta) \frac{\rho v^2}{2} V^{2/3} + \\
 & + C_{y_1}^{\omega_{z_1}} \frac{\rho v}{2} \omega_{z_1} V - p_1 \cos \psi + \cos \psi \sum_{i=1}^n p_{2i}; \\
 & m\dot{i}_{z_1}^2(1+k_{66})\dot{\omega}_{z_1} + mV^{1/3}k_{16}\dot{v}_x - mV^{1/3}k_{26}\dot{v}_y - mV^{1/3}k_{26}v_{x_1}\omega_{z_1} - \\
 & - mV^{1/3}k_{16}v_{y_1}\omega_{z_1} = m_{z_1}(\alpha, \delta) \frac{\rho v^2}{2} V + m_{z_1}^{\omega_{z_1}} \frac{\rho v}{2} \omega_{z_1} V^{1/3} - Dh \sin \psi + \\
 & + Te - p_1(x_{p_1} \cos \psi - y_{p_1} \sin \psi) + \sum_{i=1}^n p_{2i}(x_{p_2} \cos \psi - y_{p_2} \sin \psi); \\
 & p_1 = \gamma V_1 = \gamma \mu F \sqrt{2g(\gamma_1 - x_{p_1} \sin \psi)}; \\
 & p_{2i} = \gamma V_{2i} = \frac{10\gamma G_{0i}(1 - e^{-kt})}{\gamma_0 k (\gamma_1 - x_{шп_i} \sin \psi + 10)}; \\
 & \dot{\xi} = v_{x_1} \cos \psi - v_{y_1} \sin \psi; \\
 & \dot{\eta} = v_{x_1} \sin \psi + v_{y_1} \cos \psi.
 \end{aligned} \tag{V.2.1}$$

где  $p_1$  — топящая сила;  $p_2$  — сила плавучести;

$i$  — номер цистерны;

$n$  — число продуваемых цистерн главного балласта.

Эта система должна быть решена по крайней мере для двух случаев: при работающих и неработающих гребных винтах.



Ввиду нелинейного характера системы наиболее рациональным средством ее решения является использование вычислительных машин. Для решения системы (V.2.1) должны быть заданы: водоизмещение, остойчивость подводной лодки, присоединенные массы, весовой расход воздуха, площадь пробоины, начальная глубина погружения, начальная скорость хода (в начале аварии), кривые гидродинамических коэффициентов при больших углах атаки, закон изменения тяги при увеличении скорости хода подводной лодки. Как видно из уравнений, основными характеристическими величинами, оказывающими влияние на течение кинематических параметров подводной лодки (глубину погружения и угол дифферента), являются: количество воды, поступившее в отсек; глубина погружения, на которой произошла авария; предельная глубина погружения, весовой расход газа, используемого для продувания цистерн главного балласта.

Для иллюстрации влияния этих параметров на кинематику подводной лодки рассмотрим численные примеры расчетов, выполненных на ЭВМ для схематизированной подводной лодки среднего водоизмещения.

При расчетах варьировались следующие параметры:  
 скорость хода

$$v = 5; 9; 13 \text{ м/сек};$$

начальная глубина погружения

$$\eta_0 = 20 \div 70; 120 \text{ м};$$

весовой расход воздуха

$$G = 10 \div 100 \text{ кг/сек};$$

площадь пробоины

$$F = 0,3; 0,6 \text{ и } 1,0 \text{ м}^2.$$

При выполнении расчетов на ЭВМ определялись: максимальная глубина погружения лодки  $\eta_m$ ; максимальный угол дифферента  $\psi_m$ ; значение продутного объема ЦГБ  $V_2$ ; время одержания ПЛ до момента обращения в нуль вертикальной скорости.

Углы дифферента в расчетах не ограничивались. Естественно, что в процессе аварии возможно повреждение не только прочного корпуса, но также и движительного комплекса. Поэтому кинематические параметры ПЛ при ее одержании должны быть обследованы как уже указывалось выше, для случаев движения с ходом и без хода.

Рассмотрим сначала результаты расчетов одержания ПЛ без хода. На рис. V.3 а, б; V.4; V.5 даны зависимости глубин погружения и углов дифферента аварийной ПЛ от весового расхода воздуха  $G_0$  при постоянной площади пробоины  $F$ . Расчеты и графики позволяют оценить влияние на величины провалов и дифферентов площади пробоины, начальной глубины погружения, объемов затопленных и продуваемых отсеков и цистерн, координат их центров тяжести по длине. Качественные выводы, которые можно сделать по графикам, сводятся к следующему.

1. Кривые  $\eta_m = \eta_m(G_0)$  ограничены двумя асимптотами, одна из которых — горизонтальная — соответствует глубине погружения, близкой к начальной, а другая вертикальная — некоторому

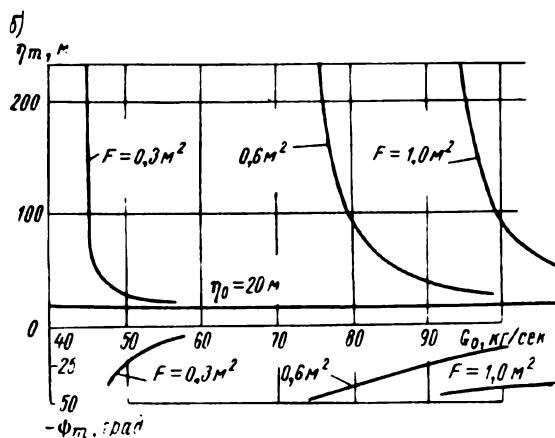
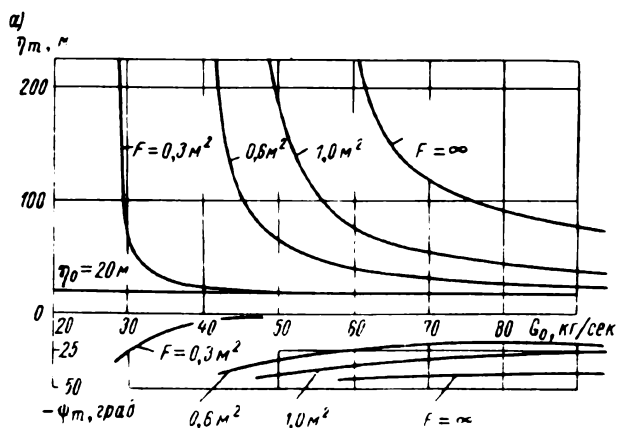


Рис. V.3. Значения максимальной глубины погружения и угла дифферента без хода при различной площади пробной: а —  $p_1 = 130$  т;  $p_2 = 195$  т;  $x_{p_1} = x_{p_2} = 17$  м; б —  $p_1 = 208$  т;  $p_2 = 260$  т;  $x_{p_1} = x_{p_2} = 17$  м.

критическому значению весового расхода  $G_{кр.}$  при приближении к которому одержание ПЛ по глубине становится невозможным.

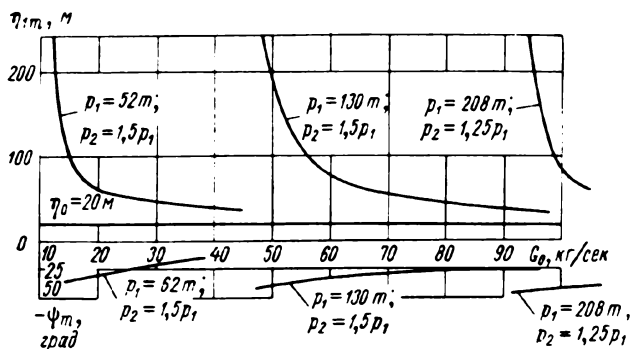


Рис. V.4. Максимальная глубина погружения и угол дифферента при различных объемах затопляемого отсека  $p_1$ .

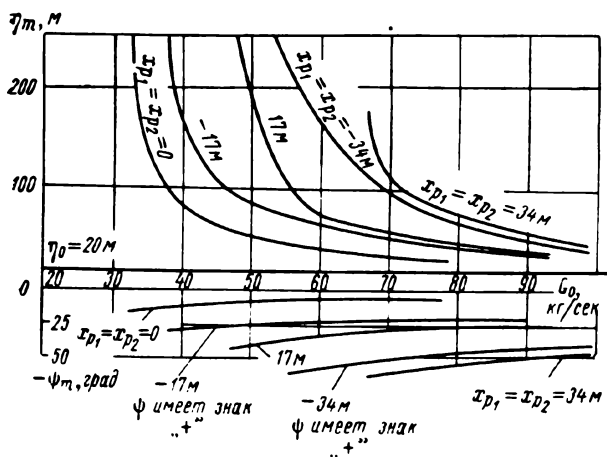


Рис. V.5. Значения максимальной глубины погружения и угла дифферента при различном положении затопляемого отсека по длине.

Для определения  $G_{кр}$  проанализируем формулу для вычисления плавучести, вызванной продуванием цистерн главного балласта,

$$p_2 = \frac{10\gamma G_0(1 - e^{-kt})}{\gamma_0 k (\tau_{шп} + 10)}. \quad (V.2.2)$$

Дифференцируя (V.2.2) по  $t$ , после преобразований получим

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{10\gamma}{\gamma_0} \left[ \frac{G_0 e^{-kt}}{\tau_{шп} + 10} - \frac{G_0(1 - e^{-kt})}{k(\tau_{шп} + 10)^2} \frac{d\tau_{шп}}{dt} \right], \quad (V.2.3)$$

где

$$\tau_{шп} = \tau_i - x_{шп} \sin \psi.$$

Подставляя вместо второго члена в скобках формулы (V.2.3) выражение (V.2.2), имеем

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{10\gamma}{\gamma_0} \frac{G_0 e^{-kt}}{\tau_{шп} + 10} - \frac{p_2}{\tau_{шп} + 10} \frac{d\tau_{шп}}{dt}. \quad (V.2.4)$$

Введем понятие о коэффициенте передува, под которым будем понимать отношение плавучести продутого объема ЦГБ  $p_2$  к весу воды, поступившей в отсек  $p_1$ , т. е.  $\varepsilon = \frac{p_2}{p_1^0}$ . Тогда (V.2.4) можно переписать

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{10\gamma}{\gamma_0} \frac{G_0 e^{-kt}}{\tau_{шп} + 10} - \frac{\varepsilon p_1}{\tau_{шп} + 10} \frac{d\tau_{шп}}{dt} \quad (V.2.5)$$

Предположим, что  $p_2$  имеет наименьшее значение. Тогда, приравняв (V.2.5) к нулю, получим критический весовой расход воздуха

$$G_{кр} = \frac{\gamma_0}{10\gamma} \varepsilon p_1 \frac{d\tau_{шп}}{dt} e^{kt}. \quad (V.2.6)$$

Если весовой расход  $G_0$  больше весового расхода  $G_{кр}$ , определенного по формуле (V.2.6), то одержание ПЛ возможно.

Если  $G_0 < G_{кр}$ , одержание по глубине невозможно.

Расчеты показывают, что коэффициент передува  $\varepsilon = 1,25$ .

2. Кривые  $\psi_m^0 = \psi_m^0(G_0)$  показывают, что с ростом весовых расходов воздуха угол дифферента уменьшается. Максимальное значение  $\psi_m$  составляет в рассматриваемом примере величину порядка  $50^\circ$ .

Следует отметить, что максимальные значения дифферента ограничиваются условиями работы энергетической установки и другого оборудования ( $\psi_m \leq \psi_{дон}$ ). При аварийных дифферентах, больших  $\psi_{дон}$ , возможно смещение механизмов относительно фундаментов и потеря хода ПЛ.

3. Весьма существенно влияние площади пробойны на одержание подводной лодки по глубине. Например, увеличение площади с 0,3 до 0,6 м<sup>2</sup> приводит к необходимости увеличивать расход воздуха от 30 до 50 кг/сек.

4. Начальная глубина погружения весьма существенно влияет на расходы воздуха. С ростом глубины  $\eta_0$  критический расход воздуха резко возрастает.

5. С увеличением объема затопливаемого отсека резко возрастает расход воздуха, необходимого для продувания цистерн.

Кривые рис. V.3—V.5 позволяют сделать вывод о том, что процесс аварийного погружения оказывается более благоприятным при затоплении кормовых отсеков ПЛ. По-видимому, при погружении ПЛ с дифферентом на корму ее оперение создает значительное сопротивление погружению.

Резюмируя сказанное выше, отметим, что эффективное одержание ПЛ без хода от больших провалов с помощью продувания балластных цистерн возможно при больших весовых расходах воздуха высокого давления. В рассматриваемом примере эти расходы находятся в пределах 30—100 кг/сек. Реально возможные весовые расходы воздуха современных ПЛ находятся в пределах 30—50 кг/сек.

Рассмотрим на примере той же ПЛ возможности одержания ее после аварии за счет применения комплекса средств: продувания ЦГБ, перекладки кормовых горизонтальных рулей, изменения числа оборотов гребного винта.

При решении этой задачи сила и тяга, входящие в правые части уравнений (V.2.1), зависят от числа оборотов  $n$  и скорости их изменения  $\dot{n}$ . Число оборотов  $n = n_0 + \dot{n}t$ . В настоящем примере тяга

$$T = 3,3n^2(t) - 0,9n(t)v_x.$$

Должна быть также задана скорость изменения чисел оборотов  $\dot{n}(t)$ ; в рассматриваемом примере принято  $\dot{n}(t) = 0,25 \div \div 0,5$  об/сек<sup>2</sup>. Если горизонтальные рули располагаются в потоке за гребным винтом, то необходимо учитывать влияние обдувки винта на характеристики рулей.

На рис. V.6—V.8 приведены результаты расчетов глубины погружения и дифферентов при одержании ПЛ на двух скоростях хода. Сравнение кривых  $\eta_m = \eta_m(G_0)$  и  $\psi_m = \psi_m(G_0)$  с аналогичными зависимостями, построенными для случая движения без хода, показывает, что при наличии хода и перекладки кормовых горизонтальных рулей значительно расширяются возможности предотвращения недопустимых провалов и дифферентов. Эти преимущества состоят в том, что при малых скоростях, например, резко уменьшаются значения критических весовых расходов  $G_{кр}$ , а при увеличении скорости асимптота, соответствующая  $G_{кр}$ ,

смещается в сторону нересальных (отрицательных) расходов. Это означает возможность одержания ПЛ при сравнительно малых расходах.

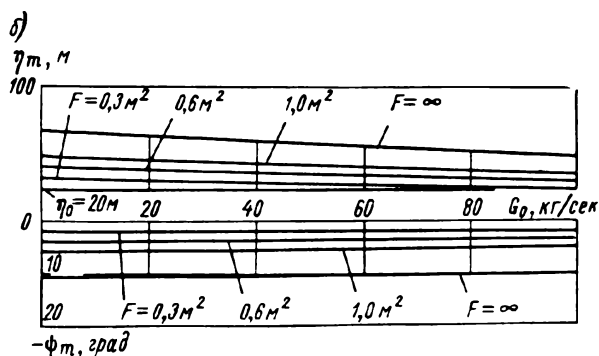
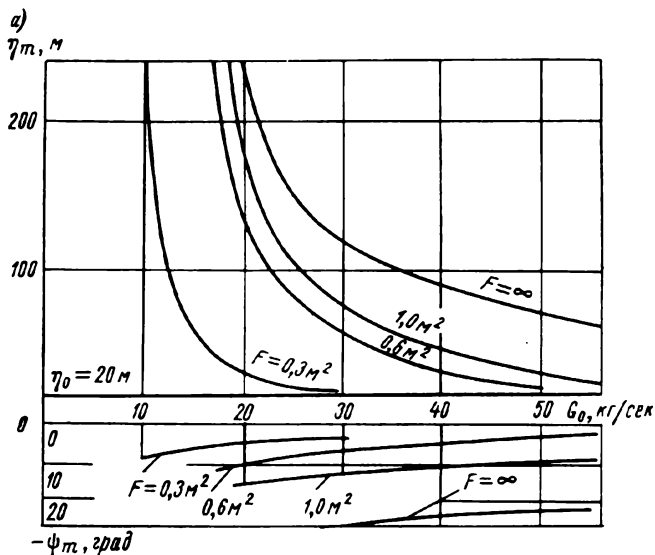


Рис. V.6. Зависимость глубины погружения и угла диффрента аварийной ПЛ от весового расхода воздуха при постоянной площади пробойны: а —  $v=5$  м/сек; б —  $v=9$  м/сек.

При оценке возможностей одержания ПЛ после аварии часто рассматривают не глубину погружения, а глубину провала, под которой понимают разность глубины погружения и той глубины, на которой произошла авария, т. е.  $\eta - \eta_0$ . Глубина