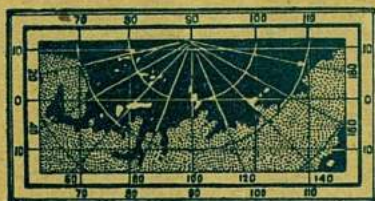




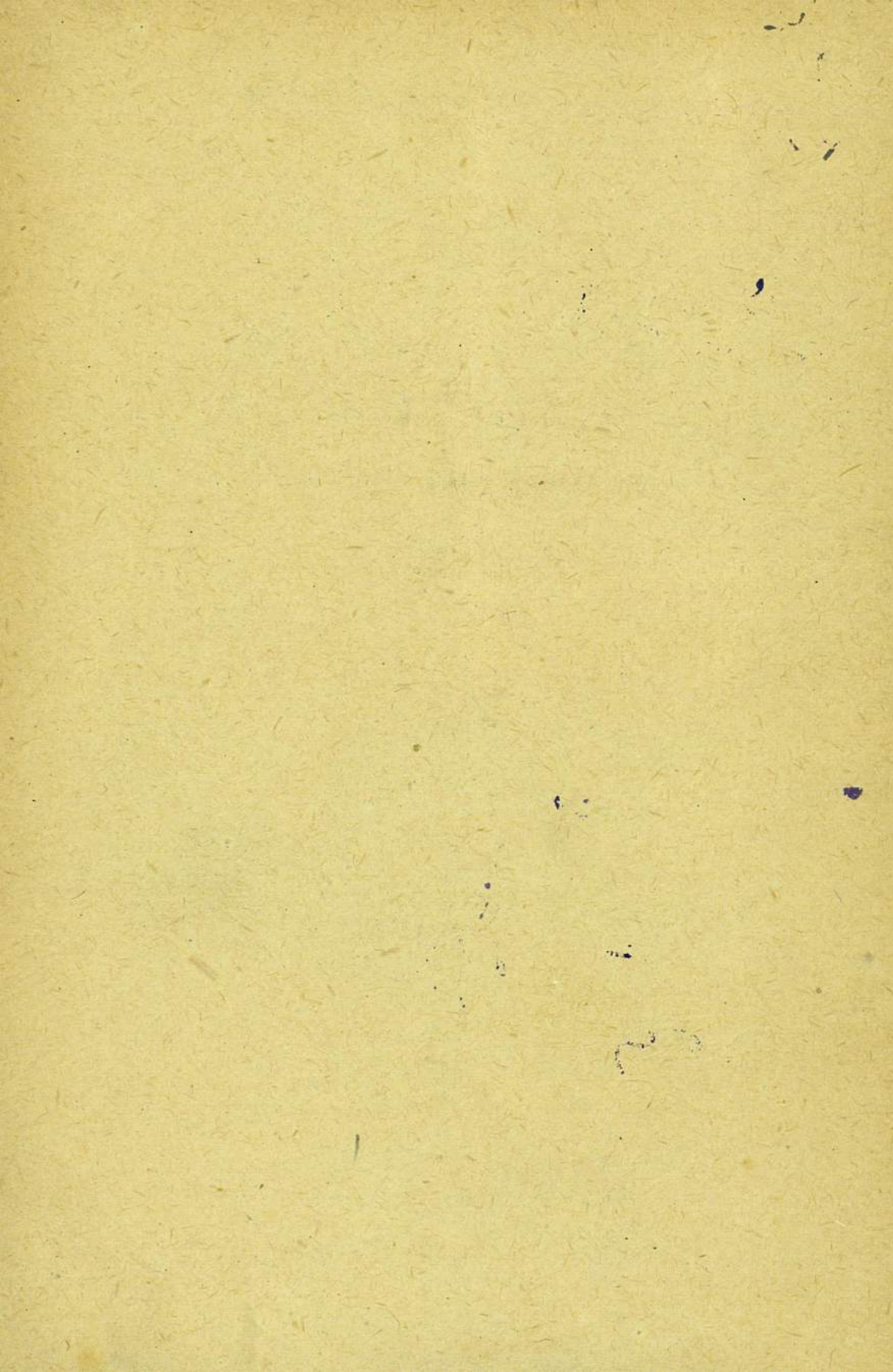
Проверено 1950

СЕВЕРНЫЙ МОРСКОЙ ПУТЬ

СБОРНИК СТАТЕЙ ПО ГИДРОГРАФИИ И МОРЕПЛАВАНИЮ



VII



35-19
4-7

✓

ГИДРОГРАФИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГЛАВСЕВМОРПУТИ ПРИ СНК СССР

35-19
104-7

СЕВЕРНЫЙ МОРСКОЙ ПУТЬ

СБОРНИК СТАТЕЙ
ПО ГИДРОГРАФИИ И МОРЕПЛАВАНИЮ

VII



01-22
Г-10

Ответственный редактор *И. М. Суслов*

СОДЕРЖАНИЕ

Научный отдел

	Стр.
И. А. Киреев. Поправка на отклонение лотиня от вертикали при измерении глубин механическим лотом по счетчику	5
Я. К. Смирницкий. Радиогидроакустический способ координирования при гидрографических работах в море	54
Н. Н. Сысоев. О применении для измерения течений привязных поплавков.	115
П. К. Хмызников. О размыве берегов в море Лаптевых.	122

Заметки

Н. Н. Матусевич. Новый секстан Вильда	135
---	-----

CONTENTS

Section of science

Page

- I. A. Kireev. Correction on the declination of the Sounding line from the vertical;
during depth measurements by Sounding machines. 5
- I. K. Smirnitsky. Radio-acoustic position finding of ships in the time of hydro-
graphic work at Sea. 54
- N. N. Sissoev. On the application of bended buoys for measurements of currents. 115
- P. K. Chmyznikov. On the destruction of the shores of Laptev Sea. 122

Notes

- N. N. Matoussevich. The new Wild's sextant. 135
-

И. А. КИРЕЕВ

ПОПРАВКА НА ОТКЛОНЕНИЕ ЛОТЛИНЯ ОТ ВЕРТИКАЛИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ГЛУБИН МЕХАНИЧЕСКИМ ЛОТОМ ПО СЧЕТЧИКУ

1. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

§ 1

Вопрос о введении поправки на отклонение лотлиня от вертикали или, как принято выражаться на морском языке, „об исправлении глубин за наклон лотлиня“ имеет давнюю и своеобразную историю. Она характеризуется прежде всего отсутствием единства во взглядах многих исследователей, пытавшихся (и до сих пор пытающихся) самыми разнообразными методами определить истинную форму лотлиня. Правда, в ряде случаев некоторыми авторами были получены почти одинаковые результаты, но нередко бывало, что каждый исследователь поступал по-своему, совершенно не учитывая или попросту не зная о существовании прежних работ. Так, например, Луиджи де Марки¹ в предисловии пишет:

„Этот способ исследования нов. Не знаю, пытался ли кто-либо другой разрешить эту проблему... Полагаю, что подобных попыток не делалось, так как проф. Леонарди Каттолика не упоминает об этом в своем трактате, никаких определенных данных нет и в докладе Греннекэ о плавании „Планеты“, и мне не удалось их получить ни у одного из опытных моряков“.

В действительности уже существовали исследования Томсона² и французского инженера-гидрографа Хатта,³ способ которого пол-

¹Professor Luigi di Marchi, Teoria degli scandaglia d'alto mare, R. Comitato Talosografica Italiano, Memoria, XXXI, 1913, Venezia.

²Sir W. Thomson, Mathematical and Physical Papers, vol. 2, London.

³Hatt, Influence des courants sur les mesures de profondeur prises au moyen de ligne de sonde, Annales Hydrographiques, 1877, Paris.

века спустя был использован инженером-гидрографом Куртье;¹ последний автор ссылается в своей работе на исследования Марки и Хароза,² но выводы свои строит самостоятельным путем.

Прежде чем более подробно остановиться на изложении существующих теорий, надо заметить, что в СССР вплоть до появления в печати поправок, предложенных Куртье, применялся так называемый тригонометрический метод, т. е. лотлинь на всем его протяжении рассматривали как прямую линию и определяли истинную глубину h согласно простейшему закону $h = l \cdot \cos \alpha$, где l — длина вытравленного лотлиня и α — угол отклонения лотлиня от вертикали.³ Этот устаревший метод еще во второй половине XIX столетия явился на смену прежнему положению, существовавшему в эпоху океанографических экспедиций первой половины XIX столетия, когда техника измерения больших глубин находилась в начальной стадии развития, вследствие чего и не вводилось никаких поправок за наклон лотлиня; другими словами, сам по себе метод измерения морских глубин был настолько груб, что углу отклонения и не могло придаваться существенного значения.

Тригонометрический метод был регламентирован, вероятно, во многих флотах; в частности в итальянском флоте он был узаконен Гидрографическим трактатом Леонардо Каттолика и удержался вплоть до появления работы де-Марки (1913 г.), хотя уже 30-ю годами раньше лейтенант К. Маркаччи в отчете о работах гидрографического судна „Вэттор Пизани“ дал простое и убедительное пояснение, доказывавшее несостоятельность тригонометрического метода.

Сущность этого пояснения, иллюстрированного соответствующим опытом, заключалась в следующем.

Угол α является результатом перемещения судна, так как груз стремится падать по вертикали, на которой судно находилось в начальный момент измерения. В опыте Маркаччи при длине вытравленного лотлиня $l = 4500$ м дрейф составил (предположительно) 380 м, причем угол α достиг 40° . Если бы лотлинь на всем протяжении был вытянут по прямой линии, то при $\alpha = 40^\circ$ дрейф составил бы 2890 м.⁴ Маркаччи заключил отсюда, что изгибается лишь верхняя часть лотлиня, на остальном протяжении лотлинь остается вертикальным,

¹ Annales Hydrographiques, 1926, Paris.

² Harose, Notes sur le mouvement uniforme d'un fil dans un milieu résistant, 1917.

³ Г. С. Максимов, Записки по гидрографии, 1926.

⁴ Т. е. судно дрейфовало бы со скоростью 4,7 узла, тогда как в действительности скорость дрейфа не превышала одного узла.

вследствие чего поправка за наклон лотлиня в худшем случае выражается десятками метров.¹

По поводу этих соображений де-Марки в своем исследовании пишет:

„С точки зрения динамики это рассуждение недостаточно обосновано, но представляет хоть и спорный, но довольно интересный метод. Если бы столь значительный угол отклонения (40°) оставался неизменным на большом протяжении под водой или хотя бы очень медленно уменьшался, то лотлинь очень скоро вышел бы за пределы предполагаемого горизонтального перемещения судна (под влиянием дрейфа). Это невозможно, поэтому остается допустить, что угол отклонения быстро уменьшается, и лотлинь в большинстве случаев по всей своей длине почти вертикален. Странно, что подобное простейшее рассуждение не принималось ранее во внимание“.

Итак, по вопросу о методе вычисления поправки с давних пор возникли разногласия, не исчезнувшие в полной мере и по сие время. Практически, ввиду существовавшей в этом вопросе неуверенности, нередко принимались меры к устранению первоисточника ошибок, т. е. судно при измерении глубин маневрировало с помощью машины и руля с таким расчетом, чтобы довести угол отклонения лотлиня до минимума. Конечно, это делалось не всегда и не везде и, конечно, многие сотни и тысячи глубин, измеренных в разное время в различных морях и океанах, нанесены на карты либо с большим преувеличением, если вовсе не вводилось поправки, либо с большим преуменьшением, если применялся тригонометрический метод. Если бы в архивах сохранились все журналы морских промеров с проставленными в них углами отклонения лотлиня и если бы при этом самое измерение этих углов производилось достаточно надежно, то сейчас, когда имеется возможность ввести более верные поправки, можно было бы устранить многие недочеты. Но едва ли это кропотливое предприятие осуществимо на деле, поэтому рельеф дна многих морей и океанов на долгое время (т. е. впредь до производства повторного промера с помощью новейших методов и приборов) останется на картах в той или иной мере искаженным.

С 1921 г., после введения во французской гидрографии лота-рыба, упомянутый выше искусственный прием (маневрирование для умень-

¹ В данном случае были бы получены следующие значения истинной глубины h :

по методу Маркаччи	≈ 4450 м
„ тригонометрическому методу	3450 „
„ методу Марки	4060 „
„ методу автора	4080 „

шения угла α) в отношении прибрежной зоны потерял свое значение, так как промер стали производить на ходу. С этого времени повысился интерес к выводу поправки, и в 1925 г. инженер-гидрограф Катно предложил пользоваться таблицами поправок, вычисленных в том предположении, что форма лотлиня представляет дугу окружности. Этот способ был значительно вернее тригонометрического, но он представлял шаг назад по отношению к методам Хатта, утверждавшего в 1877 г., что лотлинь изгибается по цепной линии, и де-Марки, доказавшего в 1913 г., что лотлинь имеет вид параболы. Куртье в 1926 г. извлек из архива выводы Хатта и дал таблицы поправок, в которых лотлинь принят за цепную линию, весьма мало отличающуюся по длине от дуги окружности; эти таблицы стали применяться и в СССР. Наконец, инженер-гидрограф Марти¹ в том же 1926 г. старался примирить оба течения, доказывая, что при правильном подборе груза наиболее совершенной формы и лотлиня соответствующего диаметра и при условии, что не превышаются известные пределы скорости хода, поправка вообще не имеет существенного практического значения.

Более обоснованное, но не лишенное некоторых основных недостатков исследование было произведено в 1927 г. итальянским военным моряком Л. Тонта,² и, наконец, в 1932 г. нашелся последователь Катно в лице Гугенхейма.³

Изложенный ниже способ автора (§ 7) вчерне был разработан в 1934 г.

§ 2

Насколько известно, никаких иных методов аналитического решения, сверх перечисленных выше, никем предложено не было. Но зато в литературе, не имеющей прямого отношения к вопросу о применении в море механических лотов, можно найти обширные материалы, касающиеся результатов аналитических и экспериментальных исследований вопроса о равновесии нити в сопротивляющейся среде,—явления, имеющего первостепенное значение для вычисления поправки за наклон лотлиня. Соответствующие опыты и иссле-

¹ Annales Hydrographiques, 1926, Paris.

² Sur la courbure de la ligne de sonde et la correction d'inclinaison, par le Capitaine de Vaisseau L. Tonta, Directeur, Revue Hydrographique, vol. IV, № 2, Novembre 1927. Monaco.

³ M. A. G u g e n h e i m, Détermination nomographique de la correction d'inclinaison dans les sondages au plomb-poïsson, Revue Hydrographique, vol. IX, № 2, Novembre 1932. Monaco.

дования производились и производятся главным образом для целей авиации (СССР и США) и гидрометрии (СССР). В частности в СССР в авиационных вопросах принято руководствоваться теоретическими выводами Н. Е. Жуковского и экспериментальными данными ЦАГИ. Нет возможности сделать здесь хотя бы в общих чертах обзор всей относящейся сюда литературы; достаточно сказать, что ни гидрографы, ни гидрометры не могут не считаться с соответствующими достижениями авиации.¹

Разногласия касаются главным образом формы кривой, образуемой лотлинем; некоторые считают ее параболической, другие—логарифмической кривой, третьи—цепной линией, четвертые представляют ее себе как нечто среднее между параболой и цепной линией.²

В частности в гидрометрии, при речных промерах глубин с помощью грузов, т. е. при решении задачи, весьма сходной с рассматриваемым здесь вопросом, в последнее время пришли к форме кривой, приближающейся к кубической параболе.³ Но надо иметь в виду, что в гидрометрии приходится иметь дело с неравномерным распределением скоростей течения на вертикали, вызывающим более интенсивное изгибание троса, поэтому выводы, касающиеся гидрометрии, в полной мере могут быть применены к условиям, существующим на море, лишь с практической, а не с теоретической точки зрения. Попутно заметим, что в вопросе о введении поправки на отклонение троса от вертикали гидрометрия подобно гидрографии долгое время пребывала в состоянии технической отсталости. В новейших руководствах по гидрометрии, например Аполлова и Лукашина (1932 г.) и А. В. Огиевского (1934 г.), упоминается о том, что тригонометрический метод ненадежен, но не дается математического анализа явления.

Первое экспериментальное исследование, результаты которого были пригодны лишь по отношению к данному гидрометрическому створу, было произведено В. Н. Ярцевым (Вестник ирригации, 1927, № 11). Планомерное и широко поставленное экспериментальное исследование, значительно облегчающее условия математического анализа, производится П. И. Калинским (данные не опубликованы). Аналитический вывод, подкрепленный экспериментальными данными и пригодный для любого горного потока, дан автором в т. V Трудов ГГИ. Руководством на русском языке, в кото-

¹ Везде, где это требовалось, в работах автора (по гидрографии и гидрометрии) важнейшие выводы в этой области полностью использованы.

² Оставляем в стороне всякого рода предположения (о сходстве с дугой окружности и пр.), как не заслуживающие внимания.

³ Неопубликованные выводы П. И. Калинского.

ром вопрос был бы исчерпан во всей полноте, гидрометрия до сего времени не располагает.

В литературе, не имеющей прямого отношения к рассматриваемому вопросу, совершенно исключительное место занимает работа акад. А. Н. Крылова „О равновесии шаровой мины на течении“ (1909 г.). Помимо точного математического анализа, здесь дано исчерпывающее практическое решение, которое с необходимыми видоизменениями (и с некоторыми исправлениями) неоднократно и с успехом было использовано автором настоящей статьи при решении различных вопросов, связанных с определением формы троса в сопротивляющейся среде. Одним из недостатков работ Хатта, Куртье, Марки и др. является неправильный подход к оценке сопротивления воды, испытываемого лотлинем. А. Н. Крылов, следуя в основном по пути Хатта, избежал этой ошибки и сверх того впервые наметил путь для определения формы кривой, образуемой тросом (в данном случае минрепом), как при постоянной скорости течения, так и при неравномерном (вертикальном) распределении скоростей течения (явление, с которым прежде всего сталкивается гидрометрия). Способ вычисления поправки за наклон лотлиня, с 1934 г. применяемый в Гидрографическом управлении Главсевморпути и предложенный автором, с упомянутыми выше оговорками целиком основан на выводах акад. А. Н. Крылова.

§ 3. Обзор экспериментальных исследований

Впервые подобные опыты были произведены в 1902—1906 гг. с лотом Томсона¹ с целью получить поправки при измерении глубин на ходу без применения трубок. Глубины измерялись при различной скорости хода в точках, обозначенных буями; предварительно в тех же точках были измерены истинные глубины („vertical depth“), что и послужило материалом для сравнений. По поводу этих опытов надо заметить следующее.

1) Как видно на графике (рис. 1), зависимость между истинными и измеренными глубинами (или, что все равно, между поправкой и измеренной глубиной) весьма близка к линейной² и практически в известных пределах может быть принята за линейную. Вывод этот

¹ Instructions for Lord Kelvin's new sounding machine patented (1906). Рис. 1 составлен автором по таблице, помещенной в этом источнике и встречающейся также в различных руководствах по навигации.

² Обстоятельство это подтверждается опытами автора на озере Севан (1930 г.). В данном случае эта почти линейная зависимость была бы выражена еще ярче, если бы в измеренные глубины вводилась поправка на отклонение места нуля (см. ниже § 4).

интересен еще в том отношении, что все способы аналитического вычисления поправки приводят к аналогичным результатам.

2) Существенным недостатком всех подобных опытов является то обстоятельство, что глубина в точке падения груза на дно может отличаться от предварительно измеренной глубины (у буя), так как груз, особенно при скорости хода судна, превышающей скорость падения груза, никогда не падает по вертикали, на которой судно находилось в начальный момент измерения. Происходит это вслед-

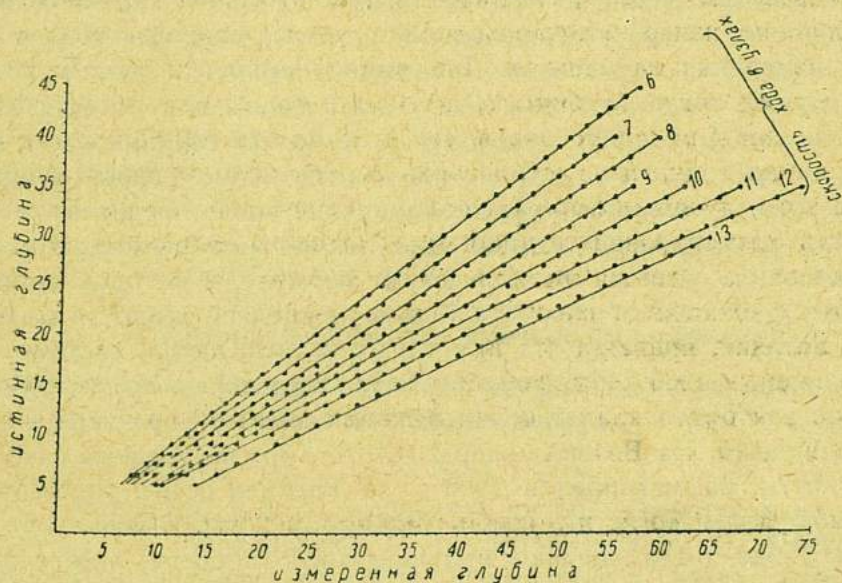


Рис. 1.

ствие трения в механизме выюшки, вызывающего некоторую силу буксирования, которая как бы подтягивает груз к судну и заставляет его падать по некоторой кривой. Но даже в идеальном случае, т. е. если бы лотлинь разматывался без всякого трения, при производстве подобных опытов нет точных данных для суждения о величине горизонтального отклонения груза от вертикали, проведенной через счетчик, т. е. нельзя знать, в каком расстоянии от буя следует начать измерение глубины, чтобы груз упал в ту точку, в которой предварительно была измерена истинная глубина. Таким образом, необходимым условием для успешности этих экспериментов является выбор участка с исключительно гладким рельефом дна.

3) Угол отклонения лотлиня от вертикали (α) не измерялся, поэтому результаты этих опытов были действительны лишь для данного груза, для данного лотлиня и для данной выюшки.

Несколько иной способ был применен автором при производстве судового промера озера Севан.¹ Здесь встречались большие участки, в пределах которых глубина почти не менялась, поэтому поправку нетрудно было определить по формуле

$$\Delta = \frac{l_1 + l_2}{2} - h,$$

где h — глубина, измеренная на стопе (при $\alpha = 0^\circ$) одновременно с определением места двумя секстансами по задаче Потенота, а l_1 и l_2 — глубины, измеренные при одной и той же скорости хода v до и после измерения глубины h . Для вывода поправки были использованы случаи, когда глубины l_1 и l_2 были равны или различались не более чем на 1 м; допускалось, что если бы эти глубины были измерены не на ходу, а на стопе, то они были бы равны глубине h . Кроме того, путем многократных измерений была определена средняя скорость разматывания лотлиня для лотов трех различных систем, что позволило вывести эмпирическую формулу, в которой поправка является функцией от скорости хода и от средней скорости разматывания лотлиня. Формула эта пригодна для лота любой системы.

Наконец, в 1933 г. было опубликовано исследование Джонсона,² которое как будто кладет конец всяким спорам о характере и величине поправки. На Великих озерах (США) были поставлены специальные опыты, законченные в 1928 г. на Верхнем озере. Применялись лот-рыба весом 40 кг и лотлинь диаметром 2 мм. С различной скоростью хода было сделано большое число пробегов между двумя буями, установленными на расстоянии полумили, на глубинах около 200 м. Угол отклонения лотлиня от вертикали (α) измерялся специальным угломером при различной глубине погружения грузила, через каждые 30 м, а также в момент измерения глубины и на поверхности (как это принято при определении постоянной лот-рыба m_0 по методу Куртье). В результате этих исследований выяснилось, что поправки за наклон лотлиня почти в точности согласуются с поправками, выведенными де-Марки, т. е. форма лотлиня очень близка к параболе. Таким образом, опыты Джонсона представляют в рассматриваемом вопросе большой практический и теоретический интерес, и можно считать твердо установленным, что достаточно точное исправление небольших глубин (порядка 200 м и менее) в настоящее время не вызывает никаких затруднений.

¹ И. А. Киреев, Гидрографические работы на озере Севан, изд. Севанского комитета при Совнаркомом РСФСР, Ленинград, 1933 г.

² Correction d'inclinaison du fil de sonde par M. Harry F. Johnson, Associate Engineer, U. S. Lake Survey Office, Revue Hydrographique, vol. X, № 2; Novembre 1933. Monaco.

Все сказанное относительно самих опытов относится непосредственно к случаю измерения глубин на ходу. Что касается промера с застопоренной машиной, то, насколько известно, экспериментальное определение поправки производилось лишь на больших глубинах, о чем подробнее сказано в § 8. Здесь надо добавить, что при составлении настоящего обзора и в дальнейшем изложении автором не могли быть использованы результаты, полученные в экспедиции на „Метеоре“. С этой точки зрения работа автора неполноценна. Однако, наблюдения на „Метеоре“ представляют главный интерес лишь в отношении измерения больших океанских глубин, т. е. в отношении вопроса, который здесь рассматривается лишь вскользь, в самых общих чертах, и который будет освещен в специальной работе. Здесь же вопрос об измерении сравнительно небольших глубин, примерно не свыше 500 м, существенных расхождений с материалами экспедиции на „Метеоре“ (насколько можно судить по результату беглого ознакомления с этими материалами), повидимому, не усматривается.

II. АНАЛИТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОПРАВКИ

§ 4. Точный графо-аналитический метод Гидрографического управления Главсевморпути

Способ, о котором здесь идет речь (также как и приближенный способ, изложенный в § 7), выработан автором на основании видоизмененных им исследований А. Н. Крылова (§ 2). Поскольку вообще не существует методов, позволяющих точно вычислить поправку, наименование „точный“, приведенное в заголовке, надо понимать условно; оно применено здесь в том смысле, что этот способ точнее всех остальных аналитических методов, так как здесь учитывается вес лотиния, тогда как в так называемых приближенных способах (Куртье, Тонта и др.) приходится пренебрегать этой величиной, чтобы иметь возможность оперировать с определенными интегралами, позволяющими вычислить лишь приближенную величину поправки. Мы увидим даже, что и эта приближенная величина вполне удовлетворяет практическим целям.

Пусть $AB = S$ (рис. 2) — кривая, по которой изогнулся лотинь от точки прикрепления к грузу до поверхности моря. Касательная в точке A отклонена от вертикали на угол

$$\varepsilon = \arctg \frac{F}{P_0}, \quad (1)$$

где P_0 — вес груза в воде и F — сопротивление воды, испытываемое грузом. Касательная в точке B составляет с вертикалью угол α .

Угол ϵ можно определить тремя способами: 1) непосредственным измерением, для чего достаточно поднять груз до соприкосновения верхней его точки с поверхностью моря, 2) по формуле (1), если экспериментально определены величины F и P_0 , и 3) с помощью постоянной лота m_0 (см. ниже).

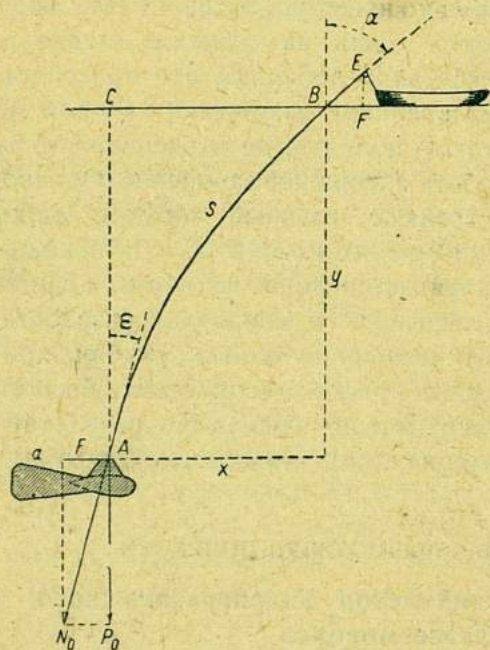


Рис. 2.

в точке C и представляющая сумму приращений ординат бесконечно малых элементов ds .

Разделим всю длину лотлиня S на n равных частей, из которых каждую без ощутительной погрешности можно принять за прямую; тогда лотлинь изобразится ломаной линией, состоящей из n звеньев. Каждое звено находится в равновесии под влиянием собственного веса, сопротивления воды, соответствующего данной скорости буксирования v_0 , и натяжения. Зная исходные данные, т. е. натяжение в точке A

Если разбить лотлинь на бесконечно малые элементы ds , то направление каждого элемента будет совпадать с направлением его натяжения, следовательно, зная элементы натяжения (величину и направление), можно построить кривую, по которой изгибается лотлинь, и определить поправку по формуле

$$q = AB - AC = S - y, \quad (2)$$

где y — ордината, проведенная из начала координат A до пересечения с поверхностью моря

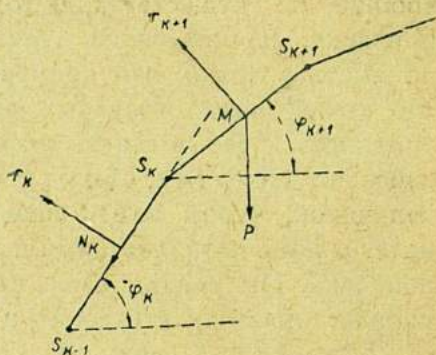


Рис. 3.

$$N_0 = \sqrt{P_0^2 + F^2}, \quad (3)$$

и зная угол ϵ , можно способом постепенного приближения, переходя от звена к звену, определить натяжение в любой точке.

Пусть S_k, S_{k+1} (рис. 3) — одно из звеньев лотлиня длиной $S:n$. Его вес

$$p = p_0 \cdot (S:n),$$

где p_0 — вес погонного метра лотлиня в воде. Если

$$r_0 = K \cdot d \cdot v_0^2$$

представляет сопротивление воды, испытываемое одним погонным метром лотлиня при угле встречи $\varphi = 90^\circ$,¹ то нормальное или действующее сопротивление r_{k+1} , приложенное в точке M , составляет

$$r_{k+1} = r_0 \cdot \sin^2 \varphi_{k+1} \cdot (S:n). \quad (4)$$

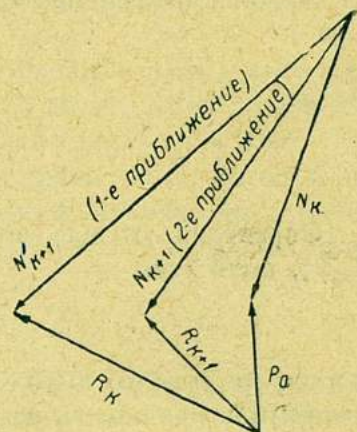


Рис. 4.

Натяжение лотлиня N_k приложено в точке S_k . Чтобы определить величину и направление натяжения N_{k+1} , приложенного в точке S_{k+1} , можно каждую из сил p, r_k, r_{k+1} и т. д. разложить на две равных и параллельных составляющих, приложенных в точках S_{k-1}, S_k, S_{k+1} ; тогда вместо сил p и r , приложенных в центрах тяжести звеньев (M), будут рассматриваться силы, приложенные в узлах S_{k-1}, S_k, S_{k+1} . Далее, принимаем в первом приближении

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k$$

и

$$r_{k+1} = r_k = r_0 \cdot \sin^2 \varphi_k \cdot (S:n).$$

Тогда равнодействующая в первом приближении представит замыкающую силу N_{k+1}^1 (рис. 4). Отсюда получаем в первом приближении угол φ_{k+1} и вычисляем

$$r_{k+1} = r_0 \cdot \sin^2 \varphi_{k+1} \cdot (S:n)$$

и замыкающую N_{k+1} во 2-м приближении.

Если число звеньев n достаточно велико, то практически всегда можно ограничиться вторым приближением.

¹ Здесь $K=60$, d — диаметр лотлиня в метрах, v — скорость буксирования лота в м/сек. Заметим, что в данном случае рассматриваются условия, существующие в неподвижной водной среде, вследствие чего скорость v одинакова для всех звеньев лотлиня.

Задача решается аналитически по обычной схеме вычисления приращений прямоугольных координат. Обозначим через X_K и Y_K горизонтальную и вертикальную проекции силы N_K ; тогда

$$X_{K+1} = X_K + r_{K+1} \cdot \sin \varphi_{K+1}; \quad (5)$$

$$Y_{K+1} = Y_K + p_0 - r_{K+1} \cdot \cos \varphi_{K+1}; \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{K+1} = \frac{Y_{K+1}}{X_{K+1}}. \quad (7)$$

В первом приближении принимаем

$$\varphi_{K+1} = \varphi_K.$$

Тогда

$$X_{K+1} = X_K + r_{K+1} \cdot \sin \varphi_K; \quad (8)$$

$$Y_{K+1} = Y_K + p_0 - r_{K+1} \cdot \cos \varphi_K. \quad (9)$$

Определив отсюда по формуле (7) приближенное значение угла φ_{K+1} , вычисляем

$$r_{K+1} = r_0 \cdot \sin^2 \varphi_{K+1} \cdot (S : n) \quad (10)$$

и по формулам (5) и (6) — исправленные величины X_{K+1} и Y_{K+1} , по которым вторично вычисляем по формуле (7) угол φ_{K+1} во втором приближении.

Определив таким образом для каждого звена проекции натяжения на оси X и Y , вычисляем приращения координат

$$\Delta x = (S : n) \cdot \cos \varphi_{K+1}; \quad (11)$$

$$\Delta y = (S : n) \cdot \sin \varphi_{K+1}. \quad (12)$$

Абсцисса $x = \Sigma \Delta x$ представит горизонтальное отклонение груза от вертикали, а ордината $y = \Sigma \Delta y$ плюс высота груза есть истинная глубина h от поверхности моря до нижней поверхности груза.

Вычисления располагаются по схеме, показанной на примере вычисления поправки для груза весом 30 кг (вес в воде $P_0 = 27,2$ кг), для лотлиня диаметром 1,5 мм и для скорости хода $v_0 = 2$ м/сек. Исходными данными являются вес груза $P_0 = Y_0$ и сопротивление воды $F = X_0$. За отсутствием экспериментальных данных о коэффициенте сопротивления груза в данном случае использована формула Куртье¹ для постоянной лота

$$m_0 = \frac{K}{F} = \frac{1}{5}.$$

¹ П. В. Мессер, Гидрографические работы и морские навигационные карты. Изд. Гидрографического управления, Л., 1933 г., стр. 146 и след.

Отсюда $F = 5 \cdot K$, где $K = r_0$ представляет сопротивление воды на один погонный метр лотлиния диаметром 1,5 мм. Таким образом, для $v_0 = 1$ м/сек.

$$F = X_0 = 5 \cdot r_0 = 5 \cdot 60 \cdot 0,0015 = 0,45 \text{ кг.}$$

Для $v_0 = 2$ м/сек. $F = 1,8$ кг, следовательно исходный угол

$$\varphi_0 = 90^\circ - \varepsilon$$

составляет

$$\text{arc tg } \varphi_0 = \frac{27,23}{1,8} = 86^\circ 13' 10''.^1$$

Порядок вычислений показан на приложенной схеме, в которой, в виде примера, вычисление доведено до $S = 20$ м. Суммы приращений координат (графы 18 и 19), полученных по формулам (11) и (12), равны соответственно координатам y и x точки 20-й, которой на рис. 2 соответствует точка B , между тем конечная точка вытравленного лотлиния находится у блока счетчика (рис. 2, точка E). Если обозначить всю длину лотлиния AE через l , то

$$BE = l - S$$

представит длину надводной части лотлиния, соответствующую углу α и высоте блока над поверхностью моря, т. е. величине

$$EF = t.$$

Чем ближе к единице отношение

$$\frac{l - BE}{l},$$

тем меньше практического значения имеет ошибка, происходящая вследствие того, что при промере не учитывается поправка на отклонение места нуля. Каким бы лотом ни производилось измерение глубины, счетчик всегда ставится на нуль в положении, при котором нижняя грань груза касается поверхности воды (на рис. 2 точка F). Поправка на отклонение места нуля выразится величиной

$$M \cdot 0 = BE - EF = t \cdot (\sec \alpha - 1) \quad (13)$$

¹ Этот результат совпадает с результатами экспериментальных определений угла, составляющего для этой скорости v_0 около 4° . Сомнение может вызвать большое значение коэффициента сопротивления груза, которое получается по этим данным, равным 47, тогда как теоретически оно не превышает 25. Но надо иметь в виду, что точка подвеса груза лежит выше его центра тяжести, поэтому груз движется под углом, который при $v_0 \approx 2,8$ м/сек. достигает предельной величины (около $41\frac{1}{2}^\circ$); в этом положении коэффициент сопротивления груза значительно повышается. Джонсон определил для груза весом 40 кг сопротивление $F = 0,55 \cdot v_0^2$ кг.

Таблица 1

для лота-рыба весом 30 кг при диаметре лотлиня 1,5 мм

Длина звена $\Delta S = 1$ м.Вес " в воде $p_0 = 0,007$ кгСоппротивление звена $r_0 = 0,09 \cdot v_0^2$

Кг $r_{k+1} = r_0 \cdot \sin^2 \varphi_{k+1}$	Кг $r_{k+1} \cdot \sin \varphi_{k+1}$	Кг $r_{k+1} \cdot \cos \varphi_{k+1}$	Кг $x_{k+1} (3) + (14)$	Кг $y_{k+1} (4) + p_0 - (15)$	М $\Delta y \Delta S \cdot \sin \varphi_k (5)$	М $\Delta x \Delta S \cdot \cos \varphi_k (6)$	М у	М х	М $\frac{\Delta S}{2 \Delta S}$	М $q (22) - (20)$
0,358	0,356	0,028	2,156	27,209	0,997	0,079	0	0		
0,357	0,355	0,033	2,511	27,183	0,996	0,092	0,997	0,079	1/1	0,003
0,356	0,354	0,037	2,865	27,153	0,994	0,105	1,993	0,171	1/2	0,007
0,355	0,353	0,042	3,218	27,118	0,993	0,118	2,987	0,276	1/3	0,013
0,354	0,351	0,046	3,569	27,079	0,991	0,131	3,980	0,394	1/4	0,020
0,353	0,349	0,051	3,918	27,035	0,990	0,144	4,971	0,525	1/5	0,029
0,351	0,347	0,055	4,265	26,987	0,988	0,156	5,961	0,669	1/6	0,039
0,350	0,345	0,059	4,610	26,935	0,985	0,168	6,949	0,825	1/7	0,051
0,349	0,342	0,063	4,952	26,879	0,984	0,181	7,934	0,993	1/8	0,066
0,347	0,341	0,067	5,293	26,819	0,981	0,194	8,918	1,174	1/9	0,082
0,345	0,338	0,071	5,631	26,755	0,978	0,206	9,899	1,368	1/10	0,101
0,343	0,334	0,075	5,965	26,687	0,976	0,218	10,877	1,574	1/11	0,123
0,341	0,332	0,078	6,297	26,616	0,973	0,230	11,853	1,792	1/12	0,147
0,339	0,329	0,082	6,626	26,541	0,970	0,242	12,826	2,022	1/ 3	0,174
0,337	0,326	0,086	6,952	26,462	0,967	0,254	13,796	2,264	1/14	0,204
0,335	0,322	0,089	7,274	26,380	0,964	0,265	14,763	2,518	1/15	0,237
0,332	0,319	0,092	7,593	26,295	0,961	0,277	15,727	2,783	1/16	0,273
0,330	0,316	0,095	7,909	26,207	0,957	0,289	16,688	3,060	1/17	0,312
0,327	0,312	0,098	8,221	26,116	0,954	0,300	17,645	3,349	1/18	0,355
0,325	0,309	0,101	8,530	26,022	0,950	0,311	18,599	3,649	1/19	0,401
				Σ =	19,549	3,960	19,549	3,960	1/20	0,451

Значения $M \cdot O$ для встречающихся на практике величин l и α даны в табл. 1. Как видно из этой таблицы, пренебрегать поправкой $M \cdot O$ не следует, особенно при большой высоте блока l и при желании измерять сравнительно небольшие глубины с точностью до дециметра. Таким образом, кроме поправки на искривление погруженной части лотлиня (обозначим эту поправку через q), в измеренную глубину l вводится поправка на отклонение места нуля, следовательно истинная глубина

$$h = l - M \cdot O - q, \quad (14)$$

где q вычисляется для погруженной части лотлиня

$$s = l - M \cdot O - G; \quad (15)$$

здесь величина G представляет высоту груза от нижней грани до точки прикрепления лотлиня (точка A).

Таблица 2

$M \cdot O$ — поправка на отклонение места нуля (в метрах)

l м	α — угол отклонения надводной части лотлиня от вертикали										
	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°
1	—	—	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	1,0
1,5	—	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	1,1	1,5
2	—	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,1	1,5	2
2,5	—	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,4	1,9	2,5
3	—	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1,2	1,7	2,2	3
3,5	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,8	1,1	1,4	1,9	2,6	3,5
4	0,1	0,1	0,3	0,4	0,6	0,9	1,2	1,7	2,2	3,0	4
4,5	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	1,4	1,9	2,5	3,3	4,5
5	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,1	1,5	2,1	2,8	3,7	5
5,5	0,1	0,2	0,4	0,6	0,9	1,2	1,7	2,3	3,1	4,1	5,5
6	0,1	0,2	0,4	0,6	0,9	1,3	1,8	2,5	3,3	4,5	6

Вычисление поправки q для звеньев длиной 1 м, показанное на приложенной схеме, произведено с экспериментальной целью. Практически получается почти тот же результат, если длина звеньев, в зависимости от скорости v_0 , не превышает 5—10 м; при этом на глубинах свыше 100—150 м,¹ когда угол встречи меняется крайне медленно, длина звеньев может быть доведена до 10—20 м. Кроме того, для ускорения всего процесса можно применить графический способ, сущность которого заключается в следующем.

¹ Т. е., начиная с 10—15-го звена, если вычисление производится через 10 м.

На схематическом рисунке 5 точка O — центр окружности, диаметр которой r_0 представляет, согласно принятым выше обозначениям, нормальное сопротивление воды для звена длиной $s:n$ при угле встречи $\varphi = 90^\circ$. В том же масштабе строится силовой треугольник OPF , в котором P_0 — вес груза в воде, F — сопротивление воды, испытываемое грузом, и $OF = N_0$ — натяжение лотлиня в точке A . Следовательно, угол $P_0FO = \varphi_0$. Построив угол $MOK = \varphi_0$ и опустив из точки I перпендикуляр на диаметр MM_1 , получаем в первом приближении силу

$$r_k = r_0 \cdot \sin^2 \varphi_k = \frac{SM_1}{2},$$

так как

$$\sin^2 \varphi = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos 2\varphi).$$

От точки F откладываем вес звена p_0 и из конца его (a) проводим дугу радиусом, равным

$$r_k = \frac{SM_1}{2} = ab.$$

Линия ab представит касательную к этой дуге; не проводя самой линии, отмечаем ее пересечение c с окружностью и, отложив дугу $KU = Kc$, получаем

$$r_k = \frac{TU_1}{2} = ad$$

во втором приближении. Точка e (пересечение касательной dO с окружностью) является исходной для подобного же построения для второго звена, вес которого p_0 откладывается от точки d , и т. д.

Для вычерчивания формы лотлиня от произвольной точки A (рис. 6) проводим прямую $A1$ параллельно Od (рис. 5) и, отложив в каком-либо масштабе длину первого звена, получаем узел 1, от которого проводим направление второго звена и т. д. Таким образом, получаем координаты x и y любой точки лотлиня и снимаем с чертежа соответствующие им углы отклонения лотлиня от вертикали, т. е. $\alpha = 90^\circ - \varphi$, по которым, для контроля этой части построения, вычисляем приращения координат для каждого звена и суммированием их определяем координаты x и y верхней точки лотлиня.

Силы желательно строить в масштабе $1 \text{ кг} = 1 \text{ см}$, а выбор масштаба для построения формы лотлиня зависит от длины лотлиня; при $S > 100 \text{ м}$ вместо построения формы лотлиня вообще выгоднее вычислять приращения.

автором 23 сентября 1934 г. в экспедиции на „Седове“ у берегов Новой Земли, в районе между мысом Бисмарка и мысом Спорый Наволок, в прибрежной зоне шириной 9 миль. При измерении глубин со стопа механическим лотом по счетчику, в полный штиль, т. е. при отсутствии ветрового дрейфа, лотлинь при отсчетах от нуля до 12 м шел совершенно вертикально, после чего резко отклонялся на $15\text{--}20^\circ$. Был определен дрейф на NO. Здесь наблюдалось прибрежное поверхностное течение на NO в слое воды мощностью 12 м в полосе шириной 9 миль, а в более глубоких горизонтах элементы течения были иными.

Правда, поправка может быть вычислена при любом вертикальном распределении скоростей течения (или скоростей движения v_0), т. е. при наиболее сложных условиях, при которых на первый взгляд всякая попытка вычисления формы кривой лотлиня должна казаться неосуществимой. Технически для этого достаточно построить годограф скоростей течения и вычислять сопротивление r_0 для каждого звена в соответствии со скоростями v_0 , проставленными в схеме в графе 5-й для соответствующих горизонтов; при графическом способе соответственно изменится диаметр окружности. Однако, подобные вычисления необходимы лишь для целей гидрометрии, где всегда можно построить более или менее надежный годограф скоростей течения. Для морских работ вопрос решается значительно проще.

§ 5. О методе Куртье

Способ вычисления поправки для лота-рыба, предложенный Куртье, в русском переводе с подробными пояснениями помещен в „Руководстве для гидрографических работ“ П. В. Мессера, поэтому здесь можно ограничиться несколькими замечаниями.

Метод Куртье, как уже упоминалось, основан на выводах Хатта, относящихся к кривой, которую образует пеньковый трос. Применяя эти расчеты для металлического лотлиня, Куртье допустил ту же ошибку, которую сделал Хатт. На стр. 110¹ читаем:

„Действие течения на лотлинь пропорционально синусу угла, который лотлинь образует с направлением течения;² таким образом, если K — давление воды на единицу длины лотлиня, когда он перпендикулярен к направлению течения,³ то лотлинь, образующий с течением угол φ , испытает на единицу длины давление $K \cdot \sin \varphi$ “.

¹ Annales Hydrographiques, 1877, Paris.

² По современной терминологии — угол встречи.

³ Т. е., когда угол встречи $\varphi = 90^\circ$.

В дальнейшем Хатт вывел, что составляющая сопротивления воды по оси x , т. е. по направлению течения, пропорциональна \sin^2 угла встречи, тогда как в действительности она пропорциональна $\sin^3 \varphi$. Конечные результаты исследований Хатта и Куртье от этого существенно не меняются, тем не менее полезно остановиться на этом явлении подробнее, так как вопрос о том, считать ли нормальное сопротивление пропорциональным \sin или \sin^2 угла встречи во многих случаях вызывает коренные разногласия. В частности во многих исследованиях, касающихся давления ветра на паруса,¹ горизонтальная составляющая по оси x -ов принимается пропорцио-

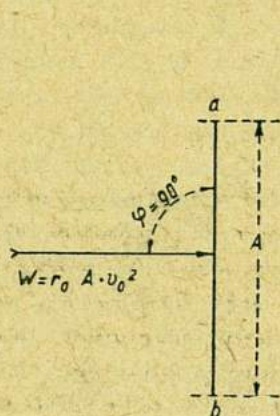


Рис. 7.

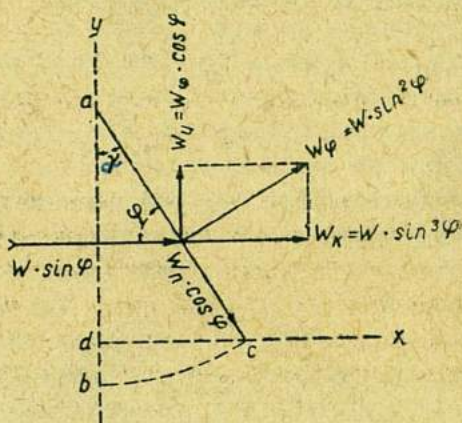


Рис. 8.

нальной \sin^2 , а не \sin^3 угла встречи, как это надлежало бы делать на основании следующих простейших соображений, относящихся к любому аэро- или гидродинамическому явлению.

Если A (рис. 7) — площадь некоторой вертикальной поверхности ab , движущейся в горизонтальном направлении (влево), причем r_0 — давление на единицу поверхности при угле встречи $\varphi = 90^\circ$, то нормальное или действующее давление (в общем случае пропорциональное проекции площади поперечного сечения тела на направление, перпендикулярное к направлению движения) выразится величиной

$$W = r_0 \cdot A \cdot v_0^2, \quad (16)$$

где v_0 — относительная скорость потока (или же относительная скорость движения поверхности ab).

¹ См., например, Ф. Л. Миддендорф. Рангоут и такелаж судов. Изд. Отд. торгового мореплавания, Петербург, 1912; Бернард Лоу, Остойчивость и равновесие плавающих тел. Перев. с нем., Изд. К. Л. Риккера, Петербург, 1905.

Пусть та же поверхность ab отклонится от вертикали на некоторый угол $\alpha = 90^\circ - \varphi$ и займет положение ac (рис. 8). В таком случае проекция площади на ось y -ов уменьшится до величины

$$ad = ac \cdot \sin \varphi = A \cdot \sin \varphi,$$

следовательно, полное давление (пропорциональное проекции площади поперечного сечения тела на направление, перпендикулярное к направлению движения) выразится величиной

$$W_n = W \cdot \sin \varphi.$$

Часть этой силы $W_n \cdot \cos \varphi$ тратится на скольжение, а нормальное или действующее давление выразится величиной

$$W_\varphi = W_n \cdot \sin \varphi = W \cdot \sin^2 \varphi \quad (17)$$

Наконец, проекция этой силы на ось x -ов

$$W_x = W_\varphi \cdot \sin \varphi = W \cdot \sin^3 \varphi. \quad (18)$$

Формула (18), выражающая приближенную зависимость между сопротивлением и углом встречи, справедлива для тел, имеющих форму пластинки или цилиндра, причем для пластинки здесь не учтено влияние размеров.¹ Но для лотиния (по форме мало отличающегося от цилиндра), как о том свидетельствуют экспериментальные данные, абсолютная величина r_0 вовсе не зависит от длины лотиния, поэтому формула (18) справедлива для любой длины троса. По новейшим экспериментальным данным, в формуле (18) показатель степени равен 2,9,² т. е. очень близок к трем и практически может быть принят равным трем, так как опыты производились главным образом на больших скоростях v_0 , интересующих авиацию, а для малых скоростей v_0 коэффициенты сопротивления несколько увеличиваются.

Если в исходные дифференциальные уравнения Куртье ввести упомянутое выше исправление, то окончательные выводы станут несколько иными (§ 7), причем абсолютная величина поправки, как уже упоминалось, существенно не изменится. Но Куртье не делает никакой оговорки относительно поправки на отклонение места нуля (§ 4), следовательно глубины, исправленные по способу Куртье, надо считать несколько преувеличенными.

Математически неправильный, но практически достаточно точный способ определения постоянной лота (m_0) является главным достоинством метода Куртье. В виде примера Куртье дает две таблицы

¹ Как известно, сопротивление единицы поверхности (r_0) колеблется в некоторых пределах в зависимости от общих размеров пластинки и от отношения длины к ширине.

² Сведение это любезно сообщено автору П. И. Калининским.

поправок, вычисленных для $m_0 = \frac{1}{10}$ и $m_0 = \frac{1}{5}$. Существенное значение, сохраняющее силу для любого иного метода вычисления поправки, имеет то обстоятельство, что данные в обеих таблицах различаются между собою на величину не более 1,2%, следовательно ошибка в определении m_0 даже на 50% вызывает ошибку в определении истинной глубины не более 0,6%; в действительности величина m_0 всегда бывает известна с ошибкой не более $\pm 20\%$, что и позволило применить выводы Куртье для вычисления поправки по способам, изложенным в §§ 4 и 7.

§ 6. Об исследованиях Л. Тонта и др.

Л. Тонта, следуя по тому же пути, что и Хатт и Куртье, т. е. оперируя методами статики и пренебрегая весом лотлиня, пришел к аналогичному с ними выводу, т. е. лотлинь изобразился у него цепной линией с вершиной в точке соприкосновения груза с дном¹ и с горизонтальной осью симметрии (параллельной направлению движения лотлиня); кривая обращена вогнутостью в сторону движения.

Выводы Тонта, по сравнению с формулами Куртье, отличаются большей простотой. Он устранил упоминавшуюся в § 5 неправильность, касающуюся вычисления элементарного сопротивления воды лотлиню, т. е. принял нормальное сопротивление пропорциональным \sin^2 угла встречи; но он допустил ряд упрощений и с математической точки зрения не внес в рассматриваемое явление ничего нового.

Из числа упоминавшихся в § 1 исследований автору, ко времени составления настоящей работы, не удалось использовать труды Томсона и Хароза, а что касается работ Маркаччи, Катно, Гугенхейма и др., то они основаны лишь на предположениях и не могут быть подтверждены математическим анализом.

§ 7. Приближенный аналитический метод гидрографического управления Главсевморпути

Бесконечно малый элемент лотлиня $M = ds$ (рис. 9) при буксировании лота-рыба со скоростью v_0 ² находится в состоянии статического равновесия, условия которого выражаются уравнениями:

$$N_1 \cdot \cos \varphi_1 - N \cdot \cos \varphi - r_0 \cdot \sin^3 \varphi \cdot ds = 0; \quad (19)$$

$$N_1 \cdot \sin \varphi_1 - N \cdot \sin \varphi + r_0 \cdot \sin^2 \varphi \cdot ds \cdot \cos \varphi - p_0 \cdot ds = 0. \quad (20)$$

¹ Другими словами, Тонтa допустил, что касательная в этой точке вертикальна, т. е. груз органически связан с лотлинем и составляет естественное его продолжение.

² Здесь сохранены условные обозначения, принятые в § 1.

Углы φ и φ_1 и натяжения N и N_1 бесконечно близки по величине, следовательно уравнения (19) и (20) можно написать в виде дифференциальных уравнений:

$$d(N_1 \cdot \cos \varphi) - r_0 \cdot \sin^3 \varphi \cdot ds = 0; \quad (21)$$

$$d(N \cdot \sin \varphi) + r_0 \cdot \sin^2 \varphi \cdot ds \cdot \cos \varphi - p_0 \cdot ds = 0. \quad (22)$$

Произведя дифференцирование и разделив оба уравнения на ds , получаем:

$$\frac{dN}{ds} \cdot \cos \varphi - \frac{d\varphi}{ds} \cdot N \cdot \sin \varphi - r_0 \cdot \sin^3 \varphi = 0; \quad (23)$$

$$\frac{dN}{ds} \cdot \sin \varphi + \frac{d\varphi}{ds} \cdot N \cdot \cos \varphi + r_0 \cdot \sin^2 \varphi \cdot \cos \varphi - p_0 = 0. \quad (24)$$

Сделав замену

$$\frac{dy}{ds} = \sin \varphi$$

способом взаимных подстановок, получаем из уравнений (23) и (24) выражение

$$\frac{dN}{ds} = p_0 \cdot \frac{dy}{ds} = 0, \quad (25)$$

позволяющее определить натяжение лотлиния в любой точке. Для этого интегрируем уравнение (25), замечая, что для начала координат (рис. 2, точка A) $S=0$, $y=0$ и $N=N_0$; получаем

$$N = N_0 + F_0 \cdot y \quad (26)$$

Из уравнений вида (23) и (24) и с помощью уравнения (26) можно вывести точные формулы, но вследствие их необычайной сложности они не могут иметь практического применения, поэтому для определения координат точки B (рис. 2) остается сделать некоторые допущения и решить задачу по приближенным формулам.

Не зная истинной формы кривой, образуемой лотлинем, допустим, что лотлинь вытянут по прямой линии, т. е. примем в первом приближении

$$y = S \cdot \sin \varphi_0 = S \cdot \sin (90^\circ - \varepsilon).$$

Тогда

$$N = N_0 + p_0 \cdot S \cdot \sin \varphi_0. \quad 1^\circ \text{ приближение} \quad (27)$$

Чем меньше вес лотлиня по отношению к его натяжению, тем меньше ошибка, происходящая при вычислении натяжения по формуле (27). В первом приближении пренебрегаем этой ошибкой, дру-

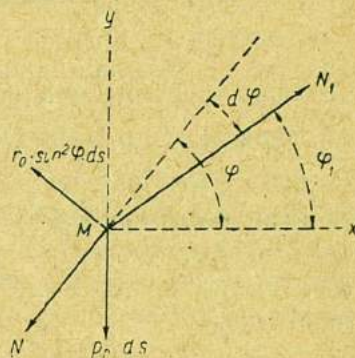


Рис. 9.

гими словами считаем величину N постоянной, что равносильно тому, что в уравнении (24)

$$\frac{dN}{ds} = 0 \text{ и } p_0 = 0. \quad (\text{см. урн. 25})$$

Тогда интегрированием этого упрощенного уравнения

$$-\frac{d\varphi}{\sin^2 \varphi} = \frac{r_0}{N} \cdot ds \quad (28)$$

получаем в первом приближении угол встречи

$$\cotg \varphi = \cotg \varphi_0 + \frac{r_0}{N} \cdot s. \quad (29)$$

Подставив в уравнение (28) величину

$$dy = \sin \varphi \cdot ds,$$

получаем дифференциальное уравнение

$$dy = -\frac{N}{r_0} \cdot \frac{d\varphi}{\sin \varphi}, \quad (30)$$

позволяющее определить в первом приближении

$$y = \frac{N}{r_0} \cdot 2,3026 \cdot \log \frac{\cotg \frac{\varphi}{2}}{\cotg \frac{\varphi_0}{2}}. \quad (31)$$

Найденное значение y подставляем в формулу (26) и, получив таким образом исправленное значение N , вычисляем по формулам (29) и (30) угол φ и ординату y во втором приближении (и т. д., до требуемого предела точности). После этого, подставив в уравнение (30) значение

$$dy = dx \cdot \tg \varphi,$$

вычисляем

$$x = \frac{N}{r_0} \cdot (\operatorname{cosec} \varphi - \operatorname{cosec} \varphi_0). \quad (32)$$

В виде примера приводится вычисление поправки для тех же исходных данных, что и в § 4, для $S = 50$ м.

1-е приближение:

$$\begin{aligned} N_0 &= \frac{P}{\sin \varphi} = \frac{27,23}{\sin 86^\circ 13' 10''} = 27,29 \text{ кг.} \\ N &= 27,29 + 0,007 \cdot 50 \cdot \sin 86^\circ 13' 10'' = 27,64 \text{ кг.} \\ \operatorname{arc} \cotg \varphi &= \cotg 86^\circ 13' 10'' + \frac{0,36}{27,64} \cdot 50 = 54^\circ 21'. \\ y &= \frac{27,64}{0,36} \cdot 2,3026 \cdot \log \frac{\cotg 27^\circ 10' 30''}{\cotg 43^\circ 6' 35''} = 46,12 \text{ м.} \end{aligned}$$

2-е приближение:

$$N = 27,29 + 0,007 \cdot 46,12 = 27,61 \text{ кг.}$$

$$\text{arc cotg } \varphi = \text{cotg } 86^\circ 13' 10'' + \frac{0,36}{27,61} \cdot 50 = 54^\circ 19' 20''.$$

$$y = \frac{27,61}{0,36} \cdot 2,3026 \cdot \log \frac{\text{cotg } 27^\circ 9' 40''}{\text{cotg } 43^\circ 6' 35''} = 46,12 \text{ м.}$$

$$x = \frac{27,61}{0,36} \cdot (\text{cosec } 54^\circ 19' 20'' - \text{cosec } 86^\circ 13' 10'') = 17,55 \text{ м.}$$

$$q = s - y = 3,88 \text{ м.}$$

Таким образом, при применении тонкого лотлиня и для небольших значений S вполне достаточно первого приближения.

Результаты, полученные по приближенным формулам, весьма близки к результатам вычисления точным способом, изложенным в § 4. Для сравнения здесь приводится таблица значений x , y , r и q , вычисленных обоими способами.

Как и следовало ожидать, по приближенному методу получены несколько преувеличенные значения угла α , так как при точном способе учитывается вес лотлиня, вообще говоря способствующий уменьшению угла α и поправки q . Однако, как об этом свидетельствует длинный ряд вычислений, сделанных для различных диаметров лотлиня и для различных скоростей v_0 , приближенный способ с практической точки зрения дает вполне удовлетворительные результаты.

Идея всех аналитических и экспериментальных методов вычисления поправки заключается не в том, чтобы точно определить поправку для данной системы лота, т. е. для данной выюшки, для данного груза и для данного лотлиня и при этом для данной скорости v_0 , а в том, чтобы исключить из числа аргументов наибольшее число переменных величин и выразить поправку в зависимости лишь от двух переменных величин (измеренной глубины S и угла наклона лотлиня α), которые достаточно точно определяются с помощью счетчика и угломера в момент падения груза на дно. Каждому сочетанию величин S и α , независимо от системы лота, соответствует только одно, практически достаточно точное, значение истинной глубины; таким образом, явление, которое еще сравнительно недавно казалось слишком сложным и неразрешимым, в действительности не только поддается анализу, но и находит себе простейшее практическое оформление.

Допустим, что при решении приведенного выше примера мы неправильно учли коэффициент сопротивления лотлиня и приняли его равным 80 (а не 60) и получили при этом, вместо $\alpha = 35^\circ 41'$ и $q = 3,88$ м,

Таблица 3

Сравнение элементов поправки за наклон лотлиня, вычисленных точным и приближенным способами для лота-рыба весом в 30 кг, диаметра лотлиня 1,5 мм и скорости движения $v_0 = 2$ м/сек.

S — длина погруженной части лотлиня м	Способ вычисления	x м	y м	Угол встречи у поверхности моря φ	Угол отклонения лотлиня от вертикали α	Поправка $q = s - y$ м	Разница в вычисленных обоними способами величинах	
							α	q
10	точн.	1,37	9,90	78°50'	11°10'	0,10	0°1'	0,01
	прибл.	1,30	9,91	78 49	11 11	0,09		
20	точн.	3,96	19,55	71 51	18 9	0,45	0 2	0,02
	прибл.	3,84	19,57	71 49	18 11	0,43		
30	точн.	7,66	28,83	65 26	24 34	1,17	0 5	0,04
	прибл.	7,49	28,87	65 20	24 39	1,13		
40	точн.	12,32	37,67	59 37	30 23	2,33	0 6	0,07
	прибл.	12,11	37,74	59 31	30 29	2,26		
50	точн.	17,80	46,03	54 20	35 32	3,97	0 9	0,09
	прибл.	17,55	46,12	54 19	35 41	3,88		
60	точн.	23,97	53,90	49 55	40 5	6,10	0 11	0,10
	прибл.	23,69	54,00	49 44	40 16	6,00		
70	точн.	30,70	61,29	45 58	44 2	8,71	0 15	0,13
	прибл.	30,38	61,42	45 43	44 17	8,58		
80	точн.	37,89	68,24	42,27	47 33	11,76	0 16	0,14
	прибл.	37,55	68,38	42 11	47 49	11,62		
90	точн.	45,47	74,76	39 23	50 37	15,24	0 17	0,15
	прибл.	45,10	74,91	39 06	50 54	15,09		
100	точн.	53,34	80,90	36 42	53 18	19,10	0 20	0,16
	прибл.	52,97	81,06	36 22	53 38	18,94		
110	точн.	61,50	86,69	34 20	55 40	23,31	0 23	0,16
	прибл.	61,11	86,85	33 57	56 3	23,15		
120	точн.	69,69	92,16	32 15	57 45	27,84	0 27	0,15
	прибл.	69,47	92,31	31 48	58 12	27,69		

значения $\alpha = 38^\circ$ и $q = 4,62$ м. В таком случае (если в море для контроля не измерялся угол α) вместо истинной глубины 46,1 м мы вычислим неверную глубину 45,4 м. Точно так же может быть сделана ошибка, если неправильно учтено сопротивление груза F , и несомненным преимуществом способов Куртье и Тонта является то обстоятельство, что, вместо сомнительных и во многих случаях недостаточно точно известных коэффициентов сопротивления груза и лотлиния, они определяют постоянную лота:

$$m_0 = \frac{r_0}{F}; \quad (\text{Куртье})$$

$$C = \frac{F}{r_0}. \quad (\text{Тонта})$$

Но это не означает, что изложенный выше способ, при котором не требуется определения постоянной лота, является менее надежным. Произведено свыше 700 вычислений поправки при различных сочетаниях веса груза, диаметра лотлиния и скорости v_0 и составлен ряд графиков, на которых поправка q выражена при $v_0 \text{ const}$ как функция от измеренной глубины и от диаметра лотлиния или как функция от измеренной глубины и от веса груза и т. д.

Все полученные зависимости свидетельствуют о том, что таблицы, в которых поправка выражена как функция от двух аргументов — S и α и которые составлены по результату вычислений для данной системы лота, с достаточной для практических целей точностью могут применяться и для всякого иного груза и для иного диаметра лотлиния. За невозможностью привести здесь весь материал ограничимся двумя примерами:

1) Для лота-рыба весом 60 кг, скорости $v_0 = 2$ м/сек. и диаметра лотлиния 2,5 мм измеренной глубине $S = 50$ м соответствуют

$$\alpha = 30^\circ 33' \text{ и } q = 2,80 \text{ м.}$$

Входя с аргументами $S = 50$ м и $\alpha = 30^\circ 1/2$ в таблицы поправок, вычисленных для лота-рыба весом 30 кг и диаметра лотлиния 1,5 мм, получаем поправку $q = 2,86$ м. Ясно, что расхождение в 6 см для глубины 47 м не имеет никакого значения.

2) Для лота-рыба весом 60 кг, скорости $v_0 = 1$ м/сек. и диаметра лотлиния 2,5 мм измеренной глубине $S = 200$ м соответствуют

$$\alpha = 28^\circ 7' \text{ и } q = 8,88 \text{ м.}$$

По упомянутым выше таблицам для аргументов $S = 200$ м. и $\alpha = 28^\circ 1$ получаем поправку $q = 8,7$ м; следовательно для глубины 191 м расхождение составило всего 2 дм, или 0,1%.

Во всех случаях, в пределах до $S = 500$ м и $\alpha = 60^\circ$,¹ расхождения, которые могут произойти при применении иного груза или иного диаметра лотлиня, не превышают 0,5‰, так как далеко не выходят за пределы принятых в гидрографии округлений глубин. Таким образом, вычислив по изложенному здесь способу таблицы поправок q для какой-либо определенной системы лота, нет необходимости вычислять дополнительные поправки ни для малых глубин (как это вынуждены делать Куртье и Тонта), ни для груза иного веса (это делает Марки) или иной формы.

Однако необходимо иметь в виду, что все сказанное относится к случаям применения лотлиня, изготовленного из стального троса диаметром от 1,5 до 3 мм.

При применении более толстого лотлиня поправка всегда будет преувеличиваться, т. е. глубины будут более или менее преуменьшаться и при этом в пределах, выходящих за пределы округления глубин. Наоборот, фортепианная струна сравнительно мало изгибается, поэтому при тех же значениях, что и для лотлиня диаметром от 1,5 до 3 мм, поправка всегда будет преуменьшаться, т. е. глубины будут заметно преувеличиваться. Таким образом, для лотлиня толщиной 3 мм и тоньше 1,5 мм требуется составление особых таблиц.

Остается сделать несколько практических замечаний.

1) Как уже упоминалось (§ 4), при измерении малых глубин необходимо учитывать поправку на отклонение места нуля, т. е. определять истинную глубину по формуле (14).

2) Чем больше вес груза по сравнению с весом вытравленного лотлиня, тем точнее замечается момент падения груза на дно и тем точнее, следовательно, отсчет измеренной глубины l . Во всяком случае вес груза не должен быть меньше веса вытравленного лотлиня, особенно если работа производится электрическими вьюшками (системы Люкас, Макс и др.) без выключения двигателя (т. е. стравливанием задним ходом с небольшой сравнительно скоростью порядка 2—4 м/сек).² Угол α , как уже упоминалось, следует измерять с точностью до 1° надежным металлическим угломером специальной конструкции. Таким образом, с технической точки зрения, при соблю-

¹ В этих пределах вычислены таблицы поправок q .

² В экспедиции 1934 г. на л/п „Седов“ в Карском море при измерении глубин свыше 200 м принято было за правило подвешивать к лотлиню два груза обычного типа (Томсона); при этом при любых условиях погоды отчетливо улавливался момент падения груза на дно на глубинах до 580 м (больше 580 м глубин не встречалось), но в свежую погоду с одним грузом бывали случаи неудачных измерений даже на глубинах менее 200 м.

дении соответствующих правил, определение поправки q по величинам l и α не вызывает никаких затруднений.

3) По мнению Куртье и Марти, лот-рыба не следует применять на глубинах свыше 50 м и на больших скоростях, вызывающих отклонение лотлиня на угол $\alpha > 30^\circ$; но из практики известно, что лот-рыба с успехом применялся и на глубинах 200 м и более и при углах отклонения до $50-60^\circ$. В сущности, нет никаких оснований ограничивать применение лота-рыбы какими-либо пределами в отношении глубины. Что же касается угла α , то действительно, начиная с некоторого предела, порядка $50-55^\circ$, изменения этого угла становятся мало ощутительными и перестают быть надежными показателями глубины¹ (кроме того, не имеется экспериментальных данных, касающихся коэффициента сопротивления лотлиня при углах встречи $\varphi < 30^\circ$ (или $\alpha > 60^\circ$); таким образом, на малых глубинах (при точных работах) предельным следует считать угол $\alpha = 50^\circ$, а на больших глубинах — угол $\alpha = 60^\circ$.

4) Абсцисса x , выражающая горизонтальное отклонение груза от вертикали, проведенной через счетчик, является поправкой, которую следует вводить при обработке промера в крупных масштабах, так как место измеренной глубины находится в точке падения груза на дно.²

5) Все способы вычисления поправки q , изложенные в §§ 4—7, относились непосредственно к случаю применения лота-рыба. Практически они справедливы и для случая, когда судно измеряет глубину механическим лотом по счетчику, стоя с застопоренной машиной при наличии ветра или поверхностного течения; происходящий вследствие этого дрейф судна и вызывает искривление лотлиня подобно тому, как это бывает при буксировании лота-рыба. Теоретически это не совсем верно, потому что вся система (груз и лотлинь) не только буксируется дрейфующим судном в горизонтальном направлении, но и увлекается весом груза на дно, испытывая при этом сопротивление воды и в вертикальном направлении. Таким образом, лотлинь изгибается интенсивнее, чем это было бы при одном лишь горизонтальном перемещении, а вес груза (P_0) уменьшается на величину сопротивления, испытываемого нижней поверхностью груза. Под влиянием обеих этих причин угол α , при данной скорости дрейфования судна v_0 , всегда будет больше, чем если бы этот же самый лот буксировался судном, идущим с той же скоростью v_0 , но

¹ В этих случаях более точные результаты получаются по средней скорости разматывания лотлиня (§ 3).

² Таблицы этих поправок составляются в Гидрографическом управлении УМС РККА.

3—1635 Северный морской путь, № 7.

если бы лотлинь при этом не разматывался. Но мы уже видели, что изменение элементов системы (а равно и элементов движения и сопротивления) с практической точки зрения не вносит изменений в таблицы поправок q , следовательно этими таблицами можно пользоваться и для случая измерения глубин на стопе. Наглядным подтверждением этому является сравнение результатов, полученных нами для лота-рыба, с итогами исследования де-Марки.

§ 8. Метод де-Марки

Все предыдущие рассуждения, касающиеся вычисления поправки q для лота-рыба, велись на основах статики; при этом авторы прямым или косвенным путем стремились вывести уравнение кривой, образуемой лотлинем, так как знание формы лотлиня дает вместе с тем знание поправки за наклон лотлиня. Профессор де-Марки, рассматривая случай измерений глубины с судна, стоящего с застопоренной машиной, прибегает к помощи динамики и непосредственно определяет форму лотлиня и величину поправки. Если исключить из исследования некоторые случайные погрешности и слабые места, вызванные, например, отсутствием ясного представления о скорости ветрового дрейфа и не влияющие на конечные результаты, то для рассматриваемого в этой статье вопроса выводы де-Марки представят исключительный интерес.

Ввиду сравнительной недоступности источника,¹ в последующем изложении математическая часть исследования де-Марки почти не подвергнута сокращению, из описательной же части сохранено наиболее существенное.

„Точное измерение морских глубин, — так начинает де-Марки свое исследование, — осуществимо только в штиль, когда лотлинь в течение всей операции сохраняет вертикальное положение, и при условии, что не имеется глубинного течения, которое могло бы значительно отклонить груз, не вызывая в то же время заметного искривления лотлиня в надводной его части, т. е. там, где производится измерение угла специальным угломером“. Впрочем, замечает де-Марки, существенное искажение глубины может произойти лишь при наличии сильного глубинного течения, действующего в мощном слое, но в этом случае угломером будет зафиксировано отклонение лотлиня, которое и будет служить признаком неточности измерения (в штиль и при отсутствии движения судна).

¹ Единственный в Ленинграде подлинник принадлежит Ю. М. Шокальскому, любезно предоставившему его для перевода, который в рукописи имеется в библиотеке Гидрографического управления Главсевморпути.

Мнение, высказанное де-Марки по этому вопросу, следует признать во всех отношениях правильным; автору случалось проверять его на опыте. Мнение это имеет практическое значение в том смысле, что несмотря, быть может, на совершенство имеющихся способов вычисления поправки, продолжает все же существовать ряд причин, по которым сохраняет силу правило относительно округления измеренных (и исправленных за наклон лотлиня) глубин, особенно больших глубин, порядка 500 м и более. Таким образом, если механический лот в смысле точности может конкурировать с эхо-лотом на малых глубинах (в общем случае менее 200 м), то на больших глубинах он состязаться с ним может не всегда и не везде.

Далее де-Марки переходит к основной теме, т. е. к рассмотрению условий, которые существуют при измерении глубин с судна, дрейфующего под влиянием поверхностного течения или ветра или обеих причин вместе.

а) Уравнения движения лота

Приняв начало координат у счетчика, де-Марки считает ось y положительной в вертикальном направлении, а ось x положительной в направлении, обратном направлению дрейфа судна.

Пусть

u — скорость разматывания лотлиня,

v_0 — „ „ движения (дрейфа) судна,

p_0 — вес единицы длины лотлиня в воде,

r_x — сопротивление воды на единицу длины лотлиня, направленное по оси x ,

N — натяжение лотлиня в рассматриваемой точке,

g — ускорение силы тяжести,

s — длина кривой, измеренная от начальной точки,

l — длина лотлиня от начала координат до данной точки,

P_0 — вес груза в воде и

R — радиус кривизны.

Напомним, что рассматриваемое явление отличается большой сложностью, крайне затрудняющей строгий математический анализ. Не перечисляя здесь все причины, искажающие вычисления, укажем на некоторые явления, о которых вскользь упоминалось в предыдущем изложении и которые частично или вовсе не затрагиваются другими авторами.

По техническим причинам трудно поддерживать равномерную скорость разматывания лотлиня (u), но если бы даже это было до-

стигнуто, то нельзя было бы точно учесть сопротивление от трения, возрастающее с увеличением длины лотлиня и ослабляющее натяжение лотлиня N .¹ Можно было бы упростить вопрос, рассматривая суммарное сопротивление воды лотлиню, которое происходит и вследствие движения судна со скоростью v_0 и вследствие падения всей системы (груза и лотлиня) со скоростью u . Но в случае буксирования лота-рыба скорость v_0 постоянна для каждой точки лотлиня, а в данном случае каждая точка лотлиня движется с переменной скоростью.² Де-Марки, например, вовсе не учитывает не только сопротивление воды лотлиню, происходящее вследствие падения в вертикальном направлении со скоростью u , но и вертикальную составляющую r_y сопротивления r_0 , происходящего вследствие движения в горизонтальном направлении со скоростью v_0 ; в его представлении существует лишь одна горизонтальная сила r_x , и это обстоятельство является главным недостатком метода де-Марки.³

Далее, при падении всей системы груз и лотлинь пересекают неоднородную среду; температура и соленость морской воды на различных горизонтах неодинаковы, следовательно силы P_0 , p_0 и r_0 являются, хотя и в небольшой степени, переменными, а не постоянными величинами.

Наконец, траектория груза теоретически не является прямой линией (§ 3),⁴ но никаких экспериментальных данных по этому вопросу не имеется.

По всем этим причинам и по ряду других причин, как при статических методах других авторов, так и при динамическом методе де-Марки, нет возможности обойтись без некоторых упрощений и

¹ Явление подтверждено рядом опытов, о которых упоминает также и де-Марки.

² Переменная величина равнодействующей скорости обусловлена непостоянством угла встречи.

³ Кроме того, де-Марки преувеличивает числовое значение силы r_x , определяя ее по формуле

$$r_x = 100 \cdot d \cdot v^2,$$

тогда как

$$r_x = r_0 \cdot \sin^3 \varphi = 60 \cdot d \cdot v^2 \cdot \sin^3 \varphi.$$

Но благодаря этому отчасти компенсируется факт пренебрежения величиной r_y , которая к тому же мала по сравнению с r_x .

⁴ Если бы груз падал по вертикали, то каждое измерение морской глубины на стопе являлось бы вместе с тем экспериментальным определением дрейфа судна; для этого достаточно было бы определить: 1) промежуток времени от начала измерения глубины до момента падения груза на дно и 2) абсциссу x (§ 7). Практически с небольшой ошибкой этим способом можно определить дрейф лишь при скорости разматывания лотлиня не менее 5 м/сек., при меньших же скоростях и скорость дрейфа всегда будет преуменьшаться.

допущений. В частности, де-Марки допускает, что груз падает по вертикали, и рассматривает условия движения относительно подвижных осей координат так, как будто оси координат неподвижны, а вся система (груз и лотлинь) движутся и в вертикальном и в горизонтальном направлениях; по существу дела это одно и то же. В таком случае основные дифференциальные уравнения движения лотлиня напишутся в следующем виде:

$$\frac{P_0}{g} \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = r_x \cdot \frac{dy}{dx} + \frac{d}{ds} \left(N \cdot \frac{dx}{ds} \right); \quad (33)$$

$$\frac{P_0}{g} \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = P_0 + \frac{d}{ds} \left(N \cdot \frac{dy}{ds} \right). \quad (34)$$

Груз движется под влиянием силы тяжести P_0 и натяжения лотлиня N .

Допустим сперва, что груз представляет материальную точку, имеющую вес P_0 и не испытывающую сопротивления воды.

Тогда

$$\frac{P_0}{g} \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -N \cdot \frac{dx}{ds}; \quad (35)$$

$$\frac{P_0}{g} \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = P_0 - N \cdot \frac{dy}{ds}. \quad (36)$$

По сделанному вначале допущению траектория груза представляет, в сущности, форму лотлиня, и можно считать, что в каждый данный момент груз опускается по касательной к нижнему концу кривой предыдущего момента.

Тогда

$$\frac{dx}{dt} = u \cdot \frac{dx}{ds}; \quad \frac{dy}{dt} = u \cdot \frac{dy}{ds}$$

и уравнения (35) и (36) напишутся в следующем виде:

$$\frac{P_0}{g} \cdot u^2 \cdot \frac{d^2x}{ds^2} = -N \cdot \frac{dx}{ds};$$

$$\frac{P_0}{g} \cdot u^2 \cdot \frac{d^2y}{ds^2} = P_0 - N \cdot \frac{dy}{ds}.$$

Отсюда

$$N = P_0 \cdot \frac{dy}{ds}; \quad (37)$$

$$\frac{u^2}{g \cdot R^2} = \frac{d^2y}{ds^2}. \quad (38)$$

Пренебрегая в уравнениях (33) и (34) первыми членами, по интегрированию получаем

$$r_x \cdot (y - y_0) + N \cdot \frac{dx}{ds} = 0, \quad (39)$$

где y_0 — постоянная величина. И, наконец, исключив величину N , получаем дифференциальное уравнение кривой

$$p_0 = r_x \cdot \frac{d}{ds} \left\{ (y - y_0) \frac{dy}{dx} \right\}. \quad (40)$$

б) Кривая, образуемая очень тонким лотлинем при сильном дрейфе

Сопротивление r_x быстро возрастает с увеличением скорости дрейфа v_0 , и в частном и вместе с тем простейшем случае, когда вес p_0 очень мал по сравнению с сопротивлением r_x , т. е. когда отношение $p_0:r_x=0$, уравнение (40) принимает вид:

$$(y - y_0)^2 = -m(x - x_0), \quad (41)$$

где m и x_0 — постоянные, выражающие известные пределы. Следовательно кривая, образуемая легким лотлинем, является параболой с вертикальной осью и с вершиной в начале координат (x_0, y_0).

Путем преобразований предыдущих уравнений де-Марки определяет параметр параболы из уравнения

$$\frac{m}{2} = \frac{P_0}{r_x \cdot G},$$

где

$$G = 1 + \frac{u^4 \cdot r_x^2}{g^2 \cdot P_0^2}.$$

Второй член в правой части этого равенства близок к нулю, т. е. $G \approx 1$, и практически параметр параболы равен $P_0:r_x$.¹

¹ Заметим, что параметр параболы

$$\frac{P_0}{r_x} = \frac{F}{r_k} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \varepsilon},$$

весьма близок по величине к параметру цепной линии (Тонга, Куртье и др.)

$$\frac{F}{r_0} \cdot \frac{1}{\sin \varepsilon},$$

так как, по малости ε , $\operatorname{tg} \varepsilon \approx \sin \varepsilon$ и $r_k = r_0$. Отсюда видно, до какой степени близки между собой выводы всех исследователей, и если аналитически и нельзя определить точный вид кривой, то а priori можно полагать, что для случая буксирования лота-рыба (явление статического порядка) кривая ближе подходит к цепной линии, а при измерении со стопа (явление динамического порядка) — к параболе. Истина находится, вероятно, где-либо посередине, и практически все выводы достаточно точны.

в) Влияние сопротивления воды при падении груза

Если F и F_1 — горизонтальная и вертикальная составляющие сопротивления воды, то уравнения движения груза напишутся в следующем виде:

$$F - N \cdot \frac{dx}{ds} = \frac{P_0}{g} \cdot u^2 \cdot \frac{d^2x}{ds^2}$$

$$P_0 - F_1 - N \cdot \frac{dy}{ds} = \frac{P_0}{g} \cdot u^2 \cdot \frac{d^2y}{ds^2}$$

и после преобразований:

$$F \cdot \frac{dx}{ds} + (P_0 - F_1) \cdot \frac{dv}{ds} = N \quad (42)$$

$$F \cdot \frac{d^2x}{ds^2} + (P_0 - F_1) \cdot \frac{d^2y}{ds^2} = \frac{P_0}{g} \cdot \frac{u^2}{R^2} \cdot \quad (43)$$

Следовательно, влияние сопротивления F_1 выражается в уменьшении веса P_0 . Величину

$$P_1 = P_0 - F_1$$

де-Марки называет остаточным весом груза. Путем преобразований уравнений (41) и (42) он определяет, что параметр параболы уменьшается пропорционально отношению остаточного веса P_1 к весу P_0 .

г) Определение глубины по углу отклонения и по длине вытравленного лотлиня

В уравнении (41) величина

$$y - y_0 = y_1$$

представляет истинную глубину, которую можно принять за ординату груза в момент, когда он касается дна; эта величина определяется из уравнения параболы. Если l — длина вытравленного лотлиня, то y и y_0 определяются из выражения

$$l = \int_0^y dy \cdot \sqrt{1 + \frac{4(y-y_0)^2}{m^2}} = \int_{-y_0}^{y_1} dy_1 \cdot \sqrt{1 + \frac{4y_1^2}{m^2}}.$$

Из уравнения параболы имеем

$$\frac{2y_1}{m} = - \frac{dx}{dy} = - \operatorname{tg} \alpha, \quad (44)$$

где α — угол между элементом ds кривой и вертикалью.

Следовательно

$$\sqrt{1 + \frac{4y_1^2}{m^2}} = \frac{1}{\cos \alpha}; \quad dy_1 = - \frac{m}{2} \cdot \frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha}.$$

Далее

$$l = -\frac{m}{2} \int_{\alpha_0}^{\alpha_s} \frac{d\alpha}{\cos^3 \alpha} = \frac{m}{2} \int_0^{\alpha_s} \frac{d\alpha}{\cos^3 \alpha} - \frac{m}{2} \int_0^{\alpha_s} \frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha},$$

где α_0 — угол отклонения от вертикали надводной части лотлиня, измеренный на судне угломером, а α_s — угол в точке прикрепления лотлиня к грузу (угол ϵ).

В последнем выражении первый интеграл выражает полную длину дуги параболы от дна до начала координат, а второй — кривую от дна до точки скрепления лотлиня с грузом. Обозначив длину этой второй кривой через λ и решая первый интеграл, получаем

$$l + \lambda = \frac{m}{4} \left(\frac{\sin \alpha_0}{\cos^2 \alpha_0} + \frac{1}{2} \log \frac{1 + \sin \alpha_0}{1 - \sin \alpha_0} \right).$$

Из уравнения (43) для $x=0$ и $y=0$ имеем

$$y_1 = -y_0, \text{ откуда } \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{2}{m} \cdot y_0,$$

следовательно,

$$y_0 = (l + \lambda) \frac{\cos \alpha_0}{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\cos^2 \alpha_0}{\sin \alpha_0} \cdot \frac{1}{M} \log \frac{1 + \sin \alpha_0}{1 - \sin \alpha_0}}.$$

Здесь модуль логарифма $M = 0,43429$. Обозначив коэффициент при $(l + \lambda)$ через $K(\alpha_0)$ и имея для $s=l$ величину

$$y_0 - y = \lambda \cdot K(\alpha_s),$$

где $K(\alpha_s)$ определяется заменой α_s на α_0 , в итоге получаем

$$y = l \cdot K(\alpha_0) - \lambda \{ K(\alpha_s) - K(\alpha_0) \}.$$

При измерении больших глубин, когда величина λ очень мала по сравнению с l , ею можно пренебречь, следовательно,

$$y = l \cdot k(\alpha_0). \quad (45)$$

Это выражение, позволяющее определить истинную глубину, если известны угол α_0 и длина вытравленного лотлиня l , по форме аналогично выражениям, полученным Куртье и Тонта, и абсолютные величины этих выражений, полученных тремя авторами двумя различными методами (статическим и динамическим), весьма близки между собою.

Так же, как Куртье и Тонта, дающие дополнительную поправку для исправления малых глубин, и де-Марки считает в этих случаях формулу (44) слишком грубой, так как нельзя пренебрегать величиной λ , особенно при больших значениях угла α_0 .

Дополнительная поправка, по форме резко отличающаяся от дополнительных поправок Куртье и Тонта, выведена де-Марки в зависимости от элементов лотлиня и груза удлиненной цилиндрической формы. Если L — высота и D — диаметр груза, а d — диаметр лотлиня, то истинная глубина

$$y = l \cdot K(\alpha_0) - L \cdot \frac{D}{d} \{1 - K(\alpha_0)\}. \quad (46)$$

Формула (45) выведена для работы на малых глубинах с тонким лотлинем и с достаточно тяжелым грузом, а также для случая сильного дрейфа и вообще для случая, когда отношение $\frac{p_0}{r_0}$ очень мало и может считаться равным нулю. Но эта формула имеет и более широкое применение.

д) Кривая, образуемая лотлинем при медленном дрейфе. Обобщение случая параболы

Для случая медленного дрейфа, когда отношение $\frac{p_0}{r_0} > 0$, де-Марки дает следующее решение.

Уравнение (40) можно написать в виде

$$\frac{p_0}{r_x} \cdot \sqrt{1 + x_1^2} = \frac{d}{dy} \left(\frac{y - y_0}{x_1} \right), \quad (47)$$

где

$$x_1 = \frac{dx}{dy} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Путем преобразований, в процессе которых пренебрегаем величиной x_1^4 , получаем

$$\frac{dx_1}{x_1 \cdot \left(\frac{p_0}{r_x} \cdot x_1 - 1 \right)} = - \frac{dy_1}{y_1},$$

где

$$y_1 = y - y_0.$$

Откуда

$$\log \frac{\frac{p_0}{r_x} \cdot x_1 - 1}{x_1} = \log \frac{C}{y_1}.$$

C — величина постоянная, следовательно,

$$\frac{1}{x_1} = \frac{dy_1}{dx} = \frac{p_0}{r_x} - \frac{C}{y_1} \quad (48)$$

или

$$x_1 = \frac{r_x \cdot y_1}{p_0 \cdot y_1 - C \cdot r_x}.$$

Интегрируя это выражение и обозначая постоянную через x_0 , получаем уравнение кривой

$$x - x_0 = \frac{r_x}{p_0} \cdot y_1 + C \cdot \frac{r_x^2}{p_0^2} \cdot \log \left(1 - \frac{p_0}{r_x} \cdot \frac{y_1}{C} \right). \quad (49)$$

Постоянная x_0 превращается в x при $y = y_0$. Постоянные C и y_0 определяются, как и в предыдущем случае, в уравнениях (41) и (42), длиной вытравленного лотлиня.

Величина $F \cdot \frac{d\tau}{ds}$ мала по сравнению с величиной $P_1 \cdot \frac{dy}{ds}$; пренебрегая ею, получаем

$$P_1 \cdot \frac{\varphi}{1 + \varphi^2} + r_x \cdot y_1 = 0,$$

где

$$\varphi = \frac{dy_1}{dx}.$$

Подставляя значение φ из уравнения (47), получаем

$$1 + \left(\frac{r_x \cdot y_1}{p_0 \cdot y_1 - C \cdot r_x} \right)^2 = Q$$

или

$$(p_0 \cdot y_1 - C \cdot r_x) \cdot Q + P_1 = 0. \quad (50)$$

Следовательно

$$C = \frac{P_1}{r_x \cdot Q} - \frac{p_0}{r_x} \cdot y_1. \quad (51)$$

Кроме того

$$\frac{dy}{ds} = Q^{-\frac{1}{2}}.$$

Следовательно

$$\frac{d^2y}{ds^2} = \frac{1}{Q^2} \cdot \frac{C \cdot r_x^3 \cdot y_1}{(p_0 \cdot y_1 - C \cdot r_x)^3}. \quad (52)$$

Далее

$$\frac{dx}{ds} = x_1 \cdot \frac{dy}{ds} = \frac{r_x \cdot y_1}{p_0 \cdot y_1 - C \cdot r_x} \cdot Q^{-\frac{1}{2}}.$$

Откуда

$$\frac{d^2x}{ds^2} = \frac{1}{Q^2} \cdot \frac{C \cdot r_x^2}{(p_0 \cdot y_1 - C \cdot r_x)^2}. \quad (53)$$

Наконец, из выражения (48) имеем

$$x^{11} = \frac{d^2x}{dy_1^2} = - \frac{C \cdot r_x^2}{(p_0 \cdot y_1 - C \cdot r_x)^2}$$

Следовательно

$$\frac{1}{R} = \frac{x^{11}}{(1 + x_1^2)^{3/2}} = - \frac{1}{Q^{3/2}} \cdot \frac{C \cdot r_x^2}{(p_0 \cdot y_1 - C \cdot r_x)^2}. \quad (54)$$

Величины, полученные из уравнений (52—54), подставляем в уравнение (42); заменяя значение

$$p_0 \cdot y_1 - C \cdot r_x = - \frac{P_1}{Q},$$

получаем из выражения (50)

$$y_1 = - \frac{P_0 \cdot u^2}{g \cdot P_1^2} \cdot C \cdot r_x - \frac{F}{r_x \cdot Q}. \quad (55)$$

Подставляя в уравнение (51) и замечая, что величина Q близка к единице, а величина $p_0 : P_1$ очень мала, получаем

$$C = \frac{P_1}{r_x}. \quad (56)$$

$$y_1 = - \frac{P_0}{P_1} \cdot \frac{u^2}{g} - L \cdot \frac{D}{d}, \quad (57)$$

т. е. получаем те же формулы, что и в предыдущем случае, причем C выражается величиной $\frac{m}{2}$, т. е. параметром параболы.

Анализируя полученные им выражения, де-Марки приходит к следующим выводам:

1) В случае медленного дрейфа можно принять $x = x_0$, т. е. считать, что лотлинь в нижней части кривой вертикален; при этом кривая в своей нижней части совпадает с параболой, и ошибка в вычислении истинной глубины, происходящая вследствие различных допущений, будет тем меньше, чем больше остаточный вес груза веса P_1 и чем меньше скорость разматывания лотлиня, от которой зависит потеря веса груза.

2) В случае сильного дрейфа кривая, как уже доказано, является параболой.

3) Форма кривой зависит от различных физических и кинетических элементов, т. е. от веса и размеров груза, веса и диаметра лотлиня, скорости дрейфа и скорости разматывания лотлиня. Доминирующими элементами являются остаточный вес P_1 , зависящий от реального веса P_0 и скорости u , и гидравлическое сопротивление, зависящее от скорости дрейфа. Если P_1 достаточно велико по сравнению с p_0 , то размер груза и скорость разматывания лотлиня сами по себе не имеют существенного значения.

е) О вычислении поправки

Значение функции $K(\alpha_0)$, вычисленное для практического применения формулы (44), дано в табл. 2 в графе 2.

Таблица 4

α_0	$K(\alpha_0)$	$x:y$	α_0	$K(\alpha_0)$	$x:y$
0°	1,0000	0,0000	25	0,9660	0,2331
5	0,9987	0,0437	30	0,9496	0,2886
10	0,9949	0,0881	35	0,9288	0,3501
15	0,9884	0,1340	40	0,9032	0,4195
20	0,9789	0,1820	45	0,8713	0,5000

По этим данным составлена таблица, применяющаяся в итальянской гидрографии¹ при измерении больших глубин. Для малых глубин учитывается дополнительная поправка, которая дана в таблице в зависимости от угла α_0 и от веса груза; в цитируемой здесь работе де-Марки эта дополнительная поправка выражена формулой (45); дополнительная поправка

$$L \cdot \frac{D}{d} \cdot \{1 - K(\alpha_0)\}$$

вычитается из глубины, полученной по формуле (44). Если, например, $L=1$ м, $D=5$ см и $d=0,9$ мм, то при угле $\alpha_0=35^\circ$ величина дополнительной поправки составит 2,75 м.

Повидимому, де-Марки впоследствии нашел формулу (44) недостаточно надежной и вычислил дополнительную поправку в зависимости от веса груза; математического обоснования этого вывода в нашем распоряжении не имеется, но из всего сказанного в §§ 4, 7 и 8 ясно, что вопрос об исправлении малых глубин решается гораздо проще и гораздо точнее путем расчленения общей поправки на „надводную“ (М·О) и „подводную“ (q). Таким образом, таблица де-Марки представляет интерес лишь в отношении выводов, касающихся исправления глубин порядка 200 м и более, для которых не требуется особой точности. В этом отношении выводы де-Марки имеют существенное практическое значение для океанографических работ, так как они подкреплены анализом экспериментальных данных, полученных при измерении больших глубин (п. з).

ж) О горизонтальном отклонении груза и об условиях работы на больших глубинах

Приближенное горизонтальное расстояние точки, в которой груз достигает дна, от вертикали, проведенной через счетчик, по выводам

¹ П. В. Мессер, Гидрографические работы и морские навигационные карты. Изд. Гидрографического управления УМС РККА, Л., 1933, стр. 127—129.

де-Марки определяется величиной x_0 , так как она лежит в вершине параболы, где угол $\alpha_s = \varepsilon \approx 0$.

Из уравнения параболы, при $x=0$ и $y=0$, имеем

$$x = \frac{y_0^2}{m}$$

или

$$x_0 = \frac{y_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_0.$$

По этой формуле и вычислена графа 3 приведенной выше таблицы (п. е). Как видно из этих данных, горизонтальное расстояние быстро растет с увеличением угла α_0 . Так, например, измеренной глубине 100 м при угле $\alpha_0 = 20^\circ$ соответствует истинная глубина 980 м и $x_0 = 178$ м; при $\alpha_0 = 40^\circ$ истинная глубина составит 903 м, а горизонтальное расстояние 389 м.

Де-Марки отмечает, что величина x_0 обычно бывает меньше общего перемещения судна. Если t — продолжительность измерения глубины, то

$$x_0 \leq v_0 \cdot t$$

или для $l = u \cdot t$

$$\frac{y_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 \leq \frac{v_0}{u} \cdot l.$$

На больших глубинах и при не очень больших углах α_0 величина y_0 мало отличается от l , поэтому приближенно можно принять, что

$$\operatorname{tg} \alpha_0 \leq \frac{2 \cdot v_0}{u},$$

т. е. для каждой скорости движения судна и при соответствующей скорости разматывания лотлиния существует предельное значение угла α_0 , определяемого как

$$\arcsin \operatorname{tg} \frac{2 \cdot v_0}{u}.$$

Так, например, при дрейфе в 1 узел (0,5 м/сек.) и при скорости разматывания лотлиния $u = 2$ м/сек. угол α_0 не должен превышать $26 \frac{1}{2}^\circ$; при той же скорости v_0 , но при $u = 4$ м/сек., предельный угол был бы 14° . Понятно, что, с одной стороны, необходимо не слишком ускорять разматывание лотлиния, чтобы не уменьшать силу P_1 (остаточный вес груза), а с другой стороны, нецелесообразно слишком замедлять стравливание, чтобы угол α_0 не достигал слишком большого значения; кроме того, если измерение глубины слишком затягивается, то условия измерения могут измениться, и обстоятель-

ство это может явиться источником ошибок, если работа производится при наличии глубинного течения или при неравномерной скорости дрейфа; вмешательство той или другой причины равносильно вмешательству силы, не рассматриваемой и не учитываемой никакой теорией. Указывая на эти обстоятельства, имеющие существенное значение при измерении больших глубин, де-Марки уделяет им особое внимание. Приводим его соображения полностью:

„Следствием неравномерной скорости дрейфа, о чем свидетельствует вибрация стравливаемого лотлиня, является неправильное измерение угла α_0 . Если, например, судно во время шквалистого ветра дрейфует рывками, то во время замедления дрейфа лотлинь будет стремиться выпрямиться, приближаясь к вертикали, а во время ускоренного дрейфования он быстро изогнется в своей верхней части. Если движение судна не прямолинейно, а происходит зигзагами, то в то время, когда судно приближается к вертикали, на которой находится в данный момент груз, последний ускорит свое погружение благодаря уменьшению натяжения лотлиня, причем угол α_0 уменьшится; с удалением же судна от груза угол α_0 увеличится“.

„Вообще изменения в скорости и направлении дрейфа, происходящие вследствие непостоянства скорости и направления ветра, ухудшают результаты измерения глубины, так как инерция судна не допускает моментальной остановки и перемены направления дрейфования. Требуется некоторый промежуток времени, в течение которого движение постепенно ускоряется или замедляется. Если измерение глубины началось, как только судно остановилось, то скорость дрейфа v_0 увеличится к концу измерения, и для строгого применения формул следовало бы (даже при постоянстве элементов ветра) выждать, чтобы судно приняло установившееся равномерное движение“.

„Можно полагать, что мы близки к условиям, соответствующим теории, если угол равномерно увеличивается от начала до конца операции. При этом условии форма лотлиня представит параболу или близкую к ней кривую, касательную к окружности блока“.¹

„Если же угол α_0 изменяется неправильно, то на основании всех предыдущих рассуждений можно принять следующие правила:

¹ Подобная картина чаще всего и наблюдается на практике, если измерение глубины начато лишь после того, как судно совершенно остановлено машиной и заняло положение лагом к ветру. Личные наблюдения автора вполне сходятся в этом отношении с выводами и рассуждениями де-Марки. Измерение большой глубины, начатое в то время, когда судно продолжает разворачиваться к ветру (или когда судно не вполне остановлено машиной), всегда будет менее надежным, а в свежую погоду может и вовсе не удалась.

1. Если угол α_0 во время последней фазы измерения уменьшается, то применяется формула вычисления поправки для всей длины вытравленного лотлиня, причем учитывается конечная величина α_0 .

2. Если угол α_0 , который все время был очень малым, резко увеличивается в последней фазе измерения, то можно применить формулу поправки только на протяжении вытравленного за это время лотлиня, т. е. за промежуток времени, протекший после последнего минимума α_0 .

з) Сравнение выводов де-Марки с экспериментальными данными

Во время экспедиции на „Планете“¹ было проделано девять специальных опытов, результаты которых впоследствии были использованы де-Марки для проверки его теории. Вместо груза к лотлиню прикреплялся гидростатический прибор („манометр-регистратор“) в виде толстого металлического герметически закрытого футляра, в котором находился счетчик, отмечавший изменение давления по изгибанию медной, открытой снаружи, трубки, в которую свободно поступала вода. Аналогичные испытания были проделаны антарктической германской экспедицией на „Валдивии“, но применявшийся там манометр оказался слишком чувствительным к толчкам. Манометр „Планеты“ марки Шефер и Буденберга был более грубой конструкции, поэтому нельзя сказать с уверенностью, что глубины, измеренные этим прибором, действительно были истинными глубинами. Так, например, в одном случае была отмечена глубина в пределах от 925 до 950 м; но в остальных восьми случаях показания манометра более или менее совпали с теоретическими выкладками де-Марки, поэтому он склонен им доверять.

Впрочем, де-Марки делает ряд оговорок, полагая, что опыты на „Планете“ производились в неблагоприятных условиях, так как при выводе формул допускалось, что скорость каждого бесконечно малого элемента (ds) лотлиня меняется настолько медленно, что это приращение скорости можно рассматривать как ничтожную силу инерции. Рассуждение это было справедливо для тонкого лотлиня (струны) толщиной 0,9 мм, обычно применявшегося на „Планете“ для промеров. Между тем в данном случае применялся лотлинь диаметром 3 мм, выбиравшийся паровой лебедкой. Вес одного погонного метра такого лотлиня (47 г) был в 11—14 раз больше, чем у струны; пропорционально увеличивалась и инерция, величиной которой уже нельзя пре-

¹ Forschungsreise S. M. S. „Planet“ 1906/07, III Bd. Ozeanographie von Dr. W. Brennecke. Berlin, 1909.

небрегать.¹ Возрастало и отношение $p_0:r_0$; при дрейфе в 1 узел для диаметра 0,9 мм это отношение составляет $1/5$, тогда как для диаметра 3 мм оно достигает 2,1.

По мнению де-Марки, чем сильнее инерция лотлиня, тем медленнее реагирует на все изменения верхний его конец, особенно на большой глубине. Отсюда следует, что в первые минуты падения груза, при прохождении им верхних слоев, кривая лотлиня близка к прямой (очень вытянутая парабола). При постоянстве скорости дрейфа картина существенно не изменится; при увеличении скорости дрейфования изменение формы кривой произойдет лишь в верхней части, т. е. там, где резко увеличится угол α_0 ; если же скорость дрейфа замедлится, то нижняя часть лотлиня, стремясь сохранить направление начального движения, приблизится к вертикали, а угол α_0 уменьшится. Таким образом, в большинстве случаев, когда глубина не слишком велика, лотлинь идет по кривой, мало отличающейся от прямой линии, от которой он отклоняется главным образом лишь в верхней своей части. Но, при измерении больших глубин с применением тонкого лотлиня и груза в несколько десятков килограммов, результаты приблизятся к теоретически выведенным условиям (конечно при отсутствии сильного глубинного течения).

По существу этих рассуждений де-Марки, относящихся к сравнительно толстому лотлиню, надо заметить, что де-Марки несколько преувеличивает роль инерции тела, масса которого слишком мала по сравнению с приложенной к нему внешней силой, каковой является в данном случае сопротивление воды r_0 . Увеличение диаметра лотлиня лишь увеличивает силу r_0 , и при неравномерности скорости дрейфа речь может идти лишь о кратковременных нарушениях правильной параболической формы кривой, причем эти нарушения лишь в самой ничтожной степени зависят от инерции лотлиня, а главным образом они вызываются силой инерции тяжелого груза. Если груз упал на дно в период этих кратковременных нарушений, то, действительно, измеренный угол α_0 не будет служить правильным показателем формы кривой. Таким образом, со всех точек зрения выгоднее, чтобы измерение больших глубин, по возможности, не затягивалось и происходило при однородных внешних условиях.

Упомянутые выше опыты производились на „Планете“ при различных условиях: на самом малом (равномерном) ходу и с застопоренной машиной (лагом к ветру); в пяти случаях судно маневрировало с таким расчетом, чтобы лотлинь, по возможности, сохранял верти-

¹ Достаточно сказать, что вес 1000 м этого лотлиня можно уже сравнивать с весом очень тяжелого груза.

кальное положение, но не всегда это удавалось. Де-Марки, приводя подробное описание опытов, снабжает их пояснениями; вычисляя поправку (для сравнения ее с показанием манометра), в случаях резких изменений угла α_0 он расчленяет лотлинь на части и вычисляет поправку для каждой части в отдельности, вернее лишь для верхней, искривленной части лотлиня. Угол α_0 регистрировался лишь через каждые 50 м, поэтому эти вычисления не могли отличаться особой точностью, к тому же и показания манометра, как уже упоминалось, были не особенно надежными.¹ Во всяком случае в шести случаях из девяти между теоретически вычисленными глубинами и показаниями манометра существенных расхождений не произошло. Ограничимся пятью примерами.

1. Глубина по счетчику 808 м, по манометру 790 м. Судно маневрировало с расчетом довести угол α_0 до нуля, что и удалось на отсчете 550 м, после чего угол быстро стал увеличиваться и к концу измерения достиг 30° . Если не учитывать маневрирования судна и исправить глубину непосредственно по таблице по аргументам $l=808$ м и $\alpha_0=30^\circ$, то истинная глубина составит 768 м. Но де-Марки вводит поправку лишь для последних 258 м; она составляет при $\alpha_0=30^\circ$ 13 м отсюда истинная глубина — 795 м.

2. Глубина по счетчику 808 м, по манометру 780 м. Лотлинь медленно отходит от судна, но на отсчете $l=600$ м достигает 39° ; тогда судно начинает маневрировать для уменьшения угла, и к концу измерения угол составляет 23° . Де-Марки по аргументам $l=808$ м и $\alpha_0=23^\circ$ определяет глубину 784 м.

3. Отсчет по счетчику 800 м; по манометру 690 м. Судно равномерно дрейфует, стоя лагом к ветру. При отсчете 400 м угол α_0 составляет 45° , а на 800 м достигает 57° . Вычисление по аргументам $l=800$ м и $\alpha_0=57^\circ$ дает 636 м; причину расхождения де-Марки видит в слишком большой скорости дрейфа, но по существу это неубедительно.

4. Отсчет по счетчику 1212 м, по манометру 1175 м. Угол α_0 на 400 м составляет 16° , на 800 м 21° и на 1200 м 26° , т. е. плавно возрастает пропорционально длине вытравленного лотлиня, что должно предопределять собою правильную изогнутость кривой. По таблице де-Марки глубина составляет 1168 м.

5. Отсчет по счетчику 707 м, по манометру 700 м. Судно маневрировало для уменьшения угла α_0 и хотя при отсчете 500 м угол до-

¹ Впрочем, при $\alpha_0=0^\circ$ было произведено сравнение показаний счетчика и манометра; было получено соответственно 1010 м и 1000 м. Расхождение в 10 м было отнесено на счет толщины слоя лотлиня на вьюшке и в дальнейшем в отсчеты вводилась поправка — 1%.

стигал 29° , а в дальнейшем то уменьшался, то увеличивался, — в конце измерения он составил всего 7° . Де-Марки по аргументам $l = 707$ м и $\alpha_0 = 7^\circ$ определил глубину 704 м.

Число опытов было, конечно, недостаточным, но производились они тщательно, поэтому де-Марки, сравнив итоги с теорией, рекомендует соблюдать следующие правила.

1. Во время измерения больших глубин следует через равные промежутки, например, через каждые 200 м, записывать углы α_0 .

2. При постепенном увеличении угла α_0 от начала измерения до момента падения груза на дно применяется формула поправки для всей длины лотлиня (опыт 4-й).

3. Подобным же образом поступают, если угол α_0 после постепенного увеличения постепенно уменьшается до конца измерения (опыт 2-й) и вообще если угол так или иначе меняется, но в последний период уменьшается (опыт 5-й).

4. Если в конце измерения угол α_0 резко увеличивается, хотя в остальное время он почти не менялся, то поправку следует вводить только в последний отрезок лотлиня (опыт 1-й).

5. Необходимо применять чувствительный динамометр, позволяющий с достаточной точностью измерять в каждый данный момент натяжения лотлиня. Значительные колебания натяжения, при постоянстве скорости разматывания лотлиня u и скорости дрейфования v_0 , будут свидетельствовать о том, что груз и лотлинь пересекают слои, в которых действует течение, оказывающее на них заметное влияние; в таких случаях никакие методы вычисления поправки не будут действительными.

III. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

§ 9

Цель этой статьи заключалась не в том, чтобы отыскать абсолютную истину, т. е. определить истинную форму лотлиня. Строго говоря, вопрос о форме лотлиня имеет первостепенное, но не решающее значение; другими словами, если форма лотлиня известна, то задача считается решенной в полной мере, т. е. поправка в этом случае вычисляется совершенно точно; но если судить о форме лотлиня можно лишь с некоторым приближением,¹ то это не означает, что по-

¹ На практике именно так и бывает, потому что любой, даже идеальный, метод вычисления позволяет определить истинную форму лотлиня либо для неподвижной водной среды, либо при условии, что вертикальное распределение скоростей течения точно известно, чего в действительности никогда не бывает. То, что в гидрометрии считается возможным и необходимым (составление годографа скоростей на вертикали).

правка не может быть определена с достаточной для практических целей точностью. Мы видели, что абсолютная величина поправки, поскольку она зависит от той или иной формы лотлиния (в пределах от цепной линии до параболы), меняется незначительно. Более того поправку оказывается возможным вычислить в зависимости лишь от двух аргументов (S и α_0), причем этой поправкой можно пользоваться и для лота-рыба и в случае применения любого иного механического лота. Наконец, различного рода ошибки, происходящие либо вследствие невозможности измерить угол α_0 точнее, чем до 1° , либо вследствие неравномерного распределения скоростей течения на вертикали или вследствие технического несовершенства вьюшек и счетчиков, не позволяющего точно фиксировать отсчет в момент падения груза на дно, — все эти причины, вместе взятые, ставят под сомнение необходимость дальнейших исследований, и остается лишь решить вопрос о том, какой из существующих способов вычисления поправки следует признать наиболее точным.

Поскольку гидродинамика базируется главным образом на эмпирических величинах, естественно, что наиболее надежным окажется способ, в котором все переменные величины определены экспериментально. С этой точки зрения ни один из существующих методов не имеет явных преимуществ, так как ни одному из упоминавшихся выше исследователей не удалось экспериментально определить натяжение лотлиния M . Таким образом, поскольку степень точности поправки зависит лишь от метода ее вычисления, наиболее надежным следует признать способ, применяемый в Гидрографическом управлении Главсевморпути, тем более, что полученные при этом результаты весьма близки к экспериментальным данным Джонсона. Именно по этому способу и вычислены таблицы поправок для измеренных глубин l от 1 до 500 м и для углов отклонения α_0 от 1° до 60° .¹

Для большей ясности необходимо остановиться на вопросе о принципиальной разнице между этими таблицами и данными Куртье и де-Марки.

Общая поправка на отклонение лотлиния от вертикали расчленена на „надводную“ поправку ($M \cdot 0$) и „подводную“ поправку (q). Последняя величина, зависящая от высоты z , различна для каждого про-

в море является неприемлемым и неосуществимым. Правда, скорости течения в море обычно уступают скоростям течений на реках, но полного застоя в море не бывает; таким образом, если бы в таблице поправок за наклон лотлиния одним из аргументов являлась форма лотлиния, точно вычисленная для спокойной воды, то окончательный результат все равно был бы неверен.

¹ Таблицы поправок на отклонение лотлиния от вертикали. Изд. Гидрографического управления Главсевморпути. Л. 1937.

мерного судна, чем и вызывается необходимость расчленения поправки,¹ но у других исследователей об этом ничего не упоминается, между тем пренебрежение поправкой $M \cdot 0$ может вызывать существенное искажение малых глубин.

Далее, как уже упоминалось, полученные нами выводы весьма близки к данным де-Марки, но в его таблице дана истинная глубина, представляющая ординату y , так как де-Марки пренебрегает высотой груза (как и величиной t). В наших таблицах дана поправка q , а не ордината y , благодаря чему автоматически учитывается высота груза G , т. е. таблицы (при точном промере малых глубин) становятся универсальными для любых значений G .

Далее, на малых глубинах поправка q не пропорциональна измеренной глубине l , поэтому для удобства обработки промера вычисления доведены до 500 м. Наконец, из практики известно много случаев, когда не удается работать на малом ходу, поэтому вычисления доведены до предельного значения угла $\alpha_0 = 60^\circ$.²

§ 10

Какова бы ни была точность таблиц поправок, необходимо иметь в виду, что работа при больших значениях угла α_0 допускается лишь в спокойных водоемах. При наличии же сильных приливо-отливных течений (порядка 2 узлов и более) работа на малых глубинах при $\alpha_0 > 30^\circ$ может привести к существенному искажению промера.

§ 11

Ни размеры, ни формы груза не оказывают существенного влияния на величину поправки q , следовательно таблицами поправок можно пользоваться при глубоководных гидрологических наблюдениях для определения отсчета l , соответствующего желаемой глубине погружения батометров и вертушек. Пример дан в „Пояснениях к таблицам“.

§ 12

В среде океанографов, гидрографов, навигаторов и других специалистов неоднократно высказывались неодобрительные отзывы о методе работы механическими лотами по счетчику. Вызывают сомнение методы вычисления поправок, надежность приборов для изме-

¹ Иначе выводы и таблицы не были бы универсальными, т. е. пригодными для всех судов.

² Куртье ограничивается вычислениями для α_0 (макс.) $= 30^\circ$, а де-Марки — до α_0 (макс.) $= 45^\circ$.

рения углов α_0 , возможность точно заметить момент падения груза на дно и многое другое. Способ измерения глубин на ходу (лотом-рыба) всегда связан с отклонением лотлиния, а остановки судна для измерения глубин со стопа связаны с большой затратой времени. По всем этим соображениям отдается решительное предпочтение эхо-лоту, и конечно, если эхо-лот хорошо выверен, то по этому вопросу не может существовать двух мнений.¹

С этой точки зрения может возникнуть сомнение в целесообразности всей проделанной здесь работы, основная цель которой заключалась в уточнении способов промера механическими лотами по счетчику. Имеется ли реальная необходимость в этом уточнении, коль скоро механические лоты вытесняются эхо-лотами (и термоглубомерами)?

Но известно, что еще не все эхо-лоты и термоглубомеры заслуживают полного доверия и еще не все суда снабжены этими приборами. С другой стороны, известно, что многие тысячи и десятки тысяч глубин измерены (и будут измерены) лотом-рыба, и поскольку высказывается недоверие к надежности промера лотом-рыба и вызывают сомнение морские карты, составленные по результату промера лотом-рыба, автор и считал необходимым широко осветить этот вопрос, чтобы указать на основные недочеты, существовавшие в методах введения поправки и легко устранимые как в отношении проделанных уже промерных работ, так и при будущих промерах. Попутно были затронуты вопросы о промере со стопа, о промерах больших глубин и глубоководных гидрологических работах.

J. KIREEV

CORRECTION ON THE DECLINATION OF THE SOUNDING LINE FROM THE VERTICAL DURING DEPTH MEASUREMENTS BY SOUNDING MACHINES

Summary

In §§ 1—3 a historical synopsis of the researches on the above-named problem is given.

In § 4 an exact analytical method is expounded, which has been worked out by the author on base of A. Krylov's deductions and put into

¹ Единственным преимуществом способа измерения глубин со стопа по сравнению с промером эхо-лотом является возможность составления детальной карты грунтов. Впрочем, новейшие эхо-лоты замечательно верно фиксируют качество грунтов (твердый, мягкий) и даже мощность иловых отложений. См. Echo sounding with special reference to Marine surveying by Commander P. S. E. Maxwell R. N. Reprinted from the Empire survey review №№ 17, 18, 19 (1935/36).

practice by the Hydrographical Department of the Chief Administration of Northern Sea Route for control calculations.

In §§ 5 and 6 is told of the fundamental defect of the methods of Courtier, Tonta and other authors, who do not take in account the corrections on the declination of the zero place, in consequence of which the corrected depths are somewhat exaggerated.

In § 7 is expounded an approximative analytical method, worked out by the author on base of a Krylov's deduction which is used by the Hydrographical Department of the Chief Administration of the Northern Sea Route for the calculation of the Correction Tables for the declination angles α from 1° to 60° and for a length of the paid away sounding line up to 500 m.

In § 8 the method of De Marchi is expounded in detail.

In §§ 9—12 are given practical remarks which can be summarized as follows:

a) The most perfect method of correction of the depths is the one expounded in § 7, and

b) the Correction Tables are useful also for the definition of the deduction corresponding to the depth up to which it is desirable to sink the bathometers during the deep-water hydrological observations.

Я. К. Смирницкий

РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ СПОСОБ КООРДИНИРОВАНИЯ ПРИ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ РАБОТАХ В МОРЕ

(ПОДВОДНАЯ ЗВУКОМЕТРИЯ)

Часть I

Полярная гидрография стоит в настоящее время перед задачей гидрографического обследования ряда крупнейших морских объектов, расположенных по трассе Северного морского пути. Для характеристики масштаба предстоящих работ достаточно сказать, что с 1937 г. начнутся работы по систематическому обследованию морей Лаптевых, Восточносибирского и Чукотского.

Помимо трудностей, вытекающих из громадного масштаба предстоящих работ, их проведение усугубляется чрезвычайной отдаленностью районов, полярными условиями и непродолжительностью периода кампании. Все это грозит замедлить темпы гидрографического обследования морей восточного сектора Арктики.

Единственным выходом из положения является введение новейших технических средств для производства гидрографических работ и стахановских методов их использования.

Технические методы, применяемые в настоящее время при гидрографических работах, особенно при производстве одной из основных работ — промера, весьма отстали от уровня других отраслей инженерного искусства. Наши главнейшие средства — механические лоты, лот-рыба, механические тралы и визуальные способы координирования — весьма мало эффективны, громоздки, зависят от условий видимости и пр.

Послевоенный период американские гидрографы называют новой эрой в гидрографическом деле: достижения радио, электротехники и акустики начинают проникать в технику гидрографических работ.

Послевоенной новинкой ведущей исследовательской организации Америки — Бюро „Береговой и геодезической съемки США“ (U. S. Coast & Geodetic Survey) — является промер эхо-лотами при радиогидроакустическом способе его координирования. Способ дает быстрое измерение глубин на большом ходу и координацию, не ограниченную дальностью, темнотой и туманом.

Учитывая большую роль, которую может иметь радиоакустический метод координирования при работах на севере, Начальник Гидрографического управления поручил автору детально ознакомиться с этим методом и рассмотреть его с точки зрения возможности и целесообразности применения его в нашей практике.

В процессе выполнения этой работы автором собран и проанализирован материал по теории и практике гидроакустического координирования, опубликованный США и в других странах.

Основным материалом при составлении настоящей работы послужил материал, вошедший в дипломную работу, написанную автором в начале 1935 г., после окончания теоретического курса Гидрографического факультета Военно-морской академии им. тов. Ворошилова.

Несколько расширены и дополнены отделы, посвященные вопросам гидроакустики и анализу точности, даваемой различными методами.

Автор приносит благодарность проф. Н. Н. Матусевичу за постоянное руководство при выполнении этой работы.

§ 1. Постановка темы. Краткий исторический очерк

Постановка темы. Вполне очевидно, что всякая работа, связанная с определением подводного рельефа, включает в себе определение глубины и ее места. Оба эти элемента одинаково важны,

неотделимы и должны отвечать заданной точности, в свою очередь, характеризующей достоинство морской карты.

В настоящее время при координировании места корабля на водной поверхности употребляются следующие способы:

1. В случае видимости берегов (визуальные):

- 1) по углам между тремя и более опорными точками (задача Снеллиуса-Потенота);
- 2) по пеленгам или по пеленгам и углу между двумя и более опорными точками;
- 3) по пеленгу и расстоянию или по двум расстояниям до двух береговых опорных точек;
- 4) по засечкам с двух или трех береговых опорных точек.

2. Координирование вне видимости берега:

- 1) навигационным счислением;
- 2) астрономическими наблюдениями;
- 3) радиопеленгованием;
- 4) триангуляцией на воде с помощью постановки буев или судов с определением их по углам или пеленгам.

Способы эти общеизвестны и не требуют пояснения; однако необходимо все же отметить следующие характерные их особенности:

1. Все визуальные способы зависят от условий видимости опорных точек, неприменимы в туман и вне дальности видимости знаков. Таким образом, решая достаточно гибко и точно задачу координирования в прибрежной 10—15-мильной полосе при условии хорошей видимости, эти способы беспомощны в случае тумана и имеют ограниченный район применения.

2. Способы координирования вне видимости берегов несовершенны и неточны. Данные счисления зависят от поправки компаса, от течения, от погрешностей в показаниях лага и, кроме того, все же требуют довольно частых проверок визуальными методами.

Астрономический способ дает место не точно ($\pm 1 - 2$ мили); он зависит от видимости и облачности.

Радиопеленгование до сих пор не дает достаточной для гидрографических работ точности.

Вывод. Употребляемые способы координирования имеют много крупных недостатков, из которых главным является зависимость от видимости опорных точек для визуальных методов и недостаточная

точность для способов координирования вне видимости берега. Всекие способы, дающие возможность применения точного координирования, не зависящие от условий видимости и тумана, должны быть использованы при гидрографических работах.

Краткий исторический очерк

Мысль о возможности применить гидроакустику для целей координирования в море не нова и имеет по крайней мере двадцатилетнюю давность. Работы в этом направлении идут параллельно с работами по введению метода измерения глубин эхолотом, этого действительно революционизирующего гидрографические исследования метода, имеющего блестящую будущность.¹

Так, в 1911 г. судно США „Вашингтон“ вело опытные работы по определению своего места в районе Нантукстского маяка радиоакустическим способом. С маяка одновременно посылались радио и звуковой подводный сигнал. На судне отмечались моменты послышки звука (радиосигнала) и его приема. Измеренный промежуток времени, умноженный на скорость звука в воде (v), давал одну дальномерную засечку.

Мировая война, поднявшая значение акустики для военных целей, послужила сильным толчком для разработки проблем применения гидроакустики для целей навигации и гидрографии.

В 1917—1918 гг. Joly (Англия) проводит опыты по координированию судна в море и дает описание метода и форм его применения в навигации. При этих опытах судно, желавшее получить свое место, одновременно подавало радио „тире“ и взрывало бомбочку за бортом. Береговые станции записывали с помощью соответствующей аппаратуры прибытие радиосигнала, а также моменты поступления звука взрыва до 2, 3, удобно расположенных для определения, гидрофонов, положение которых было известно. Получив моменты $t_1, t_2, t_3 \dots$ времени прохода звуковой волной расстояния от места взрыва до соответствующих гидрофонов, легко было определить место судна (взрыва) по 2—3 расстояниям — $s_1 = vt_1; s_2 = vt_2 \dots$ (v — скорость звука в воде).

К 1918—1919 гг. у англичан уже существуют 2 группы гидроакустических станций близ Дувра и Лоуэстфорта, которыми успешно пользуются суда для определения места.

¹ См. К. С. Ухов, Звуковое измерение глубин. Изд. ГУ УМС, 1929 г., и ежегодно растущую литературу по этому вопросу.

В то же время англичане доказывают применимость радиогидроакустики для определения границ минных полей, мест взрывов мин и торпед и пр. (по методу „Разности времен“ — см. дальше).

Первая Международная гидрографическая конференция в Лондоне (1919 г.) признает большое значение развития радиогидроакустики для целей навигации и гидрографии.

В 1921—22 гг. Wood & Brown снова проводят опыты в Дуврском проливе по определению места миноносца гидроакустическим способом. Несмотря на бурную и туманную погоду, они доказывают удобство получения места судна этим способом; в пределах 40 миль от берега миноносец получал свое место не позже, чем через 10 минут после затребования (взрыва бомбочки).

В это же время скорость звука в воде при различных условиях и характер распространения взрывной звуковой волны также становятся предметом изучения.

Однако все эти, опытного характера, работы не могут идти в сравнение с успехами американцев.

Благодаря работам первоклассной исследовательской геодезической и гидрографической организации Бюро „Береговой и геодезической съемки США“ (U. S. Coast & G. Survey) в сотрудничестве с Бюро стандартов и сигнальной корпорацией за истекший с 1923 г. период, радиогидроакустика вышла из стадии опытных исследований и превратилась в один из основных методов координирования при гидрографических работах.

В 1923 г. Бюро проводит на г/с „Guide“ первые экспериментальные работы у берегов Н. Англии. В 1924 г. трудами сотрудников Бюро съемки — N. H. Neak, H. F. Comb, R. Luce и сотрудников Бюро стандартов — Dr. E. Ekhardt и M. Reizer создается первая эксплуатационная аппаратура и методы (см. дальше „американский“ метод) работ по радиогидроакустическому способу координирования. Издается руководство по работам Special Publication № 107. Начиная с этого времени, американские гидрографы, улучшая все время аппаратуру и методы (см. Sp. Publication № 146, 1928 г.), провели большое количество промерных работ по Тихоокеанскому и Атлантическому побережьям, измеряя глубины эхолотом и координируя их радиогидроакустическим способом.

Наконец, работы американцев на банке Георга (Georges Bank) доказали применимость радиогидроакустики для развития триангуляции на воде.

Но здесь же необходимо отметить и тот факт, что радиоакустический способ координирования при гидрографических работах широко применяется только в Америке. В остальных странах,

судя по литературе, этого нет. Вполне возможно, что результаты опытов по координированию судов радиоакустическим способом еще не опубликованы.

Малое развитие радиоакустического способа в этих последних странах объясняется, мне кажется, не столько значительной стоимостью установок, сколько косностью во взглядах на задачи военной и общей гидрографии.

Крупный гидрограф, поборник нового метода и автор ряда теоретических работ по гидроакустике — Л. Топта, констатируя (1931 г.) незаслуженно малый интерес к вопросам радиогидроакустики со стороны всех стран, кроме Америки, предлагает заинтересовать этим делом военные и военноморские учреждения, „напомнив им, что фонотелеметрия имеет большие достижения и находила себе наиболее интересное применение во время мировой войны“.

§ 2. Общий принцип и методы „радиоакустического способа координирования“¹

Общий принцип. В основе всех РАСК лежит задача достаточно точного измерения промежутков времени $t_a, t_b, t_c \dots$ необходимых для прохождения в воде звука взрыва от определяемой точки водной поверхности (места взрыва) до нескольких береговых хорошо координированных гидрофонов $A, B, C \dots$

Обычно определение этих промежутков времени выполняется по отметкам на ленте хронографа или гальванометра — момента взрыва и моментов поступления звукового импульса к гидрофонам.

Имея эти промежутки времени t_a, t_b, \dots мы можем определить по нижеописываемым способам место взрыва бомбочки как со знанием точного значения v — скорости звука в воде, так и с приближенным ее значением.

Американский метод (метод 2 станций). В основе этого метода РАСК стоит задача получения 2 расстояний D_a и D_b от места судна до 2 береговых гидрофонов A и B , места которых известны. Определив эти расстояния, место судна легко получить в точке пересечения дуг окружностей, проведенных из A и B радиусами, равными D_a и D_b .

Процесс выполнения работы схематически приведен на рис. 1, где P — место судна, A и B — места гидрофонов, соединенных кабелями с 2 береговыми станциями.

¹ В дальнейшем изложении сокращенно РАСК.

Судно, желая определить свое место, взрывает за бортом бомбочку. Звуковой импульс взрыва, во-первых, дает начальную отметку t на ленте судового хронографа и, во-вторых, дойдя до береговых гидрофонов A и B , усиливается и через радиопередатчик дает радиосигналы на судно о моментах достижения гидрофонов. Эти радиосигналы через судовую аппаратуру отмечаются на той же ленте хронографа, давая отметки t_1 и t_2 — поступления звукового импульса к гидрофонам A и B .

Очевидно, что

$$D_a = (t_1 - t) v; \quad (1)$$

$$D_b = (t_2 - t) v,$$

где v — скорость звука в воде.

Таков общий принцип получения искомых расстояний D_a и D_b . Передача радиоимпульсов принимается мгновенной. Для удобства проложения мест на прокладном планшете заранее проводятся круги равных расстояний от 2 гидрофонов; таким образом, нахождение места сводится к интерполированию между кругами.

Когда A и B не помещаются на планшете, построение кругов делается по точкам.

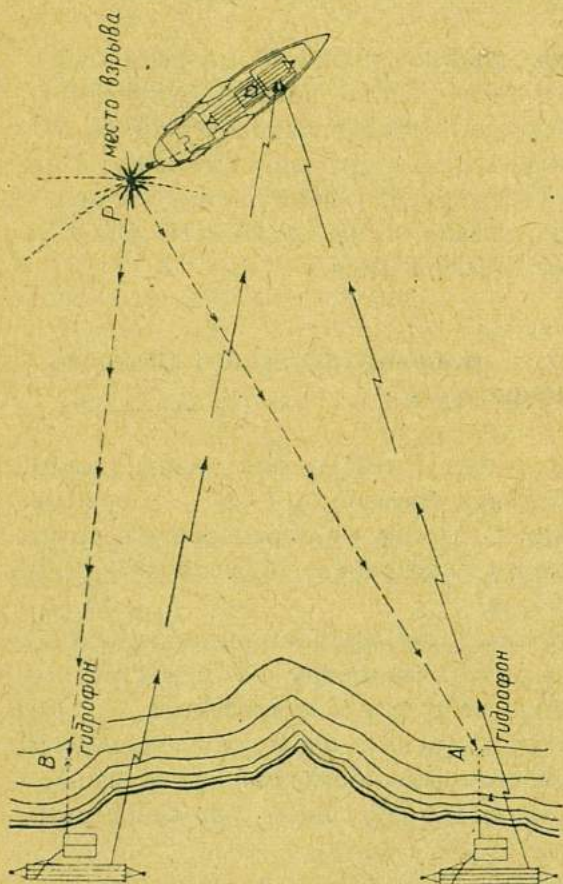


Рис. 1.

В числе причин, влияющих на точность получения места, основной является знание точного значения v для условий района работ. Получение такого значения v — задача нелегкая, но, однако, выполнимая. Дальнейшее изложение покажет все причины, усложняющие и ухудшающие точность метода. Сейчас укажем только, что американцам все же удалось сделать этот простой метод определения достаточно точным и исключительно пользоваться им в своих многочисленных работах.

Метод Тонга (метод отношения времен). Кроме предыдущего способа определения места на водной поверхности, требующего знания скорости звука v , имеются способы, в которых знание скорости v не требуется. К таким методам относится и метод, предложенный Тонга.

Действительно, принимая, что v остается постоянной для направлений D_a и D_b , можно написать

$$\begin{aligned} D_a &= v \cdot t_a, \\ D_b &= v \cdot t_b; \end{aligned} \quad \text{откуда} \quad \frac{D_a}{D_b} = \frac{t_a}{t_b} = K.$$

Но геометрическое место точек, с определенным и не равным единице отношением $\frac{D_a}{D_b}$ — расстояний до 2 известных точек, есть круг (рис. 2).

Центр этого круга находится в точке O , лежащей на продолжении стороны AB ближе к малой стороне PB (доказательство см. дальше).

Согласно основному, уже упомянутому, геометрическому условию для каждого круга можем написать:

для любой точки P круга $\frac{AP}{BP} = K$,

когда точка P совпадает с M , $\frac{AM}{MB} = K$,

когда точка P совпадает с N , $\frac{AN}{BN} = K$,

где K — какое-либо постоянное число $\neq 1$.

Из написанных отношений можно составить определяющее отношение отрезков

$$\frac{AP}{BP} = \frac{AM}{BM} = \frac{AN}{BN} = \frac{D_a}{D_b} = K.$$

Но если $\frac{AP}{BP} = \frac{AM}{BM}$, то хорда PM является биссектрисой внутреннего угла APB и делит этот угол пополам. Сторона PN перпендикулярна хорде (и биссектрисе) PM и делит внешний угол $\triangle APB$ пополам. Угол MPN , как опирающийся на диаметр, равен 90° .

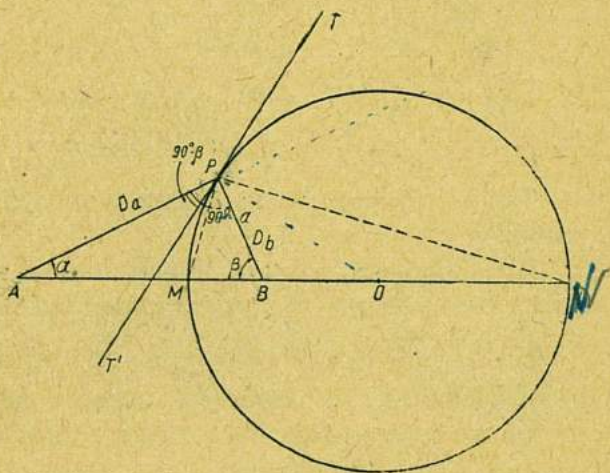


Рис. 2.

$\triangle APB$ называется позиционным. Касательная к кругу в точке P составляет с меньшей стороной угол $= 90^\circ - \alpha$ и с большей стороной $\angle 90^\circ - \beta$.

Действительно,

$$\angle APB = 180^\circ - (\alpha + \beta) \text{ и } \angle BPN = \frac{\alpha - \beta}{2}.$$

Из $\triangle APN$ найдем $\angle MNP = \frac{\beta - \alpha}{2}$,

$$\angle MOP = 2 \angle MNP = \beta - \alpha,$$

$$\angle BPO = \beta - (\beta - \alpha) = \alpha,$$

и, наконец, $\angle BPT' = 90^\circ - \alpha$, а также

$$\angle APT' = \angle APB - \angle BPT' = 90^\circ - \beta.$$

Таким образом, точка P есть определяемое место при точном значении v .

Предположим, что мы имеем только приближенное значение скорости v' , тогда приближенные значения расстояний будут D_a' и D_b' и, очевидно, $\frac{D_a}{D_b} = \frac{D_a'}{D_b'} = \frac{t_a}{t_b}$ (при постоянстве v' по обоим направлениям), т. е. точка P' — искомое место, вычисленное с v' , лежит на той же окружности близ точки P , вычисленной с v , так как отвечает тому же отношению $\frac{t_a}{t_b}$. Поскольку PP' мала, проводим касательную в точке P' под углами $90^\circ - \alpha$ и $90^\circ - \beta$ к сторонам позиционного треугольника и считаем ее совпадающей с малой дугой круга близ точки P' . Касательную к окружности в точке P' можно считать радиоакустической линией положения для отношения $\frac{t_a}{t_b}$.

Радиоакустическую линию положения мы проведем, определив координаты точки P' в результате решения $\triangle AP'B$ по трем сторонам AB , D_a' и D_b' .

Вполне очевидно, что одно отношение $\frac{t_a}{t_b}$ задачу не решает, так как дает только одну линию положения.

Предположим, что мы, имея три береговые станции (гидрофона), определили t_a , t_b и t_c и по ним, принимая приближенную скорость звука v' , вычислили:

$$D_a' = t_a \cdot v',$$

$$D_b' = t_b \cdot v',$$

$$D_c' = t_c \cdot v'.$$

Он получается благодаря приближенной оценке принятого значения v' и вследствие ошибок вычисления. Из рис. 3 очевидно, что стороны этого определяющего треугольника, по сути, являются хордами дуг равных расстояний, проведенных радиусами D_a' , D_b' и D_c' из соответствующих точек A , B и C , как из центров. Вершины определяющего треугольника являются точками пересечения этих дуг. Важно отметить, что, получив точки P_{ab}' , P_{ac}' и P_{bc}' решением трех позиционных треугольников, мы, тем самым, получили только по одной определяющей точке на трех радиоакустических линиях положения, отвечающих, соответственно, отношениям $\frac{t_a}{t_b}$, $\frac{t_b}{t_c}$, $\frac{t_a}{t_c}$.

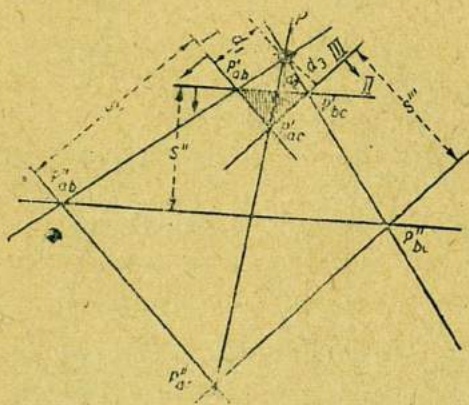


Рис. 4.

Нанесем определяющий треугольник по координатам на график крупного масштаба (рис. 4) и дадим сторонам его I, II и III параллельные смещения s' , s'' и s''' , пропорциональные расстояниям D_a' , D_b' и D_c' , т. е.

$$\begin{aligned} s' &= K \cdot D_a', \\ s'' &= K \cdot D_b', \\ s''' &= K \cdot D_c', \end{aligned}$$

где K — коэффициент пропорциональности, выбранный произвольно.

Тогда очевидно, что вершины P_{ab}'' , P_{bc}'' и P_{ac}'' нового, подобного первому, треугольника представят собою вторые точки на соответственных радиоакустических линиях положения, так как пропорциональное изменение D_a' , D_b' и D_c' повело лишь к передвижению определяющих точек по этим линиям (см. рис. 3).¹

Соединяя прямыми соответственные вершины двух треугольников и продолжая их до пересечения, получим искомую точку P (рис. 3 и 4), как лежащую на всех трех линиях положения. Таково решение задачи по методу Тонта.

В данном случае d_1 , d_2 , d_3 определяют разности между истинными расстояниями от точки P до соответствующих точек A , B и C и полученными нами благодаря приближенно-принятой величине v' , т. е.

$$\begin{aligned} d_1 &= (v - v') t_a, \\ d_2 &= (v - v') t_b, \\ d_3 &= (v - v') t_c, \end{aligned}$$

¹ На рис. 3 приращения s' , s'' и s''' для ясности чертежа отложены от соответствующих точек A , B и C и показаны заведомо преувеличенными.

откуда можно определить поправку к принятой величине скорости

$$v - v' = \frac{d_1}{t_a} = \frac{d_2}{t_b} = \frac{d_3}{t_c} \quad (2)$$

При практическом решении задачи по методу Тонта могут быть указаны следующие способы.

а) Аналитический способ, т. е. тот, который только что был разобран в теории метода. Способ довольно кропотлив, так как заставляет решать три позиционных треугольника, давать перемещения сторонам полученного определяющего треугольника и только тогда получить искомую точку. Во всяком случае работа по определению места, с применением арифмометра, потребует $1-1\frac{1}{2}$ часа.

Данный способ хорошо употреблять при точном определении опорных точек на воде, например буев, вех, плавающих маяков и пр., когда он все же гораздо быстрее и точнее других, не визуальных методов определения.

б) Графический способ. В этом случае точки определяющего треугольника наносим на планшет по пересечению дуг равных расстояний D_a' , D_b' и D_c' , причем будет удобнее, если на планшете заранее будут нанесены 3 системы кругов равных расстояний с центрами в точках A , B и C . Интервал между кругами определяется необходимой точностью интерполирования. Получив вершины P_{ab}' , P_{bc}' , P_{ac}' , искомое место найдем уже известным из аналитического способа путем. Очевидно, что способ, употребляемый американцами, является частным случаем этого способа, при котором значение v считается точным и определяется по 2 кругам равных расстояний. Метод Тонта американцы не употребляют, вероятно, ради экономии труда, времени и денежных средств (установка 3-го гидрофона).

Снимая с чертежа величины d_1 , d_2 и d_3 , мы можем исправлять принятое значение v' по формулам (2).

В большинстве случаев радиоакустическим методом придется пользоваться на прокладных досках, построенных в масштабе 1:50 000 и более мелких, при которых точки A , B и C окажутся на прокладной доске, и дуги можно будет провести непосредственно штангенциркулем.

Изменение кругов равных отношений с изменением K

Аналитически геометрическое место точек, удовлетворяющих условию $\frac{t_a}{t_b} = K = \text{const} \neq 1$, определяется следующим образом.

Взяв за начало координат середину акустической базы $O(0, 0)$, ось X -ов по линии акустической базы, ось Y -ов по линии перпендикуляра, восстановленного из середины AB (в артиллерии называется „директриссой“ базы), можем написать для какой-либо точки $P(x, y)$ круга (рис. 4а)

$$PA^2 = (x + a)^2 + y^2; PB^2 = (a - x)^2 + y^2,$$

но по условию

$$\frac{PA}{PB} = K = \text{const.}$$

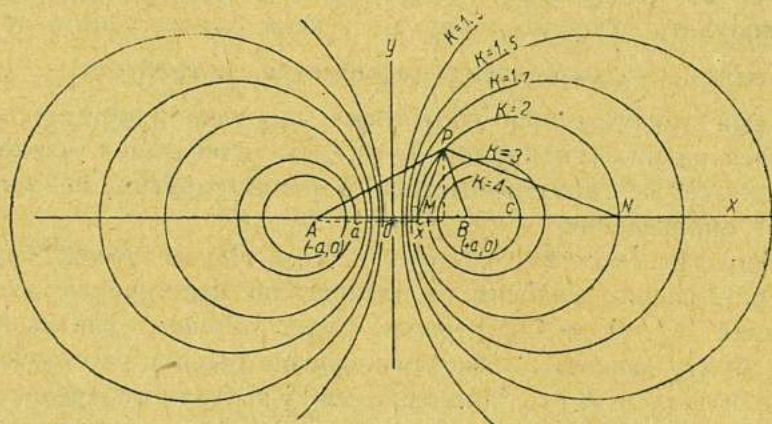


Рис. 4а.

Поэтому

$$\begin{aligned} (x + a)^2 + y^2 &= K^2[(a - x)^2 + y^2] \\ x^2[1 - K^2] + 2ax[1 + K^2] + y^2[1 - K^2] + a^2[1 - K^2] &= 0. \end{aligned}$$

Откуда

$$x^2 + y^2 - 2ax \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + a^2 = 0. \quad (3)$$

Выражение (3) показывает, что действительно геометрическое место точек, удовлетворяющих постоянству K , есть круг с центром на продолжении стороны AB .

Перепишав уравнение (3) в обычном виде:

$$\left(x - a \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1}\right)^2 + y^2 = a^2 \left[\left(\frac{K^2 + 1}{K^2 - 1}\right)^2 - 1\right], \quad (4)$$

легко найти, что центр окружности C определяется абсциссой

$$a \cdot \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1},$$

радиус окружности $r = a \sqrt{\left(\frac{K^2 + 1}{K^2 - 1}\right)^2 - 1} = \frac{2Ka}{K^2 - 1}$, и точки, в которых

круг пересекает ось X -ов, будут иметь абсциссы

$$OM = a \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} - \frac{2Ka}{K^2 - 1} = a \frac{K - 1}{K + 1},$$

$$ON = a \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \frac{2Ka}{K^2 - 1} = a \frac{K + 1}{K - 1}.$$

При $K=1$ — радиус круга $r=\infty$, круг сливается с директриссой базы. Линия положения сливается с биссектрисой угла P и пойдет также по директриссе.

При $K \geq 1$. При увеличении и уменьшении K радиусы кругов быстро уменьшаются. Круги смыкаются вокруг конечных точек акустической базы (рис. 4а).

Характер кругов для $K > 1$ и $K < 1$ подобен. Для того чтобы не иметь $K < 1$, можно вместо $\frac{t_a}{t_b}$ брать (в системе кругов по левую сторону директриссы) отношение $\frac{t_b}{t_a}$, как это и сделано на рис. 4а.

Из того же чертежа видно, что строить окружности непосредственно по радиусу r , к сожалению, для всех значений K не всегда возможно, так как радиусы r становятся слишком большими и центры окружностей не вмещаются на прокладных досках.

Действительно, при условии

$$r = \frac{2Ka}{K^2 - 1} \geq 4a, \text{ т. е. } \frac{K}{K^2 - 1} \geq 2.$$

K должно быть $\leq 1,4$ — $1,3$ (или соответственно $\geq 0,6$ — $0,7$ для левой половины системы кругов), т. е., примерно, в пределах K от $0,6$ до $1,4$ круги придется строить по точкам.

На практике, как мы видели, дело сводится к построению линий положения, что проще и не ограничивается определенными значениями K .

Приведение метода Тонта к задаче Потенота

Положим, мы имеем искомое место P и три опорные станции A , B и C , которые с точки P видны под углами δ и γ (рис. 5).

Кроме того, положим, что нами получены t_a , t_b и t_c и соответствующие им расстояния D_a , D_b и D_c .

Отложим от точки A , вправо от линии AB , угол δ и от точки C , влево от линии CB , угол γ . Точку пересечения проведенных линий O соединим с B .

Из чертежа видно, что

$$\angle OAB = \angle \delta; \angle OCB = \angle \gamma,$$

$$\angle CBP = \angle OBH; \angle CBO = \angle PBA,$$

т. е.

$$\triangle CPB \sim \triangle OAB \text{ и } \triangle APB \sim \triangle OCB.$$

откуда

$$\begin{aligned} AO &= \frac{PC}{PB} \cdot AB = \frac{t_c}{t_b} AB \\ CO &= \frac{PA}{PB} \cdot CB = \frac{t_a}{t_b} \cdot CB \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, если мы, имея на прокладной доске точки A , B и C , во-первых, определим AO и CO по формулам (5), во-вторых, определим точку O , то тем самым мы можем определить и углы δ и γ , т. е. привести метод Тонта к задаче Потенота. Точка O может быть определена или решением $\triangle ACO$ по трем сто-

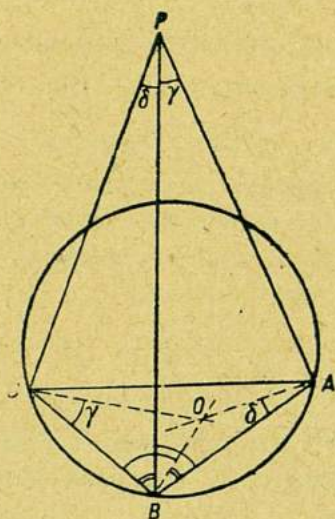


Рис. 5.

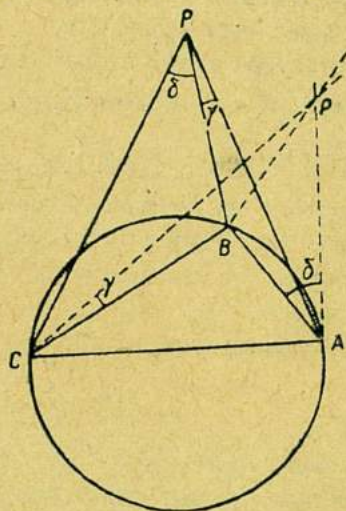


Рис. 6.

ронам, или графически, засечкой с точек A и C радиусами AO и CO . Углы δ и γ могут быть получены как аналитически, через разности

$$\begin{aligned} \delta &= \angle CAB - \angle CAO, \\ \gamma &= \angle ACB - \angle ACO, \end{aligned}$$

так и непосредственно с чертежа посредством протрактора.

Следует заметить, что положение вспомогательной точки O относительно линии, соединяющей крайние станции A и C , меняется в зависимости от расположения точки P относительно точек A , B и C .

Можно отметить 3 случая:

а) если точка P расположена вне окружности, проходящей через данные точек A , B и C , то точка O лежит по одну сторону с центральной точкой B от линии AC (рис. 5 и 6);

б) если точка P расположена внутри той же окружности, то точки O и B лежат по разные стороны от AC (рис. 7);

в) при условии нахождения точки P на окружности имеем случай неопределенного решения (рис. 8).

В итоге рассмотрения способа необходимо сделать следующие выводы:

1) нахождение места путем аналитического решения ΔAOC и, затем, вывода и проложения углов δ и γ требует около 20—30 минут, т. е. хотя и быстрее, чем при методе Тонта, но все же неприменимо при промерных работах;

2) графическое решение задачи может быть сделано быстро (максимум 10 мин.) и достаточно точно, так что представляет определенный интерес для широкого применения. К достоинствам графического решения можно добавить еще возможность легкого совме-

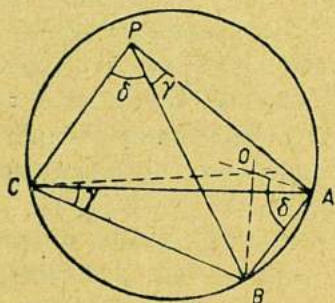


Рис. 7.

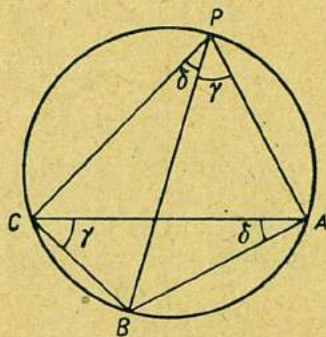


Рис. 8.

щения гидроакустических методов с визуальными, при работе на тех же прокладных досках и гониометрических сетках.

Кроме того, построение и снятие углов δ и γ может быть сделано на отдельной доске в крупном масштабе, чтобы не пачкать основную прокладную доску и получить более точные результаты.

Метод разности времен

Следует отметить, что все изложенные до сих пор способы нахождения места основывались на определении промежутков времени t_a, t_b, \dots прохождения взрывной звуковой волны от места взрыва до соответственных гидрофонов A, B, \dots , для чего требовалась регистрация момента взрыва и момента приема звука. Но предположим, что мы знаем только моменты приема, т. е. с ленты хронографа мы можем снять только величины $\tau_{ab} = t_a - t_b, \tau_{ac} = t_a - t_c, \dots$, причем t_a, t_b, \dots неизвестны по отдельности. Оказывается, и в этом случае мы можем определить положение судна.

Действительно, зная v , мы можем написать

$$\tau_{ab} \cdot v = D_a - D_b,$$

т. е. произведение $\tau_{ab} \cdot v$ дает нам разность расстояний от 2 точек, величину постоянную для данной точки взрыва; иначе говоря, мы можем точку, определяемую $\tau_{ab} \cdot v$, считать одной из точек гиперболы, отвечающей постоянной разности $D_a - D_b$ (рис. 9).

У такой гиперболы A и B — фокусы, O — центр гиперболы, величина $D_a - D_b = 2a$ — длина действительной оси. Знак разности $\tau_{ab} = t_a - t_b$ определяет ветвь гиперболы, на которой находится искомая точка (рис. 9).

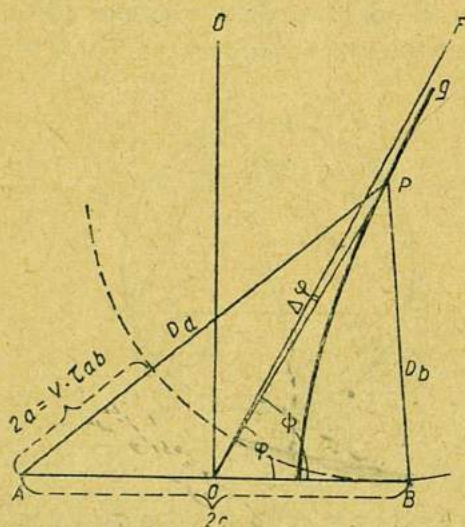


Рис. 9.

Итак, одна разность τ_{ab} дает нам одну гиперболу, если же мы возьмем 2—3 разности времен по 3 гидрофонам, то, получив τ_{ab} , τ_{ac} и τ_{bc} и в пересечении соответствующих гипербол, получим искомую точку P .

Так как получение места P решением уравнений 2—3 гипербол — задача сложная, то применяют косвенные методы решения, менее строгие, но более простые.

а) Место по пересечению асимптот. Предположим, что ветви гиперболы совпадают со своими асимптотами. Определяем место пересечения асимптот и затем вносим поправку за сделанное допущение.

Называя междуфокусное расстояние $AB = 2c$ акустической базой, φ — угол, составляемый асимптотой с линией AB , ψ — угол, составляемый направлением на точку P с базой, получим

$$\cos \varphi = \frac{a}{c} = \frac{\tau \cdot v}{T \cdot v} = \frac{\tau}{T}, \quad (6)$$

где $T = \frac{2c}{v}$ — промежуток времени, необходимый для прохождения звуком расстояния, равного AB , или так называемая „база во времени“.

При 3 гидрофонах, имея τ_{ab} и τ_{bc} , получаем φ_1 и φ_2 и, проводя асимптоты в пересечении, получаем приближенное место.

Для получения точного места P необходимо асимптотными поправками $\Delta\varphi_1 = \varphi_1 - \psi_1$ и $\Delta\varphi_2 = \varphi_2 - \psi_2$ перенести точку на пересечение гипербол. Поправка вычисляется по формуле

$$\operatorname{tg} \Delta\varphi = \operatorname{tg} (\varphi - \psi) = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{1}{4n^2}}}{\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi \sqrt{1 - \frac{1}{4n^2}}} \quad (7)$$

где

$$n = \frac{OP}{AB} = \frac{R}{q}.$$

Величина $\Delta\varphi$, завися от n и φ , может быть заранее вычислена для возможных значений n и φ и табулирована. Приближенная величина OP необходимая для вычисления поправки, имеется заранее или определяется из пересечения асимптот.

Получив, после введения поправок в углы, уже более точное место P , можно снять новое значение OP и определить поправки к углам для второго приближения.

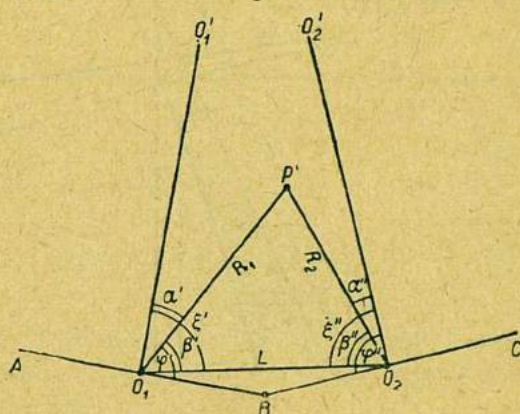


Рис. 9а.

Определение места по методу пересечения асимптот можно сделать еще способом, применяемым в артиллерии (рис. 9а).

Нанеся положение опорных гидрофонов, определяем:

L — „построительную базу“, равную расстоянию между центрами акустических баз;

ξ', ξ'' — углы между „построительной базой“ и линиями $O_1O_1^1$ и $O_2O_2^1$ — директриссами баз.

Принимая во внимание, что

$$\sin \alpha' = \cos \varphi \text{ и } \sin \alpha'' = \cos \varphi', \\ \beta' = \xi' - \alpha' \text{ и } \beta'' = \xi'' - \alpha'',$$

выводим

$$R_1 = L \frac{\sin \beta''}{\sin (\beta' + \beta'')}; \quad R_2 = L \frac{\sin \beta'}{\sin (\beta' + \beta'')} \quad (8)$$

Таким образом, определение места свелось к определению 2 расстояний от центров акустических баз до искомого места.

Для контроля будет, конечно, лучше брать не только τ_{ab} и τ_{be} но и τ_{ac} . Место P' будет в этом случае определено по R_1 , R_2 и R_3 .

Отметим теперь некоторые особенности получения места по пересечению асимптот.

При $n < 1/2$ и $R < 1/2 q$ под знаком радикала (формула 7) в числителе и знаменателе получаются величины отрицательные. Абсциссы точек асимптоты, удаленных от центра гиперболы менее, чем на $q/2$, меньше абсциссы ее вершины. Таким образом, при $n < 1/2$ асимптоты не дают

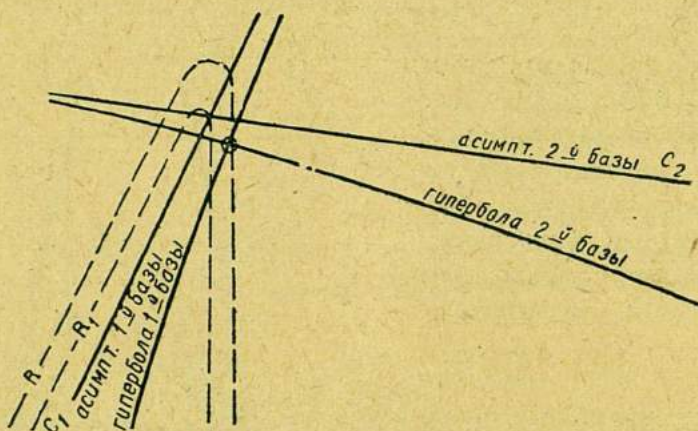


Рис. 96.

решения задачи, и место необходимо искать по пересечению самих гипербол.

$$\text{При } n = 1/2; \quad \operatorname{tg} \Delta\varphi = \operatorname{tg} \varphi; \quad \Delta\varphi = \varphi,$$

т. е. искомая точка лежит в вершине гиперболы, место необходимо искать по пересечению гипербол.

В дальнейшем величина n может принимать различные значения в зависимости от изменения координат точек гиперболы и φ . При данных X и Y величина $n = \frac{R}{q}$ будет иметь максимальное значение при $\varphi = 45^\circ$, уменьшаясь при увеличении и уменьшении φ . Интересующая нас величина n лежит в пределах от $1/2$ до 5 и при φ от 0° до 90° .

В этих пределах величина поправки характеризуется таблицей 1.

Из таблицы видно, что для обеспечения верности направления с точностью $1' - 2'$ нам будет необходимо всегда вводить поправки приведения асимптот.

Кроме того, поскольку при n от 1 до 2—3 с изменением n $\Delta\varphi$ меняется весьма быстро, то приближенная величина ее $\frac{R_1}{q}$ (рис. 96), отличаясь от истинной $\frac{R}{q}$, не обеспечит достаточной точности аргумента для отыскания точного значения $\Delta\varphi$. Придется брать второе приближение.

Все это, конечно, значительно усложняет применение метода разности времен по пересечению асимптот.

Таблица 1

Таблица величин $\Delta\varphi$

$\varphi \backslash n$	3°	6°	12°	18°	24°	30°	36°	42°	45°
1	0°28'	0°55'	1°47'	2°34'	3°13'	3°41'	4°00'	4°07'	4°07'
2	0 06	0 12	0 23	0 34	0 42	0 48	0 54	0 55	0 55
3	0 02 ₅	0 05	0 10	0 15	0 18	0 21	0 23	0 24	0 24
4		0 03	0 05 ₅	0 08	0 10	0 12	0 13	0 13 ₅	0 14
5		0 02	0 03 ₃	0 05	0 06 ₅	0 07 ₅	0 08	0 08 ₅	0 09

б) Место в пересечении линий положения. Прежде всего введем понятие о радиоакустической линии положения при методе „разности времен“.

Положим (рис. 9), мы имеем приближенное значение одной из сторон, например D_a^1 и величину τ_{ab} ; тогда приближенное место P^1 может быть определено решением ΔAPB по трем сторонам:

$$D_a'; D_b' = D_a' + \tau_{ab} \cdot v \text{ и } AB = 2c$$

или засечено двумя дугами равных расстояний из точек A и B радиусами, соответственно равными D_a' и D_b' . Полученная точка P' лежит на гиперболе, вблизи точного места P , и поэтому можно допустить, что касательная к гиперболе в точке P' совпадает с самой гиперболой вблизи точки P и может быть принята за радиоакустическую линию положения—фоногиперболу.

Но касательная к гиперболе в какой-либо точке является биссектрисой угла, составленного радиусами-векторами. Следовательно, радиоакустическая линия положения в точке P' гипербола есть биссектриса угла $AP'B$.

Таким образом, одно значение τ дает нам радиоакустическую линию положения. Очевидно, что, имея 3 гидрофона, мы можем снять с ленты хронографа величины

$$\tau_{ab} = t_a - t_b; \tau_{ac} = t_a - t_c$$

и, принимая приближенное значение одной из сторон, например D_a' , определить другие стороны

$$D_b' = D_a' + \tau_{ab} \cdot v; D_c' = D_a' + \tau_{ac} \cdot v.$$

Решая 3 треугольника по трем сторонам, мы находим 3 определяющие точки P_{ab}' , P_{bc}' и P_{ac}' , лежащие на 3 соответствующих гиперболах (рис. 10 и 11). Но линии положения лежат по биссектрисам углов, составляемых соответственными радиусами-векторами.

Поэтому, отложив от точек P_{ab}' ,

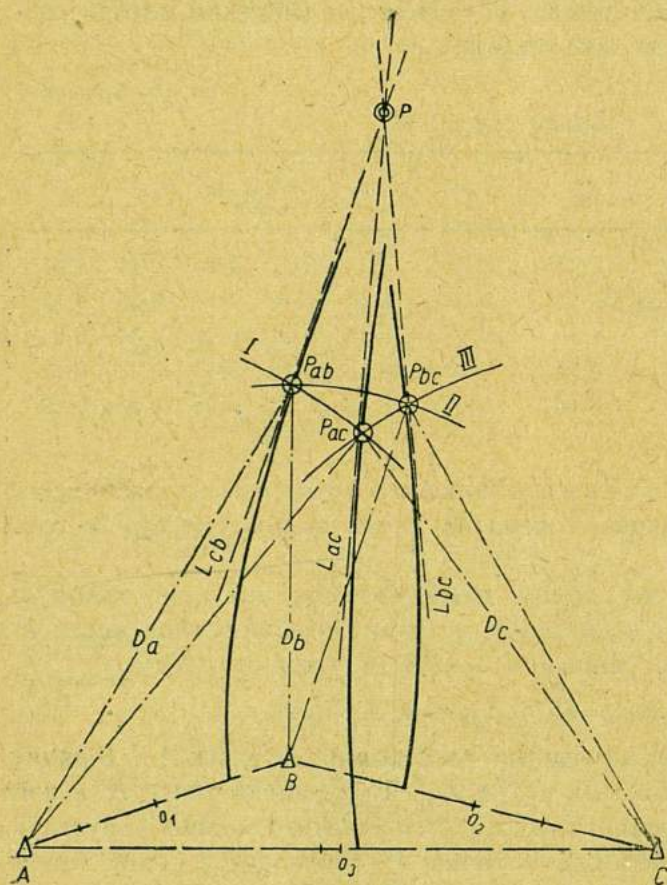


Рис. 10.

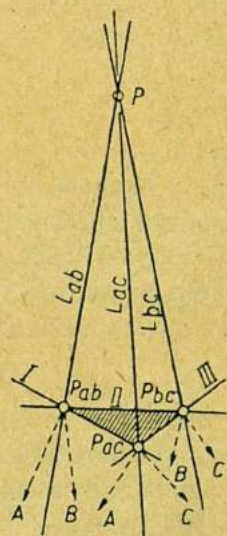


Рис. 11.

P_{bc}' и P_{ac}' стрелки по направлению точек A, B и C, перпендикулярно пересекающимся в этих точках сторонам, делим биссектрисами L_{ab} , L_{ac} и L_{cb} углы, составленные этими стрелками, и в пересечении биссектрис получаем искомую точку P.

Рис. 10 наглядно иллюстрирует весь процесс определения с геометрической стороны.

Так как нахождение аналитически определяющих точек требует довольно длительных вычислений, то можно, как и при методе

Тонта, определить их как точки пересечения дуг равных расстояний с центрами в A , B и C , а затем находить точку P вышеописанным способом (на рис. 10—I, II и III).

Необходимо в заключение отметить, что метод разности времен, будучи по сложности примерно равнозначным методу Тонта, может иногда представлять существенные преимущества, а именно при невозможности иметь момент отправки звука взрыва и регистрации только разности времен прихода до гидрофонов. На характерных свойствах этого метода мы еще вкратце остановимся в §§ 4 и 5.

Метод Ричмонда. Рис. 4а показывает, что круги отношения времен в методе Тонта составляют систему одноосных, непересекающихся кругов с директрисой базы, соответствующей отношению $K=1$.

Выбор кругов (линий положения) для хорошего пересечения часто может быть затруднен как расположением станций, так и их вычерчиванием при большой величине R .

Ричмонд предложил систему кругов отношений времен для каких-либо станций A и B дополнять системой кругов, вмещающих определенные углы на базе AB .

Поскольку эти две системы имеют взаимно перпендикулярные оси, круги систем пересекаются всегда под прямым углом и дают хорошее определение места.

Для применения метода необходимо, кроме определения t_a и t_b , еще знать, хотя бы по радиопеленгованию, α — угол, под которым из определяемого места P „усматривается“ база AB .

На рис. 12 представлена диаграмма Ричмонда для кругов отношений времен с $K = \frac{t_a}{t_b}$ от 2 до 10 — вправо от директрисы ($K=1$)

и с $K = \frac{t_b}{t_a}$ от 2 до 10 — влево от этой же линии с целью иметь K всегда больше 1; вторая система представляет систему кругов, вмещающих $\angle \alpha$, под которым „усматривается“ акустическая база AB .

Так, например, при $\alpha=70^\circ$ и $K=2$ место судна будет в точке P .

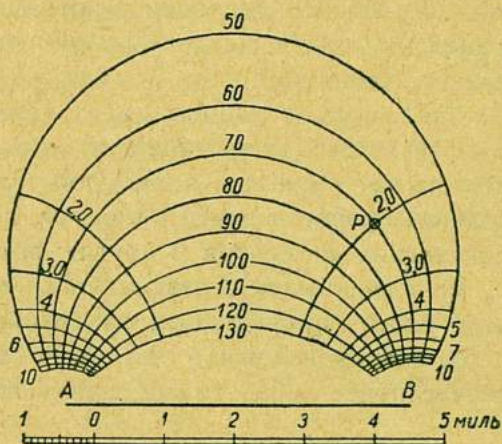


Рис. 12.

§ 3. Условия распространения взрывных звуковых волн в воде

Из изложенного в §§ 1 и 2 вполне ясно, что вопросы гидроакустики играют решающую роль в РАСК. Скорость звука в воде v входит, конечно, во все методы, и от точного знания ее зависит, в основном, точность всех способов РАСК. Развитие гидроакустики для целей подводной сигнализации, промера эхо-лотами и координирования послужило поводом к ряду исследовательских работ о путях распространения подводных звуковых волн, скорости их распространения и пр., проведенных европейскими и американскими учеными. Много вопросов разрешено, но все же проблемы передачи взрывных волн в горизонтальном направлении имеют много неясного и неопределенного.

Данная часть работы имеет целью лишь:

- 1) изложить теоретические и практические методы, существующие в настоящее время в подводной звукометрии для наилучшего определения скорости звука в воде v , разобрать зависимость v от гидрологических элементов и других факторов, влияющих на нее;
- 2) познакомить с результатами наиболее важных экспериментальных работ, проведенных за границей, связанных с определением v ;
- 3) кратко изложить ряд задач из области гидроакустики, стоящих сейчас перед работниками, применяющими РАСК.

Физический процесс распространения звука

Процесс распространения звука под водой, как известно, состоит в том, что колеблющийся излучатель — источник звуковых волн, входя в соприкосновение с водой, как упругой средой, вызывает в ней периодические явления расширения и сжатия. Эти периодические колебания передаются от точки к точке в форме волнового процесса, подвергая всю окружающую среду колебательному процессу. Частота колебаний определяет звуковой или ультразвуковой характер колебаний. Звуковой диапазон лежит в пределах от 16 до 20 000 пер/сек., для слушания наилучшая частота определяется, примерно, в 2500 пер/сек.

Помещая в колеблющуюся среду приемник звука (гидрофон и пр.), мы тем самым помещаем его под воздействие кинетической энергии дошедших до приемника колебаний. Мембрана, выведенная из состояния покоя, подвергается вынужденным колебаниям.

В зависимости от характера излучающей системы в упругой среде могут создаваться волны плоские, шаровые и цилиндрические.

При радиоакустическом методе, когда источником колебания является взорванная бомба, мы имеем особый вид волны — взрывную

звуковую волну. Она характеризуется тем, что в месте взрыва образуется большая разность давлений, создающая сгущенный слой в воде, колебания которого передаются через окружающую среду со скоростью звука. По характеру волнового фронта взрывная звуковая волна вблизи источника звука (место взрыва) имеет характер шаровой волны, а по удалении, благодаря воздействию поверхности и дна, приближается к цилиндрической.

Нужно указать, что форма волнового фронта не влияет на v , но видоизменяет характер прохождения звука в воде.

В настоящей работе нет надобности приводить сложные выводы, даваемые теорией акустики для различных типов волн в упругой среде, и характер их прохождения. Мы остановимся только на кратком разборе результатов работ в этой области и дадим вывод формулы скорости звука в воде для плоской волны при продольных колебаниях, присущих распространению звука в воде. Вывод преследует единственную цель — дать ясное представление о всех величинах, входящих в окончательное выражение для v , с которыми придется оперировать гидрографу.

Скорость звука в морской воде

Мы уже упомянули, что передача колебаний в морской воде происходит в форме волнового процесса, при котором среда, как совокупность связанных материальных точек, совершает одинаковые колебания, но с непрерывно изменяющейся вдоль волны фазой. Скорость распространения колебаний зависит от скорости распространения фазы этих колебаний.

Если мы представим, что в системе частиц, расположенных вдоль оси OX , точка $X=0$ выведена из положения равновесия и колеблется в форме $\xi = a \sin \omega t$, где ξ — весьма малое смещение частицы при колебании, то колебания в точку с координатой $X=x$ придут с запозданием, равным

$$\tau = \frac{x}{v},$$

где v — скорость распространения колебаний, и смещение 2-й точки выразится

$$\xi = a \sin \omega(t - \tau) = a \sin \omega\left(t - \frac{x}{v}\right). \quad (9)$$

Уравнение (9), называемое уравнением волны или акустического луча, дает возможность определить величину смещения для любой точки $P=f(x \text{ и } t)$.

При продольном характере колебаний частицы, расположенные вдоль оси X при колебаниях, создают разности перемещений (ξ) точек ряда, что ведет к периодическим сгущениям и разрежениям.

Рис. 13 дает наглядное представление о характере продольного распространения колебаний (расширений и сжатий) среды. Вместо гребней и впадин, сопутствующих поперечным колебаниям, мы будем иметь места наибольшей и наименьшей плотности.

Если частица в точке X переместилась на ξ , а соседняя частица $X+dx$ на $\xi+d\xi$, то очевидно, что расстоянием между ними будет не dx , а

$$dx + d\xi = x + dx + \xi + d\xi - x - \xi,$$

расстояние dx изменилось на $d\xi$.

Отношение $\frac{d\xi}{dx}$, являющееся величиной относительного перемещения dx , характеризует величину сгущения точек среды.

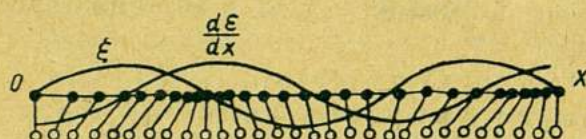


Рис. 13.

Величина относительного перемещения зависит от упругих свойств окружающей среды.

Для вывода интересующей нас величины v рассмотрим силы, действующие в колеблющейся среде.

Если масса dm , находящаяся на участке dx , подвергнется при колебаниях действию с одной стороны силы $E \frac{d\xi}{dx}$, где E — модуль упругости среды, то с другой стороны участка dx , сила, действующая на нее, будет

$$E \left(\frac{d\xi}{dx} + \frac{d^2\xi}{dx^2} dx \right).$$

Очевидно, что произведение из массы на ускорение $dm \frac{d^2\xi}{dt^2}$ равно разности воздействий на участок dx .

$$dm \frac{d^2\xi}{dt^2} = E \frac{d^2\xi}{dx^2} dx,$$

но $\frac{dm}{dx} = \rho$ — плотности среды.

Поэтому $\xi = F(x, t)$ выразится

$$\rho \frac{d^2\xi}{dt^2} = E \frac{d^2\xi}{dx^2}. \quad (10)$$

Берем уравнение (9) и, дифференцируя, находим

$$\begin{aligned}\frac{d^2\xi}{dt^2} &= a \cdot \sin \omega t \cdot \omega^2 = -\xi \omega^2; \\ \frac{d^2\xi}{dx^2} &= -\frac{\omega^2}{v^2} a \cdot \sin \omega \left(t - \frac{\tau}{v}\right) = -\frac{\omega^2}{v^2} \xi;\end{aligned}$$

подставляя выражения вторых производных в формулу (10), получим

$$-\rho \cdot \xi \cdot \omega^2 = -E \frac{\omega^2}{v^2} \xi$$

или

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (11)$$

Таково выражение скорости распространения колебаний в упругой среде. Таким образом, для вывода скорости звука в воде необходимо знать ее модуль объемной упругости и ее плотность.

Из физики известно, что модуль объемной упругости дает зависимость между увеличением давления и соответствующим изменением объема в следующем виде

$$E = \frac{1}{\beta} = -v \cdot \frac{dP}{dv}$$

β — коэффициент сжатия.

Поэтому формула (11) может быть переписана в более общем виде

$$v = \sqrt{-\frac{v}{\rho} \cdot \frac{dP}{dv}}. \quad (12)$$

Ньютон, выведший первую формулу для скорости звука в газах, рассматривал распространение колебаний в изотермических условиях, т. е. с теплообменом между частицами среды при деформации. Тогда P и v связаны уравнением Бойля-Мариотта

$$Pv = \text{const}$$

или

$$\frac{dP}{P} + \frac{dv}{v} = 0$$

и

$$P = -v \frac{dP}{dv},$$

и формула (12) может быть переписана

$$v = \sqrt{\frac{P}{\rho}}, \quad (13)$$

это — формула Ньютона для газов при изотермическом характере процесса.

Сравнивая формулы (11) и (13), видим, что при изотермическом процессе $P = E$, т. е. упругость (давление) равняется модулю упругости.

Практические определения скорости звука в газах и в воде показали большое расхождение опытных результатов измерения v с результатами вычисления v , полученными по формуле Ньютона.

Лаплас указал, что при быстрых колебаниях среды при передаче звука изотермического характера распространений не может быть и что процесс происходит адиабатически, т. е. без теплового обмена между частицами среды.

Тогда P и v связаны уравнением $Pv^K = \text{const}$, где $K = \frac{C_p}{C_v}$ — коэффициент удельной теплоемкости, равный отношению теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме.

Логарифмируя и дифференцируя, находим

$$\frac{dp}{p} + K \frac{dv}{v} = 0 \quad \text{и} \quad Kp = -v \frac{dp}{dv},$$

тогда формулу (12) можно переписать

$$v = \sqrt{\frac{P}{\rho} \cdot K} = \sqrt{\frac{K}{\beta \cdot \rho}}. \quad (14)$$

Выведенная формула Лапласа для скорости звука в газах, при адиабатическом условии распространения, применима и для воды.

При адиабатическом процессе

$$P \cdot K = E.$$

Получив формулы для скорости звука в воде, мы должны найти зависимость v от входящих в выражение (14) величин и выяснить, с какой точностью каждый из аргументов надо на практике определять для более точного знания величины v .

Дадим точные определения входящих в выражение для v величин:

ρ — плотность воды, т. е. масса единицы объема; $\rho = \frac{1}{v_0}$ обратна удельному объему. Обычно плотность в океанографических таблицах представляют в виде условной плотности σ_t ; $\sigma_t = (\rho_{40}^t - 1) 1000$, т. е. из значения плотности вычитают 1 и умножают на 1000. Так, например, плотность 1,02801 пишут 28,01.

P — внешнее давление на единицу объема воды, равно упругости этой единицы объема. Давление обычно выражается в барах.

1 бар = 10^6 дина/см² = 0,9878 атм., т. е. почти равен атмосфере. Поскольку при гидроакустике внешнее давление связано с давлением выше лежащего столба жидкости, то для нас удобнее выражать давление в величине глубины h . В дальнейшем мы и будем искать зависимость v от P , выражая P через h . При переводе употребим

таблицы, приведенные в океанографических таблицах, составленных по Bjerknæs.¹

$\beta = -\frac{1}{v} \cdot \frac{dv}{dp}$ — истинный коэффициент сжатия жидкости; измеряется относительным изменением объема при увеличении давления на единицу. $\beta = \frac{1}{E}$ обратен модулю объемной упругости.

При изотермическом характере изменения объема $E = \frac{1}{\beta} = P$ при адиабатическом $E = \frac{1}{\beta} = KP$. $K = \frac{C_p}{C_v}$ — удельная теплоемкость, C_p — теплоемкость при постоянном давлении, C_v — теплоемкость при постоянном объеме.

$C_p > C_v$ (исключая случай наибольшей плотности, когда $C_p = C_v$).

Заметим здесь же, что при выборке физических величин, характеризующих воду, т. е. ρ , v , σ и т. д., а также зависимости между ними, мы будем пользоваться океанографическими таблицами.² Эти таблицы в части упомянутых данных базируются, в основном, на данные М. Knudsen, J. Sandstrom, V. Bjerknæs и Екман, которые признаются наилучшими в настоящее время.

Берем формулу $v = \sqrt{\frac{K}{\beta \cdot \rho}}$; логарифмируя и дифференцируя, получим (при $K = \text{const}$)

$$\log v = \frac{1}{2} \log \frac{K}{\beta \cdot \rho}; \quad \frac{dv}{v} = -\frac{1}{2} \frac{d\beta \cdot \rho + d\rho \cdot \beta}{\beta \cdot \rho}$$

или

$$\frac{dv}{v} = -\frac{1}{2} \left(\frac{d\beta}{\beta} + \frac{d\rho}{\rho} \right) \quad (15)$$

Переходя к конечным значениям Δv , $\Delta \beta$ и $\Delta \rho$ приращений, мы можем рассматривать их в виде разностей между истинными и принимаемыми значениями соответствующих величин v , β и ρ . Для перехода к средним квадратическим ошибкам ε_v , ε_β и ε_ρ напомним выражений вида 15, возведем их в квадрат, сложим и разделим на n . Тогда получим, отбрасывая стремящийся к нулю член с удвоенным произведением,

$$\frac{\varepsilon_v}{v} = -\frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_\beta}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_\rho}{\rho}\right)^2} \quad (15')$$

т. е. относительная ошибка в определении v будет равна половине корня квадратного из суммы квадратов относительных ошибок в β и ρ .

¹ Океанографические таблицы под редакцией проф. Н. Н. Зубова. Изд. ГМК СССР, 1931.

² Океанографические таблицы под редакцией проф. Н. Н. Зубова. Изд. ГМК СССР, 1931.

Таким образом, для того, чтобы ошибка в скорости звука ε_v не превзошла, положим, величины $6 \cdot 10^{-4} v$ (т. е. примерно $1:1500 v$ или 1 м/сек.), мы должны обеспечить получение β и ρ с ошибкой не большей $8 \cdot 10^{-4} \beta$ и $8 \cdot 10^{-4} \cdot \rho$, т. е.

$$\frac{\varepsilon_\beta}{\beta} = \frac{\varepsilon_\rho}{\rho} > 8 \cdot 10^{-4}. \quad (16)$$

Учитывая, что величины β и ρ , в свою очередь, зависят от величин p , t и s , можно принять, что влияние каждого из этих аргументов на ε_β и ε_ρ нам необходимо знать с ошибкой не большей

$$\frac{8 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{3}} \simeq 5 \cdot 10^{-4} \beta \text{ для первой величины и}$$

$$\frac{8 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{3}} \simeq 5 \cdot 10^{-4} \rho \text{ для второй,}$$

$$\begin{aligned} \text{т. е.} \quad \varepsilon_{\beta p} = \varepsilon_{\beta t} = \varepsilon_{\beta s} &\simeq 5 \cdot 10^{-4} \cdot \beta, \\ \varepsilon_{\rho p} = \varepsilon_{\rho t} = \varepsilon_{\rho s} &\simeq 5 \cdot 10^{-4} \cdot \rho, \end{aligned} \quad (17)$$

чтобы относительная ошибка β и ρ не превзошла допустимой величины по выражению (16).

Рассмотрим прежде всего характер изменения величин β .

Коэффициент сжимаемости уменьшается при повышении температуры и при увеличении давления и плотности, а значит и солёности. Все это ведет к увеличению v . Наиболее точным выражением для β является его выражение через μ —среднюю сжимаемость по Экману

$$\begin{aligned} \mu \times 10^8 = & \frac{4886}{1 + 0,000183 p} - [227 + 28,33 t - 0,55 t^2 + 0,004 t^3] + \\ & + p \cdot 10^{-4} [105,5 + 9,50 t - 0,158 t^2] - 1,5 p^2 t 10^{-8} - \frac{\sigma_0 - 28}{10} [147,3 - \\ & - 2,72 t + 0,04 t^2 - p \cdot 10^{-4} (32,4 - 0,87 t + 0,02 t^2)] + \\ & + \left(\frac{\sigma_0 - 28}{10} \right) [4,5 - 0,1 t - p \cdot 10^{-4} (1,8 - 0,06 t)] \quad (\text{Ekman}). \end{aligned} \quad (18)$$

Связь между истинным коэффициентом сжатия β и средним μ выражается равенством

$$\beta = -\frac{1}{v} \cdot \frac{dv}{dp} = \frac{\mu + p \cdot \frac{d\mu}{dp}}{1 - p \cdot \mu} \cdot 10^{-6}.$$

p —давление в барах,

t —температура в градусах С,

σ —условная плотность при 0° ,

μ —средняя сжимаемость между давлением 0 давлением в P бар.

При определении μ Экман использовал данные Amagat относительно сжимаемости пресной воды. Процесс рассматривался изотермически.

Характер изменения коэффициента сжатия мы проследим по величинам μ . Доктор Шумахер, перегруппировав члены в выражении Экмана, вывел μ в следующем виде.¹

$$10^8 \mu = m = \frac{4886}{1 + 0,000183 p} + 0,1055 p - 227 - [28,33 t - 0,551 t^2 - 0,004 t^3] + \\ + \frac{p}{1000} [9,5 t - 0,158 t^2 - 0,0015 p t] - \frac{s_0 - 28}{10} [147,3 - 2,72 t + 0,04 t^3 - \\ - \frac{p}{1000} (32,4 - 0,87 t - 0,02 t^2)] + \frac{(s_0 - 28)^2}{100} [4,5 - 0,1 t - \\ - \frac{p}{1000} (1,8 - 0,06 t)]. \quad (19)$$

Это равенство наглядно показывает $\mu = f(p, t \text{ и } s)$. Первая строчка дает изменение μ от p , вторая от t , третья от p и t , четвертая и пятая от тех же величин и изменения солёности (плотности).

Как видно из приведенного выражения, основными факторами, определяющими точность μ , являются P и t , второстепенным p или s .

Назовем $\Delta\mu_p$, $\Delta\mu_t$ и $\Delta\mu_s$ — изменения величины μ от изменений P при углублении на 100 м, температуры на 1° и солёности на 1‰ .

Для определения $\Delta\mu_p$ приведем часть таблицы из уже упомянутой работы доктора Шумахера:

Изменения μ от P , (при 0° Ц , $S = 34,85$ соотв. средн. плотн. и $\varphi = 45^\circ$)

Глубина в м	$\mu \cdot 10^8$	$\Delta\mu \cdot 10^8$
0	4658	— 41
500	4617	— 37
1000	4580	— 38
1500	4542	— 37
2000	4505	

т. е. можно принять, что

$$\Delta\mu_{\Delta p=500} \approx 40 \cdot 10^{-8}$$

и

$$\Delta\mu_p \approx 8 \cdot 10^{-8} \quad (20)$$

Выше нами было выведено (формула 17), что для соблюдения установленной точности в определении ν мы должны иметь

$$\varepsilon_{\mu p} \approx 5 \cdot 10^{-4} \mu.$$

Тогда, беря примерную величину μ для морской воды $\mu \approx 4500 \cdot 10^{-8}$, выводим допустимую величину $\varepsilon_{\mu p}$:

$$\varepsilon_{\mu p} \approx \pm 4500 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \approx 22500 \cdot 10^{-12}; \quad \varepsilon_{\mu p} \approx \pm 2,3 \cdot 10^{-8} \quad (21)$$

¹ Ann. d. Hydrographie, 1924.

Но $\varepsilon_{\mu p} \approx 2_3 \cdot 10^{-8}$ соответствует изменению μ при изменении глубины примерно на 30 м. Поэтому, задаваясь целью иметь влияние $\varepsilon_{\mu p}$ в допустимых пределах, мы должны знать глубину слоя воды, в котором проходит звуковая волна с точностью $\leq \pm 30$ м.

Если мы берем μ , ошибаясь в глубине слоя воды более чем на 30 м, то это поведет к увеличению ε_v согласно формуле (15').

Рассмотрим влияние $\varepsilon_{\mu t}$. Изменение коэффициента сжимаемости μ от t можно также вывести по таблицам Шумахера:

Поправки к величине $\mu \cdot 10^8$ в зависимости от температуры

$t^\circ C$	попр. $\mu \cdot 10^8$	$\Delta \mu \cdot 10^8$	$t^\circ C$	попр. $\mu \cdot 10^8$	$\Delta \mu \cdot 10^8$
-2	59	30	+3	80	25
-1	29	29	+4	105	23
0	0	28	+5	128	23
+1	28	27	+6	151	22
+2	54	26	+7	173	22

Можно принять

$$\Delta \mu_t \approx 30 \cdot 10^{-8} \quad (22)$$

Из выражения (21) допустимая величина $\varepsilon_{\mu t} \approx \pm 2_3 \cdot 10^{-8}$. Таким образом, мы должны знать температуру слоя, в котором проходит звук с ошибкой $\pm 0^\circ,1$.

Здесь заключается одна из главных ошибок в определении v . Действительно, знать температуру слоя воды, в котором проходит звуковая волна с точностью до $0^\circ,1$, не удастся.

Выражение (22) дает численное значение $\Delta \mu_t$, влияние его на v можно определить по формулам (15) и (15').

Рассмотрим влияние $\varepsilon_{\mu s}$. Изменение μ от s можно вывести приближенно из табл. 2.

Таблица 2

Поправки к величине $\mu \cdot 10^8$ от температуры и солености

t° $S_{0/00}$	-1°	$\Delta \mu$	0°	$\Delta \mu$	$+2^\circ$	$\Delta \mu$
28	84	12	81	12	78	12
29	72	12	69	12	67	12
30	60	13	57	11	55	11
31	47	12	46	12	44	11
32	35	12	34	12	33	12
33	23	13	22	12	21	11
34	10	8	10	8	10	8
35	2		2		2	

Из таблицы выводим:

$$\Delta \mu_s \approx 12 \cdot 10^{-8} \quad (23)$$

Кроме этой таблицы, можно еще привести данные зависимости коэффициента сжимаемости от солености по Крумелю.

$S \text{ ‰}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$\mu \cdot 10^7$	490	484	478	472	466	461	455	450	444
$\Delta \mu \cdot 10^7$	6	6	6	6	5	6	5	6	

Из этой таблицы $\Delta \mu_s$ также $\approx \pm 12 \cdot 10^{-8}$.

Таким образом и в данном случае, чтобы иметь ε_{μ_s} с допустимой точностью $\pm 2,5 \cdot 10^{-8}$, мы должны знать s для слоя прохождения звука с точностью $\pm 0,2 \text{ ‰}$.

Таковы главные аргументы, от которых зависит точное получение μ , а значит и ν .

Как видно из этого анализа, аргументы должны быть известны настолько точно, что практически это сделать весьма трудно. Поэтому ошибка $\varepsilon_\nu = \pm 1$ м/сек., поставленная нами, как предельная, даже при рассмотрении влияния одного μ может быть достигнута в редких случаях.

На величине ошибки ε_ν , возможной в практике работ, мы еще остановимся дальше.

Совместное влияние p , t и s на μ мы рассматривать не будем так как это не изменит общего характера влияний на μ , которое мы рассмотрели.

Для общего представления об изменении величины дадим небольшую табличку, выбранную из таблицы 44, О. Т., которая составлена по формуле Экмана.

Таблица 3

		$\mu \cdot 10^8$								
p децибар	$t \backslash s$	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0	0	5107	5038	4972	4906	4842	4780	4719	4659	4601
	5	4940	4877	4816	4757	4698	4641	4586	4531	4478
	10	4802	4745	4689	4635	4581	4528	4477	4427	4378
1000	0	4958	4892	4828	4765	4703	4644	4584	4527	4470
	5	4799	4740	4681	4625	4568	4512	4458	4406	4352
	10	4671	4615	4561	4508	4457	4407	4356	4308	4260

Перейдем теперь к выяснению характера изменения p .

Выше нами выведена предельная допустимая относительная ошибка в определении ρ для 3 основных аргументов — p , t и s .

$$\varepsilon_{p_p} = \varepsilon_{p_t} = \varepsilon_{p_s} \simeq 5 \cdot 10^{-4} \rho.$$

Принимая значение ρ для средней плотности при 0° и на поверхности $\rho = 1,02712$, получим ошибку, с которой должно определяться изменение ρ

$$\varepsilon_{\rho(t, p, s)} \simeq 1,02712 \times 5 \cdot 10^{-4} \simeq 51 \cdot 10^{-5}. \quad (24)$$

Если назвать ρ_0 плотность морской воды при температуре наибольшей плотности, то изменение t , в сторону повышения или понижения, поведет к уменьшению плотности по выражению

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \alpha t}, \quad (25)$$

где

α — средний объемный коэффициент расширения между 0° и t° , т. е.

$$\alpha_t = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\rho_t - \rho_0}{t - t_0} = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{d\rho}{dt}.$$

Обозначая $\Delta\rho_p$, $\Delta\rho_t$, $\Delta\rho_s$ изменения величины ρ от изменения P при углублении на 100 м, температуры на 1° и солёности на $1^\circ/_{00}$, выведем их численные значения.

Таблица 4

Изменение плотности от температуры (при $S=35^\circ/_{00}$ на поверхности)

t	ρ	$\Delta\rho_t$	t	ρ	$\Delta\rho_t$	t	ρ	$\Delta\rho_t$
-2	1,02821	3	+2	1,02800	10	+6	1,02758	14
-1	1,02818	6	+3	1,02790	9	+7	1,02744	15
0	1,02812	6	+4	1,02781	12	+8	1,02729	14
+1	1,02806	6	+5	1,02769	11	+9	1,02715	

Как видно из таблицы для температур, близких к 0° С, $\Delta\rho_t \simeq 8 \cdot 10^{-5}$. С дальнейшим повышением температуры $\Delta\rho_t$ быстро растет.

Мы можем принять вышеприведенную величину $\Delta\rho_t$, поскольку в условиях севера температура воды будет лежать в большинстве случаев в пределах $-2 - +5$.

Итак

$$\Delta\rho_t \simeq 8 \cdot 10^{-5}. \quad (26)$$

Увеличение солёности ведет к увеличению плотности. Кнудсен дает следующую зависимость ρ от s :

$$\rho_s = \rho_0 (1 + 0,0008s) \quad (27)$$

на 1 ‰ солености, т. е.

$$\Delta \rho_s \approx 8 \cdot 10^{-4}. \quad (28)$$

С увеличением глубины возрастает статическое давление, а с ним и плотность, по выражению

$$\rho_P = \frac{\rho_0}{1 - \beta P}, \quad (29)$$

где P — давление в метрах глубины.

β — истинный коэффициент сжатия на глубине P .

Величину $\Delta \rho_P$ мы можем приближенно определить из нижеприведенной таблицы изменения ρ с глубиной.

Таблица 5

Изменение ρ с глубиной при $0^\circ = 35\text{‰}^1$

Глуб.	ρ	$\Delta \rho_P$	Глуб.	ρ	$\Delta \rho_P$	Глуб.	ρ	$\Delta \rho_P$
0			400	1,02995	46	900	1,03227	47
50			500	1,03041	46	1000	1,03277	50
100	1,02856	46	600	1,03087	46	1500		
200	1,02902	47	700	1,03133	46			
300	1,02949		800	1,03180	47			

Из таблицы можно заключить, что до глубин 1000 м с изменением глубины на 100 м ρ изменяется на $46 \cdot 10^{-5}$.

Итак

$$\Delta \rho_P \approx 46 \cdot 10^{-5}. \quad (30)$$

С увеличением глубины изменение ρ увеличивается.

Неравномерное изменение ρ от t и P происходит из-за непостоянства коэффициентов α и β , которые сами зависят от температуры и давления.

α — термический коэффициент плотности увеличивается при увеличении температуры и давления. По данным Amagat ²

$$\Delta \alpha_P \approx 29 \cdot 10^{-8} P,$$

$$\Delta \alpha_t \approx 12 \cdot 10^{-6} t.$$

P — в атмосферах.

Поэтому при вычислении таблиц для определения σ , особенно при больших глубинах, влияние изменения α точно учитывается.

¹ Krummel H. d. Oceanogr.

² См. Курс физики Хвольсона.

β — истинный коэффициент сжатия, как мы видели раньше, уменьшается при повышении температуры и увеличении давления, что требует также учета его влияния на ρ .

Если мы соединим формулы (25), (27) и (29), дающие изменение ρ от основных аргументов, то получим

$$\rho(t, s, p) = \frac{\rho_0(1 + 0,0008 s)}{(1 + \alpha t)(1 - p\beta)} \quad (31)$$

Или учитывая изменение α и β , изменение ρ можно выразить

$$\rho(t, s, p) = \frac{\rho_0(1 + 0,0008 s)}{[1 + \alpha_0 t (1 + \Delta\alpha_t + \Delta\alpha_p)] [1 + \beta_0 p (1 + \Delta\beta_t + \Delta\beta_p)]} \quad (32)$$

α_0 и β_0 — коэффициенты при начальных физических условиях.

Определение интересующих нас величин $\frac{d\rho}{dt}$, $\frac{d\rho}{ds}$ и $\frac{d\rho}{dp}$ можно было бы вывести из уравнения (32), но мы не будем делать это, так как нельзя поручиться за правильность имеющихся у нас величин $\Delta\alpha_t$, $\Delta\alpha_p$, $\Delta\beta_t$ и $\Delta\beta_p$.

Кроме того, такой вывод, при разборе примерной точности влияния ρ , β и K , нам и не нужен.

Таким образом, из рассмотрения функции $\rho = F(t, s \text{ и } p)$, можем сделать следующие выводы:

1) Изменение температуры на 1°C дает $\Delta\rho_t \approx 8 \cdot 10^{-5}$. Принимая во внимание допустимую погрешность, с которой нам необходимо определять ϵ_{ρ_t} , т. е. величину $5 \cdot 10^{-5}$, выводим, что, зная даже только примерно температуру до $\pm 6-7^\circ$, мы обеспечим необходимую точность в получении.

2) Изменение солёности ведет к $\Delta\rho_s \approx 80 \cdot 10^{-5}$, т. е. для обеспечения поставленной точности ϵ_{ρ_s} мы должны знать солёность для слоя, в котором проходит звуковая волна с точностью до $0,7\text{‰}$.

3) Изменение глубины ведет к $\Delta\rho_p \approx 46 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, глубину слоя мы должны знать с точностью $\pm 100 \text{ м}$.

Таковы краткие выводы из рассмотрения $v = f(\rho \text{ и } \beta)$.

Для наглядности сведём все численные величины изменения аргументов в одну таблицу.

Для того чтобы получить величину v с относительной ошибкой не более $1/1500$ (т. е. $\pm 1 \text{ м/сек.}$), мы должны:

для ϵ_{ρ_p} знать глубину до $\pm 30 \text{ м}$, что практически выполнимо.

" ϵ_{ρ_t} " t до $\pm 0,1$ — что практически невыполнимо.

" ϵ_{ρ_s} " s до $\pm 0,2\text{‰}$ — " " "

для ε_{pp} знать глубину до ± 100 м что практически выполнимо

"	ε_{ps}	"	s	до $\pm 0,7^{\circ}/_{00}$	"	"	"
"	ε_{pt}	"	t	до $\pm 6-7^{\circ}$	"	"	"

Основной причиной получения ошибочной величины v является погрешность в оценке величины β , так как определение ее требует знания t и s с точностью практически невыполнимой.

Точность получения v теоретическим путем, взятая нами (± 1 м/сек.), практически будет несколько меньше — скорее всего она будет лежать в пределах 1,5—2,0 м/сек. при определении t до $\pm 0,5$, s до $\pm 0,5^{\circ}/_{00}$ и глубины до ± 50 м.

При вышеприведенных рассуждениях мы принимали величину $K = \frac{C_p}{C_v}$ за постоянную. Это неверно. Поэтому при составлении таблиц следует исходить из адиабатического процесса распространения звуковых колебаний в воде и умножить изотермическую величину v на $\sqrt{\frac{C_p}{C_v}}$.

Величина K непосредственно еще не была определена, но по законам термодинамики может быть выведено, что

$$K = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_p}{C_p - \frac{T \cdot \alpha^2}{\rho \cdot \gamma J}} \quad (33)$$

J — механический эквивалент теплоты,

T — абсолютная температура,

α — термический коэффициент расширения,

C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении была определена рядом авторов.

Величина K близка для морской воды к 1,001. Оценка величины K должна быть произведена с такой тщательностью, которая обеспечивала бы получение v с вышеприведенной точностью.

Наиболее важные экспериментальные работы по определению v

Работа Стефенсона (1919 г.). Не останавливаясь на методике определения v в работе Стефенсона, каковая методика аналогична применявшейся Wood и Brown в их работах (см. ниже), скажем только, что ими получено:

$v = 1453$ м/сек. при $t = 3^{\circ} \text{C}$, $s = 33,5^{\circ}/_{00}$, при средней глубине 18—15 м.

Особой ценности работа не представляла, так как, судя по расхождениям между отдельными определениями v , можно заключить о недостаточном внимании, которое уделялось определению t в процессе опытов. Интересных обобщающих выводов автор также не делает.

Работа Марти (1919 г., Шербург). Метод наблюдений состоял в производстве взрывов бомб на линии расположения 3 гидрофонов. Расстояние между гидрофонами было 900 м. Марти было получено $v = 1504,15 \pm 0,5$ м при $+15^\circ$ С и $\rho = 1,026$ ($s = 32,35\%$), глубина около 13 м.

Кроме того, желая обобщить выводы из экспериментальной работы, Марти, приведя формулу скорости звука к виду

$$\frac{av}{v} = -\frac{1}{2} \left(\frac{d\rho}{\rho} + \frac{d\mu}{\mu} \right),$$

построил кривые относительных изменений величин $\frac{d\mu}{\mu}$ и $\frac{d\rho}{\rho}$ с изменением самих переменных и затем получил и соответствующие изменения в скоростях звука.

Зависимость v от ρ и μ Марти свел к графикам.¹

О точности определения v по Марти мы еще скажем несколько дальше.

Доктор Маурер произвел вычисления скоростей звука в воде, основываясь на величинах сжимаемости, выведенных по разности в удельных объемах морской воды из таблицы Бьеркнеса.

Результаты не отличаются хорошей точностью. Сам Маурер, сравнивая скорости звука в воде, полученные различными авторами, указывает на меньшую точность своих вычислений по сравнению с данными вычислений Шумахера.

Автор предлагает эмпирическую формулу для определения v .

$$v = 1445 + 4,46 t - 0,0615 t^2 + (1,2 - 0,015 t) (s - 35).$$

Доктор Экхард (1923 г.) производил непосредственные измерения скорости звука при больших расстояниях между местом взрыва и гидрофонами; им было получено

$$v = 1492,3 \text{ при } t = 13^\circ, s = 33,5\% \text{ и } 30 \text{ м глубины.}$$

Работы Вуда и Брауна (1921—1923 гг.). На методике и результатах этих работ мы остановимся подробно, так как они были

¹ Графики см. в работе К. С. Ухова, „Звуковое измерение глубин“. Изд. Гидрографического управления УМС.

произведены весьма тщательно и полностью дают весь процесс экспериментального определения ν .

Общий принцип опытного определения ν заключался в том, что

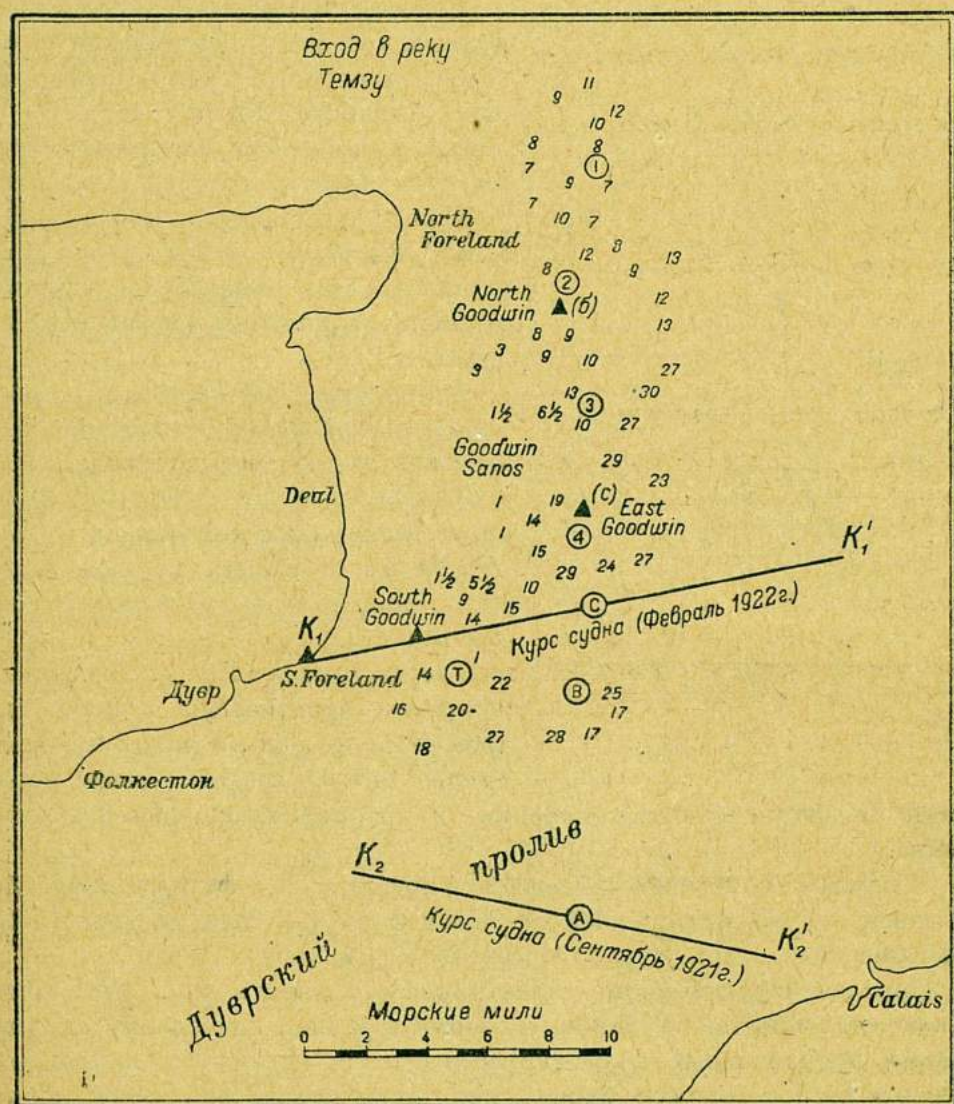


Рис. 14.

отмечалось время, необходимое для прохождения звука между гидрофонами, расстояние которых друг от друга было известно. Рис. 14 дает схему района работ и расположения гидрофонов.

Гидрофоны были установлены в точках 1, 2, 3 и 4, т. е. примерно по линии $N-S$, в расстоянии 5—6 миль друг от друга, на восток от песчаной отмели Гудвин (Goodwin Sands). Места гидрофонов определялись геодезически, засечками с берега.

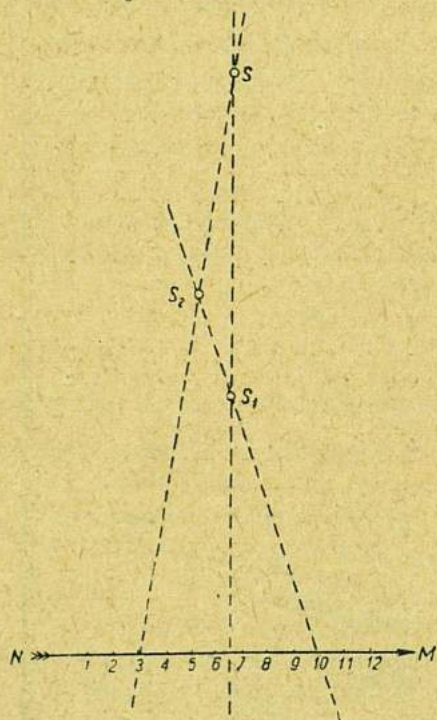


Рис. 15.

Каждый гидрофон соединялся подводным кабелем с центральной береговой станцией, где саморегистрирующая установка Эйнтховена¹ давала возможность определять промежутки времени с точностью 0,002.

Целью проведения опытов, помимо основной — определения v , — ставилось еще определение влияния величины и глубины взрыва бомб на скорость.

В процессе всей работы серьезное внимание уделялось регистрации физических данных морской воды.

Температура и соленость воды определялись, как правило, в 4 точках (в месте взрыва, с точек (б) и (с) к норду и зюйду от банки Гудвин и в точке T').

Так как точки (б) и (с) были расположены практически в линии гидрофонов, то данные по t и s в этих точках можно считать очень близкими к действительным условиям, в которых проходила звуковая волна.

В каждой точке t и s наблюдались при глубине 6 фут (принималось за поверхность), при средней глубине и у дна. Среднее из этих 3 данных считалось температурой и соленостью в данной точке.

Определение солености гарантировало точность до 1:3000. Для исключения влияния приливов, имеющих в районе проведения опытов весьма неправильный характер и создающих скорости приливных течений до 5 узлов, все наблюдения проводились во время смены течений квадратурного прилива, когда они прекращались и отпадала надобность в поправках.

Вес заряда бомб менялся от 30 г до 112 кг; обычно же употреблялись глубинные заряды весом 1—7 кг.

¹ Стандартный тип, выпускаемый Cambridge & Pouls Instruments Co.

Самая работа проводилась методом „многократных взрывов“ (The Multiply charge method), который заключался в следующем:

Судно ходило курсами K_1K_1' и K_2K_2' , пересекая линию гидрофонов (рис. 14).

Очевидно, что для определения v необходимо, чтобы судно сбросило бомбу строго в линии той пары гидрофонов, расстояние между которыми входит в отношение $\frac{d}{t}$.

В противном случае нужно было бы вводить поправку за приведение к „строгому створу“ путем исправления наблюдаемого промежутка.

Однако, экспериментаторы избегли необходимости ввода поправок следующим образом: примерно в линии створа гидрофонов ими ставился буй: судно, идя строго одним курсом, перпендикулярно линии гидрофонов, и держа строго постоянную скорость, сбрасывало через равные интервалы 6 бомб до буя А (линии гидрофонов) и 6 бомб после линии гидрофонов. Очевидно (рис. 15), что промежуток времени, записанный гальванометром для какой-либо пары гидрофонов S и S_1 , возрастал до момента пересечения строгой линии створа данной пары и затем уменьшался.

Для каждой пары строился график изменения промежутка времени прохода звуковой волны в течение всего времени сбрасывания бомб (рис. 16). Максимум кривой давал отметку промежутка времени, относящегося строго к линии створа.

$$\text{Тогда } v = \frac{D}{t_{\max}}.$$

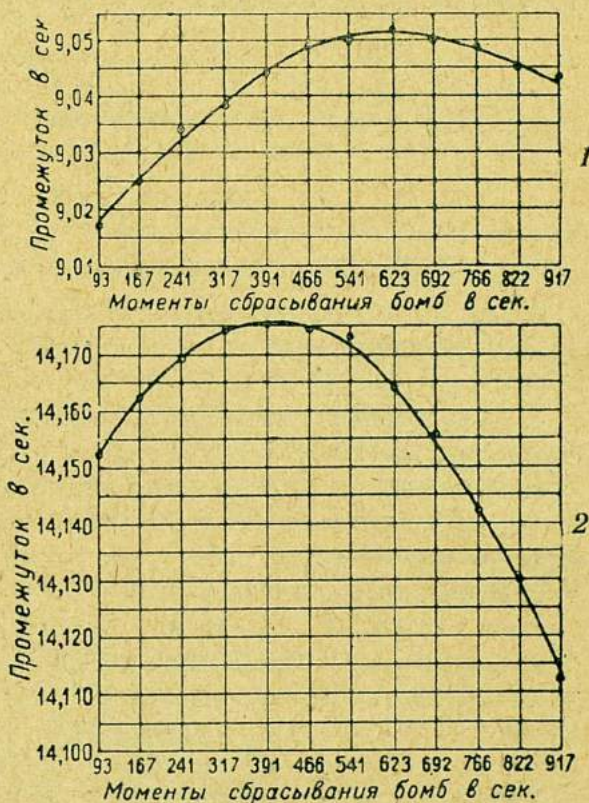


Рис. 16.

- 1—Гидрофоны 1—3. Максимум на линии створа соответствует промежутку 9,051 сек.
2—Гидрофоны 1—4. Максимум на линии створа соответствует промежутку 14,176 сек.

Допущениями в этом способе являются постоянство хода и курса; но, поскольку весь процесс подрыва бомб продолжается не более 15 минут, то экспериментаторы считали эти допущения невливающими на результаты измерения.

При вычислении скоростей линейные базисы брались только между гидрофонами. Расстояния между местом взрыва бомбочки и каждым гидрофоном не применялись из-за меньшей их точности.

Выводы из работы

1. Точное определение скорости взрывной звуковой волны в морской воде дает следующие результаты:

$$v = 1510,45 (\pm 0,3) \text{ м/сек. при } 16^{\circ},95 \text{ }^{\circ}\text{C} (\pm 0^{\circ},1) \text{ и } S = 35^0/_{00}.$$

$$v = 1474,03 (\pm 0,61) \text{ м/сек. при } 6^{\circ} \text{ }^{\circ}\text{C} (\pm 0^{\circ},1) \text{ } S = 35,1^0/_{00}.$$

$$v = 1477,38 (\pm 0,46) \text{ м/сек. при } 7^{\circ} \text{ }^{\circ}\text{C} (\pm 0^{\circ},1) \text{ } S = 35^0/_{00}.$$

2. Вышеприведенные результаты дают среднее значение температурного коэффициента при выводе скорости, равное 3,32 м/сек. на 1°C в пределах от $6^{\circ},9$ — 17°C .

3. Коэффициент солёности, определенный приблизительно, равен от 0,9 до 1,2 м/сек на $1^0/_{00}$ увеличения солёности.

4. Изменение в скорости не было замечено при изменении веса бомбы от 9 унций до 300 фунтов взрывчатого вещества. Расстояние от места взрыва до средней точки базиса было примерно 5 миль.

5. Вариаций v с изменением глубины взрыва отмечено не было. Глубина взрыва от 3 до 30 м.

6. Коэффициент адиабатической сжимаемости морской воды при $16^{\circ},95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $S = 35^0/_{00}$ был вычислен

$$\rho_a = 42766 \pm 0,02 \times 10^6;$$

принимая величину коэффициента изотермической сжимаемости по Экману (выражение 19), получаем величину K для данной температур и солёности

$$K = \frac{\rho_a}{\rho_i} = \frac{C_p}{C_v} = 1,0094 \pm 0,0005.$$

7. Для вычисления v авторы дают эмпирические формулы:

$$v = 1449,04 + 4,206 t - 0,0366 t^2 \text{ м/сек.}$$

$$v = 1410,02 + 4,2 t - 0,0366 t^2 + 1,137 S \text{ м/сек.}$$

Описанные выше экспериментальные работы по определению v относятся к периоду возникновения и первых применений радиоакустики для целей промера эхолотами и координирования судов в море. После работ Вуда и Брауна исследования поведения звуковых волн в воде и величины v , судя по литературе, велись главным

образом американцами. Это и понятно, так как для американских гидрографов все эти вопросы приобрели, благодаря широкому применению РАСК, большой практический интерес.

Экспериментальные работы велись в течение всех лет с 1925—1927 гг. теми же судами, которые были заняты промером с координированием по РАСК. Особенно много опытных работ было проведено при работах на банке Георга в Атлантическом океане (см. дальше). В 1933 г. два гидрографические судна „Guide“ и „Pioneer“ были специально заняты выяснением вопросов о путях прохождения звуковой волны и изменений v в зависимости от характера рельефа и физических условий района. В настоящее время ведется обработка материала. Выводы еще не опубликованы.

Распространение звуковой волны в неоднородной среде

Учитывая все выводы, полученные нами при разборе зависимости v от физических данных морской воды, мы можем заключить, что морская вода далеко не всегда представляет собою среду, дающую неискаженное прохождение звука.

Если бы морская вода представляла однородную среду, то линию пути звука (или звуковой луч) можно было бы представить как прямую, проведенную между источником и приемником звука.

На самом же деле изменения t , s , и p как с глубиной от слоя к слою, так и в горизонтальных слоях значительно нарушают прямолинейность пути звукового луча.

Желание получать v по таблицам для различных условий и, кроме того, необходимость выяснения дальности действия взрывных звуковых волн и ее зависимости от конфигурации рельефа дна заставили американских гидрографов обратить серьезное внимание на определение путей прохождения звуковых лучей в морской воде. Действительно, только при знании характера распространения звукового луча можно взять правильные величины t , s и p и с ними по теоретическим таблицам выбрать v . Иначе придется определять v практически, оставив в стороне вопрос о том, какому пути она соответствует.

Звуковой луч при переходе из одной среды в другую, акустически неоднородную, подвержен преломлению по известным законам физики

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \beta_1 = n_2 \cos \delta_1,$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления 2 смежных сред,

α_1 — угол падения луча на линию раздела 2 сред,

β_1 — угол преломления,

δ_1 — дополнение угла преломления до 90° .

Кроме того, известно, что преломление в последовательных слоях с различной величиной v можно выразить

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (34)$$

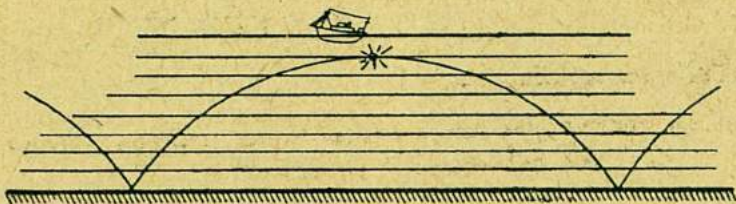


Рис. 17.

Таким образом, если мы представим себе столб воды, разбитый на n слоев, в каждом из которых $v = \text{const}$ и $v_1 > v_2 > v_3 > \dots > v_n$, то акустический луч должен в общем случае получить искривление выпуклостью кверху (рис. 17).

Дойдя до дна, луч в значительной степени поглощается им, а оставшаяся часть энергии отражается и идет дальше по кривой подобного же характера, как и до прихода к дну. Такие условия будут иметь место, например, при уменьшении t с глубиной (лето

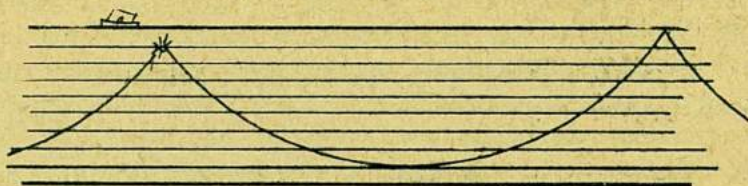


Рис. 18.

в обычных условиях). Такой путь акустического луча отражается на дальности передачи в смысле значительного ее уменьшения.

При условии $v_1 < v_2 < \dots < v_n$ акустический луч в общем случае должен получить искривление выпуклостью вниз. Такие условия будут иметь место при повышении температуры с глубиной (зимой в обычных условиях). Дальность передачи в таких случаях значительно возрастает (рис. 18).

Выведем уравнение траектории акустического луча, предполагая состояние среды аналогичное рис. 17, т. е. при уменьшении v с глубиной (t уменьшается).

Предположим, что начало акустического луча совпадает с точкой O — началом координат (рис. 19). Направим ось X -ов по поверхности воды, а ось Y -ов вертикально вниз.

Можем написать равенство

$$\frac{\Delta x}{\Delta y} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}} = \frac{\frac{v}{v_0} \cos \delta}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 \cos^2 \delta}}, \quad (35)$$

но $\frac{v}{v_0} = \sqrt{\frac{\rho_0 p_0}{\rho p}}$ (изотермически).

Ограничимся рассмотрением влияния t на искривление акустического луча, т. е. будем рассматривать только

$$\mu = F_1(t) \text{ и } \rho = F_2(t).$$

Раньше мы уже указывали, что коэффициент сжимаемости и плотность изменяются от t по выражениям

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_0(1 + my) \\ \rho &= \rho_0(1 + ny) \end{aligned} \quad (36)$$

Подставляя выражения μ и ρ в выражение для $\frac{\Delta x}{\Delta y}$, получим

$$\frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{\cos \delta}{\sqrt{1 - \frac{(1 + my)(1 + ny)}{\cos^2 \delta}}}$$

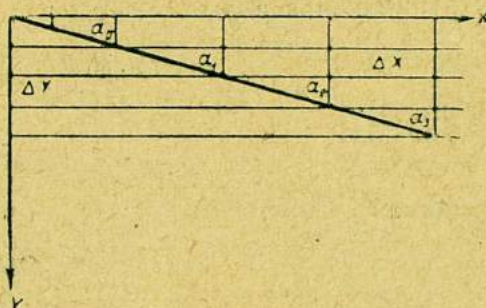


Рис. 19

и после интегрирования

$$x = \int \frac{\cos \delta}{\sqrt{\sin^2 \delta + my + ny}} = \frac{2 \cos \delta}{(m+n)} \sqrt{\sin^2 \delta + my + ny} + C.$$

Весь слой воды разделен на элементарно тонкие слои при $X=0$ и $Y=0$.

Постоянная C определится как

$$C = -\frac{2 \sin \delta \cdot \cos \delta}{m+n} = -\frac{\sin 2\delta}{m+n}$$

и уравнение траектории луча будет

$$\left(x + \frac{\sin 2\delta}{m+n}\right)^2 = \frac{4 \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \delta}{(m+n)^2} + \frac{4 \cos^2 \delta \cdot y}{m+n},$$

откуда

$$y = \frac{m+n}{4 \cos^2 \delta} x^2 + \operatorname{tg} \delta \cdot x \quad (37)$$

Для малых δ , т. е. для лучей, которые идут по направлению, близкому к горизонтали, выражение (37) можно переписать

$$y = \frac{m+n}{4} x^2. \quad (38)$$

Из уравнения (38) можем заключить, что отрезок кривой траектории акустического луча имеет параболический характер. К такому заключению пришел Н. Lichte.

Профессор С. Я. Соколов приходит к выводу о том, что луч, вышедший из какой-либо точки, проходит, по закону логарифмической спирали, все время удаляясь от нее.

Уравнения (37) и (38) выражены в общем виде, так как величинам m и n не приданы соответствующие численные значения.

В выражениях (36) величины m и n обозначают изменения коэффициента сжимаемости и плотности от измерения температуры.

$$m = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{d\rho}{dt} \cdot \frac{dt}{dy} \quad \text{и} \quad n = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{d\rho}{dt} \cdot \frac{dt}{dy}. \quad (39)$$

Принимая для воды

$$\mu = 45 \cdot 10^{-6}; \quad \frac{d\mu}{dt} = 3 \cdot 10^{-7},$$

получим

$$m = -7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{dt}{dy},$$

и принимая

$$\rho_0 = 1$$

$$\frac{d\rho}{dt} = 8 \cdot 10^{-5}$$

получим

$$n = -8 \cdot 10^{-5} \frac{dt}{dy}. \quad (40)$$

Выражение (40) показывает, что величина n незначительна по сравнению с m (1,0%). Поэтому при дальнейшем выводе численных выражений, характеризующих поведение акустического луча, n можно принять равным нулю, т. е. пренебречь влиянием изменения плотности от температуры на искривление акустического луча. Тогда выражения (37) и (38) примут вид

$$y = -\frac{7}{4 \cos^2 \alpha} \cdot 10^{-3} \frac{dt}{dy} x^2 + \operatorname{tg} \alpha \cdot x$$

и

$$y = -\frac{7}{4} 10^{-3} \frac{dt}{dy} x^2. \quad (41)$$

Например, принимая условно, что при глубине в 30 м температура в этом промежутке изменяется на 1° , получим

$$\frac{dt}{dy} = -\frac{1}{30}$$

и соответствующее значение Y будет

$$Y = 5,83 \cdot 10^{-5} x^2,$$

откуда для $Y = 30$ м

$$x = V \sqrt{\frac{y}{5,8 \cdot 10^{-5}}} \simeq 700 \text{ м,}$$

т. е. звуковой луч, вступивший в среду почти горизонтально, при условии правильного изменения температуры от поверхности до дна (30 м), на 1° в сторону уменьшения, выгнется выпуклостью вверх и достигнет дна, пройдя примерно 700 м от места входа в среду. Если падение температуры с глубиной было бы больше 1°С , то искривление акустического луча также было бы больше. Дальность передачи также уменьшилась бы, так как при достижении дна большая часть звуковой энергии поглощается дном.

Если бы температурный градиент, имея обратный знак, т. е. если t увеличивалась бы с глубиной, то искривление луча было бы выпуклостью вниз и поглощение у дна, при достаточной глубине, могло бы не произойти.

Таков общий принцип поведения акустического луча в неоднородной среде, при правильном изменении t от поверхности до дна.

В действительности, как мы видели, на скорость звука влияет не только температура, но P и S , причем их влияние складывается в самых различных комбинациях.

Все это создает весьма трудные условия для строгого математического выражения акустического луча.

Желая рассмотреть влияние других факторов, например S или P , на искривление акустического луча, мы должны были бы рассмотреть, подобно предыдущему, изменение v в зависимости от равномерного изменения P или S и построить кривую луча. Обычно, если t понижается с глубиной и это ведет к искривлению луча выпуклостью кверху, то соленость увеличивается с глубиной, уменьшается величина β и луч, наоборот, стремится выгнуться выпуклостью вниз. Происходит выравнивание луча в результате взаимодействия обоих факторов.

Мы вывели, что $\Delta \mu_t \simeq 30 \cdot 10^{-8}$, а $\Delta \mu_s \simeq 12 \cdot 10^{-8}$, т. е. изменение солености на 1‰ поведет к равному изменению μ , как и от $\Delta t = 0^\circ, 4$.

Кроме того, мы видели, что с увеличением глубины β уменьшается и v увеличивается, причем $\Delta \mu_p \simeq 8 \cdot 10^{-8}$ (на 100 м глубины); поэтому, если искривление луча вызывается уменьшением температуры с глубиной, то влияние изменения t на 1°С вызывает $\Delta \mu_t \simeq 30 \cdot 10^{-8}$ и может быть компенсировано P на глубине 350—400 м.

Таким образом, если бы даже мы имели уменьшение температуры к дну на несколько градусов, то постоянный „компенсатор“ — стати-

Таблица 6

Сравнение фактических скоростей с теоретическими скоростями для различных путей прохождения звука

Фактиче- ская ско- рость	Скорость на поверхности	Скорость в среднем слое	Скорость у дна	Разность между 1 и 2	Разность между 1 и 3	Разность между 1 и 4
З а л и в А л я с к а						
1469,8	1490,9	1478,1	1469,2	— 21,1	— 8,3	+ 0,6
1467,4	1483,0	1477,2	1470,2	— 51,6	— 9,8	— 2,8
1471,7	1483,0	1480,1	1473,2	— 11,3	— 8,4	— 1,5
1471,0	1483,0	1474,3	1469,2	— 12,0	— 3,8	+ 1,8
1470,0	1484,8	1477,0	1469,5	— 14,8	— 7,0	+ 0,5
1468,9	1495,1	1476,9	1468,8	— 26,2	— 8,0	+ 0,1
1469,2	1483,7	1474,6	1469,3	— 14,5	— 5,4	— 0,1
			Средняя .	— 16,5	— 7,2	— 0,2
С р е г о н и В а ш и н г т о н						
1477,8	1495,9	1487,6	1479,0	— 18,1	— 9,8	— 1,2
1475,4	1495,9	1480,7	1475,4	— 20,5	— 5,3	0,0
1478,5	1497,8	1484,7	1477,3	— 19,3	— 6,2	+ 1,2
1482,1	1497,8	1486,0	1478,7	— 15,7	— 3,9	+ 3,4
1475,2	1497,8	1483,7	1476,2	— 22,6	— 8,5	— 1,0
1475,3	1497,8	1483,3	1475,7	— 22,5	— 8,0	— 0,4
1476,7	1497,8	1480,3	1475,4	— 21,1	— 3,6	+ 1,3
1476,1	1497,8	1480,1	1475,7	— 21,7	— 4,0	+ 0,4
1477,4	1497,8	1483,7	1476,1	— 20,4	— 6,3	+ 1,3
1476,4	1497,8	1484,7	1477,4	— 21,4	— 8,3	+ 1,0
			Средняя .	— 20,3	— 6,3	+ 0,4
Северная Калифорния						
1479,9	1489,7	1482,8	1479,0	— 9,8	— 2,9	+ 0,9
1477,2	1489,7	1481,9	1478,7	— 12,5	— 4,7	— 1,5
1479,2	1489,7	1482,4	1479,1	— 10,5	— 3,2	+ 0,1
1477,2	1489,7	1481,6	1478,6	— 12,5	— 4,4	— 1,4
1480,9	1489,7	1481,7	1478,5	— 8,9	— 0,8	+ 2,4
1479,3	1489,7	1481,3	1478,5	— 10,4	— 2,0	+ 0,8
1478,9	1489,7	1481,4	1478,3	— 10,8	— 2,5	+ 0,6

(Продолжение)

Фактическая скорость	Скорость на поверхности	Скорость в среднем слое	Скорость у дна	Разность между 1 и 2	Разность между 1 и 3	Разность между 1 и 4
1481,1	1489,7	1481,7	1478,3	— 8,6	— 0,6	+ 2,8
1490,1	1497,3	1492,0	1489,3	— 7,2	— 1,0	+ 0,8
1489,1	1494,5	1492,0	1491,2	— 5,4	— 2,9	— 2,1
1490,6	1494,5	1493,0	1491,7	— 3,9	— 2,4	— 1,1
1483,7	1497,3	1490,5	1486,7	— 13,6	— 6,8	— 3,0
1488,0	1497,3	1490,5	1486,2	— 9,3	— 2,5	+ 1,8
1489,2	1498,8	1491,7	1489,4	— 9,6	— 2,5	— 0,2
1485,2	1499,2	1488,1	1485,0	— 14,0	— 2,9	+ 0,2
1480,2	1489,0	1485,0	1480,2	— 8,8	— 4,8	0,0
1479,7	1489,0	1484,2	1480,4	— 9,3	— 4,5	— 0,7
1480,9	1489,0	1483,0	1480,3	— 8,0	— 2,1	+ 0,9
1481,0	1489,0	1483,8	1480,6	— 8,1	— 2,8	+ 0,7
1478,2	1489,0	1483,4	1479,9	— 10,8	— 5,2	— 1,7
1479,0	1489,0	1483,8	1480,7	— 10,0	— 4,9	— 1,7
1493,8	1493,2	1487,4	1484,9	+ 0,6	+ 6,4	+ 8,9
1487,8	1493,2	1487,9	1485,8	— 5,4	— 0,1	+ 2,0
1490,4	1493,2	1487,4	1485,5	— 2,8	+ 3,0	+ 4,9
1486,2	1493,2	1489,6	1486,7	— 7,0	— 3,4	— 0,5
1489,0	1492,1	1487,4	1483,1	— 3,1	+ 1,6	+ 5,9
1489,0	1492,1	1488,8	1485,2	— 3,1	+ 0,2	+ 3,8
			Средняя .	— 8,3	— 2,2	+ 0,9
			Общая средняя .	— 12,3	— 3,2	+ 1,0

ческое давление — должен на некоторой глубине поднять опускающийся луч кверху и ограничить его колебания в некотором слое, характерном некоторым акустическим постоянством.

Чем сильнее падает температура с глубиной, тем теоретически глубже должен находиться слой прохождения основной звуковой энергии. Распределение солености и влияние P будут только несколько видоизменять указанный порядок, как это можно заключить из данных на стр. 88—89, указывающих влияние различных факторов.

При постановке гидрографических работ на банке Георга американским гидрографам впервые пришлось серьезно столкнуться с вопро-

сом о путях распространения звуковых взрывных волн. Весьма значительное изменение температуры от поверхности до дна требовало выяснения вопроса: для какого же слоя брать физические данные при выборке v по теоретическим таблицам?

Действительно, изменение температуры от поверхности до дна на 10°C ведет к изменению v на 40—50 м в секунду, и точное координирование недостижимо без знания того слоя, который должен определить выбор температуры.

По многочисленным экспериментальным данным инж. Шалович составил сравнительную таблицу фактических скоростей звука с теоретическими, вычисленными по английским таблицам для поверхности, для слоев со средней глубиной и для придонных слоев.

Материалы, послужившие для составления таблицы, получены независимо различными наблюдателями в различных районах.

Из табл. 6 видно очень хорошее совпадение опытных (фактических) скоростей звука с теоретическими скоростями, вычисленными с данными для придонных слоев.

Таблица 7 резюмирует результаты предыдущей.

Таблица 7

Средние разности (в м/сек.) между фактическими и теоретическими скоростями для предполагаемых путей прохождения звуковой волны

	По поверхности	По середине	На дне
Из всех наблюдений (51)	— 12,3	— 3,2	+ 1,0
Из наиболее удачных наблюдений (42)	— 13,7	— 4,6	+ 0,01
Из наблюдений в местах с очень низкой температурой	— 18,7	— 6,7	+ 0,15

Инженер Шалович делает следующее заключение: „Это замечательное совпадение скоростей теоретических и скоростей, вычисленных на практике при температурах воды, которые имеют место на дне, указывает на то, что максимум звуковой энергии, воспринимаемой гидрофоном, доходит до него не кратчайшим путем, где скорость больше, но более окружным путем, т. е. пройдя нижние слои воды, где скорость фактически меньше. Как объяснить это кажущееся противоречие? Предполагают, что здесь дело главным образом в температуре: определенное количество энергии пройдет дальше в холодной, чем в теплой воде, и хотя скорость звука быстрее на поверхности, но и энергия расходуется быстрее, и на далеких рас-

стояниях она не доходит до гидрофона. Поэтому гидрофон регистрирует лишь энергию, прошедшую нижние более холодные слои...”

“... Хотя эта теория находит себе большие подтверждения как в современной стадии изучения вопроса, так и в опытах с горизонтальной трансмиссией звука у южного побережья Атлантического океана, я думаю, еще слишком рано делать окончательные выводы относительно поведения звуковой волны...”

“... Для настоящего времени важным является то, что уже установлено фактическое соотношение между скоростями, полученными путем опыта, и теоретическими скоростями, что помогло нам наметить правильные установки при исследовании банки Георга. Можно еще добавить, что изучение показало полную несостоятельность предположения эффективной звуковой волны по поверхности или около нее...”

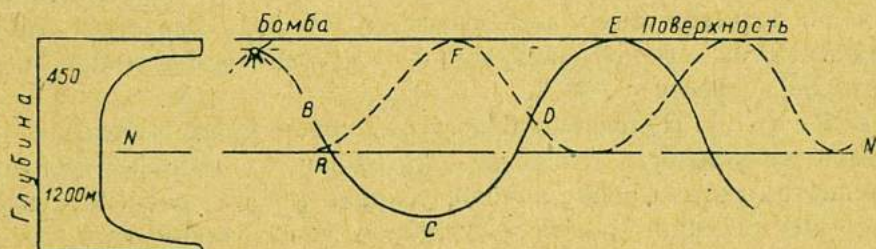


Рис. 20.

В своем объяснении инженер Шалович не упоминает о возможности допустить, что при данных глубинах и температурах акустические лучи в придонных слоях нашли тот слой, в котором существовало условие сравнительной акустической стабильности от взаимодействия t и P . А поскольку разность температур поверхность — дно для американских условий обычно большая, этот слой лежит глубоко.

Интересно отметить, что, хотя по специальным работам судов Guide и Pioneer в 1933 г. в области гидроакустики материалы еще и не опубликованы, но в отчете C. & G. Survey за 1934 г. имеется чертеж, схематически показывающий траекторию акустического луча в зависимости от глубины. Под чертежом помещена заметка следующего содержания:

“... При больших глубинах вероятный путь акустического луча показан жирной линией: бомба $B-R-C-D-E$. Когда дно расположено выше глубины C , например по NN , то отражение должно произойти в точке R , и путь того же луча должен быть: бомба $R-F-D$. Можно заметить из рис. 20, что истинная горизонтальная скорость будет изменяться с глубиной и расстоянием от взрыва гидрофона”

Мне кажется, что этот рисунок дает первые намеки на уже более конкретное и правильное разрешение вопроса о пути звукового луча.

Повидимому, акустический луч находит себе слой с относительной акустической стабильностью и идет по нему с основной энергией.

Таким образом, при проведении работ нужно будет проделать сравнение фактических скоростей звука не только для придонных слоев, как это делали и делают американцы, но и для слоев воды, которые при разборе физических условий дают основание считать их акустически стабильными.

Внешние условия, влияющие на передачу и прием звука

Десятилетняя практика американских гидрографов по применению радиоакустики показала, что нормальная передача и прием подводных сигналов взрывов бомб зависит от целого ряда факторов. Не останавливаясь на дефектах аппаратуры, остановимся на влиянии внешних факторов в работе с РАСК.

а) Рельеф. Приглубые берега без прибрежных отмелей и банок, дающие возможность установки гидрофонов на песчаном или мелкокаменистом грунте, дают лучшие условия работы радиоакустических береговых станций. При таких условиях, когда, кроме того, нет сильных подъемов рельефа или песчаных банок между береговыми станциями и производящим работы судном, координирование шло совершенно четко на 60—70 миль от берега. Наибольшие дальности доходили до 200 миль. Малые глубины с песчаными банками, с неровным дном сильно уменьшают дальность передачи звука и делают работу неуверенной. Появляется необходимость брать большие бомбы и работать на 15—20 миль.

Из опыта работы г/с „Гидрограф“ видно, что на малых глубинах при ветре происходило перемешивание воды с илом и песком, вода делалась мутной, и дальность четкой передачи и приема падала до 7—10 миль.

Таким образом, в случае необходимости координирования мелководного района (10—20 м) дальняя передача и прием не обеспечиваются. В данном случае необходимо разбивать триангуляцию на воде.

Мелководные песчаные банки, острова и пр., лежащие между станцией и судном, могут полностью экранировать передачу звука.

б) Весьма существенным условием наилучшей как по дальности, так и по чистоте передачи является постоянство и однозначность физических (гидрологических) факторов. Об этом мы уже говорили выше. Условия Севера, в которых t и S

с глубиной изменяются несравненно меньше, чем в практике американцев, дают основание рассчитывать на большую четкость и большую дальность при применении РАСК. Влияние течения изменяет скорость звука (см. § 5); кроме того, течения, принося слои воды с другой температурой и соленостью, ведут к искривлению акустического луча. Величина искривления, конечно, будет зависеть от силы и характера течения. В районе с выносом большого количества пресных вод можно ожидать значительные отклонения, а течения постоянные морские, не вносящие сильных изменений в гидрологический режим района, могут быть учтены; однако влияние их весьма мало (см. § 5).

Американским гидрографам, в условиях резких сезонных изменений температур воды, приходится много внимания уделять тщательным наблюдениям за ходом гидрологических элементов по району. Например, при промере банки Георга велись весь сезон наблюдения за изменением t и S . Изменение t шло настолько быстро, что в среднем ν менялось на 1 м/сек. каждые 4 дня.

Интересное явление отмечено у берегов Виргинии в 1933 г., где после сильного шторма акустическое состояние воды было на несколько недель нарушено настолько, что невозможно было вести нормальную работу; впоследствии оно восстановилось.

Теоретические приемы вычисления

Определение ν опытным путем, как мы видели, занимает все же довольно много времени и средств. Поэтому, со времени развития эхолотования и радиоакустики, рядом авторов были созданы таблицы для нахождения ν по формулам Лапласа или Ньютона.

Английские таблицы

Гидрографический департамент Английского адмиралтейства издал в 1927 г. таблицы для определения скорости звука в воде: „Tables of the velocity of sound in pure water and sea water for echo-sounding and sound-ranging“ Н. D. 282, 1927 г.

Эти таблицы признаны наилучшими и для радиоакустики.

В основание расчета скорости ν ими была положена формула (14), величины ρ выбирались из таблиц Knudsen, 1901 г., коэффициент сжимаемости β выводился по формуле:

$$\beta = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{d\nu}{d\rho} = \frac{\mu + P \frac{d\mu}{dP}}{1 - P\mu} 10^{-6},$$

где μ — средняя сжимаемость была принята по выражению Экмана (см. формулу 18).

Коэффициент $K = \frac{C_p}{C_v}$, который до настоящего времени для воды непосредственно не определен, выводился по соотношению, известному из термодинамики (выражение приводилось выше, формула 33).

Отнесение значений v , вычисленных для различных давлений, к соответствующим глубинам делалось по таблицам перевода Экмана.¹

При переводе принималось значение p для океана при $t = 0^\circ\text{C}$ и $S = 34,85\text{‰}$.

Поправки за это допущение могут доходить до 10 децибар, что соответствует $\Delta v = 0,2$ м/сек.

Точность таблиц Английского адмиралтейства зависит от следующих причин:

1) от точности выборки физических величин из таблиц Кнудсена 1901 г. Авторы считают эти таблицы наиболее точными из существующих;

2) от точности определения сжимаемости воды по формуле Экмана. Формула Экмана была основана на наблюдениях над пресной водой и над морской водой солености $S = 31,13$ и $38,53\text{‰}$.

Вследствие этого точность таблиц меньше для воды с соленостью менее 30‰ , чем для более соленой. Ошибку, зависящую от β , авторы считают около $\pm 0,5$ м/сек. для $t < 10^\circ\text{C}$. Таблицы для пресной воды, вероятно, имеют большую точность. Измерение сжимаемости при $t > 20^\circ$ не делалось, и для теплой воды выбранные по таблицам значения v не будут так точны;

3) от точности определения C_p . Оценка величины удельной теплоемкости, имея достаточную точность на поверхности, становится менее точной с глубиной, так как зависит от α^2 и β — величин ошибочных. Авторы считают эту часть вычисления наименее точной.

Сравнение значений v , полученных в результате экспериментальных работ, с значением V по данным таблиц дают в большинстве случаев большие расхождения, > 2 и даже 4 м/сек. Хорошо сошлись данные летних экспериментов на Goodwin Sands с v табличными ($\Delta v > 1/3$ м/сек.) Таблица сравнений, приведенная К. С. Уховым, показывает эти расхождения (табл. 8).

Рассмотрение построения таблиц дает возможность заключить, что точность выборки v по таблицам лежит в пределах ± 1 —2 м/сек. и что большие расхождения v теор. и v эксп. являются главным образом следствием несоответствия взятых аргументов t , s глубине прохождения звукового луча. Таблица, приведенная по итогам работ Шаловича, подтверждает это.

¹ Publ. de Circ., № 49.

Таблица 8

Значения v по различным данным

Г л у б и н а в м		0	750	1500	2250	3000
$t = 0^\circ$	v М. . .	1460	1467	1472	1477	1489
	v Т. . .	1433	1439	1445	1451	1456
	v В. . .	1427	1439	1450	1458	1463
	v W. B. . .	1447	—	—	—	—
	v Е. . .	1442	—	—	—	—
	v А. . .	1442	1449	1456	1462	1469
v_{cp} . .		1442	1448	1456	1462	1469
$t = +5^\circ$	v О. И. . .	1441	1447	1453,5	—	—
	v М. . .	1477	1483	1488	1494	1500
	v Т. . .	1458	1464	1470	1475	1480
	v В. . .	1450	1461	1470	1479	1487
	v W. B. . .	1467	—	—	—	—
	v Е. . .	1463	—	—	—	—
v_{cp} . .		1463	1470	1476	1483	1490
$t = +15^\circ$	v О. И. . .	1462	1468	1474,5	—	—
	v М. . .	1492	1498	1503	1508	1514
	v Т. . .	1482	1488	1493	1498	1503
	v В. . .	1470	1479	1487	1495	1503
	v W. B. . .	1486	—	—	—	—
	v Е. . .	1481	—	—	—	—
v_{cp} . .		1482	1489	1495	1501	1507
$t = +15^\circ$	v О. И. . .	1480	1486	1492,5	—	—
	v М. . .	1504	1510	1516	1522	1527
	v Т. . .	1505	1510	1515	1519	1523
	v В. . .	1485	1494	1502	1510	1517
	v W. B. . .	1502	—	—	—	—
	v Е. . .	1497	—	—	—	—
v_{cp} . .		1499	1506	1512	1518	1524

Условные обозначения

v М. по данным Marti.
 v Т. " " Tait.
 v В. " " Bjerknes.
 v W. B. по данным Wood и Brown.
 v Е. по данным Ekman.
 v А. по английской таблице.
 v_{cp} — среднее.
 v О. И. — по таблицам Океанографического института.

Таким образом, можно считать, что точность выборки значений для v по таблицам Английского адмиралтейства лежит в пределах $\pm 1-2$ м/сек.

Выборка v из таблиц

Таблицы разбиты на три части. Часть I содержит таблицы для выборки v при промере эхолотом. Часть II дает скорости в морской воде при различных условиях. По таблицам этой части и определяются v при РАСК. В части III объяснены изложенные выше методы построения таблиц.

Таблица 2 дает скорость в м/сек. при атмосферном давлении и $S = 34,86\text{‰}$, что отвечает средней плотности морской воды $\rho = 1,02800$.

Таблица 3 дает поправки к величинам, полученным по таблице 2 за S или ρ для $S > 30\text{‰}$. Скорости для меньших соленостей даны в таблице 6.

Таблица 4 дает поправки для глубин, вычисленных по давлениям, при допущении $\varphi = 45^\circ$, $t = 0^\circ \text{C}$ и $S = 38,85\text{‰}$.

Таблица 5 дает поправки за изменение силы земного притяжения с изменением φ и употребляется в том случае, если входным аргументом в таблице 4 является глубина, а не давление.

Таблицы Neak и Service. Изд. Coast & G. Survey являются наиболее содержательными после английских. При построении таблиц авторы применили формулу Ньютона:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\beta \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{E}{P}},$$

где

$$E = \frac{dp}{\left(\frac{dv_0}{v_0}\right)},$$

принимая dp в барах или 10^6 дин на см^2

$$E = \frac{10^6 \cdot v_0}{dv_0}.$$

Далее, чтобы иметь dv в целых числах, вместо малой дроби, был введен множитель 10^5 , тогда

$$E = \frac{10^{11} \cdot v_0}{10^5 \cdot dv_0}$$

и

$$v = \sqrt{\frac{10^{11} \cdot v_0^2}{10^5 \cdot dv_0}} = 10^5 \cdot v_0 \sqrt{\frac{10}{10^5 \cdot dv_0}} \text{ см/сек.};$$

$$v = 10^3 \cdot v_0 \sqrt{\frac{10}{10^5 \cdot dv_0}} \text{ м/сек.}$$

Выборка физических величин, т. е. v_0 и β , делалась по таблицам Bjerknæs удельных объемов, составленным на основе работ Кнудсена, Экмана и др.

Таблицы менее точны, чем английские. Адиабатическая поправка для v вычислена отдельно, и ее применение авторы считали несущественным, что, как мы видели, для РАСК неправильно.

Таблицы опубликованы в Special Publication, № 108, U. S. Coast & G. S.

При производстве работ по радиоакустике американцы везде употребляют таблицы Английского адмиралтейства и признают их наилучшими.

Таблицы Dr. Schumacher построены по таблицам Bjerknæs для плотности и по формуле Экмана для сжимаемости. При построении д-р Шумахер пренебрег изменением величины удельной теплоемкости и приводит данные при $K=1,001$ для $t=13^\circ$ и при атмосферном давлении. Кроме того, он употребил среднюю сжимаемость вместо истинной сжимаемости

$$\frac{\mu + P \frac{d\mu}{dP}}{1 - P \cdot \mu}$$

Разность равна нулю на поверхности, но увеличивается при больших давлениях.

Таким образом, таблицы эти менее точны, чем даже американские.

Таблицы v , помещенные в океанографических таблицах. При построении применена формула Ньютона для изотермических условий распространения звука

$$v = \sqrt{\frac{v_0}{\mu}},$$

где v_0 — удельный объем, исправленный за P , t и s .

μ — средняя сжимаемость по Экману.

Величины удельных объемов здесь взяты так же, как и во всех предыдущих таблицах, из „Hydrographical Tables“ 1901 г. Кнудсена. Изменение удельных объемов за P , t и s составлены по Bjerknæs и Sandstrom.

Таблица 45 дает v по s и t для поверхностного слоя.

Таблица 46 дает поправку $\Delta v = 0,0086 P$, за изменение от глубины P в децибарах.

Таким образом, океанографические таблицы, как и таблицы Шумахера, пренебрегают изменением величины удельной теплоемкости и разностью между истинной и средней сжимаемостью.

Это ведет к разности в определениях по таблицам Английского адмиралтейства и таблицам Океанографического института.

Действительно, в приведенную таблицу величин скоростей, составленную К. С. Уховым, мы ввели седьмую строчку значений скоростей для каждой t , полученных по таблицам Океанографического института. Значение скоростей обозначено v О. И.

Из таблицы видим, что величины v О. И. повсюду меньше v А. и что разность между ними увеличивается с глубиной.

Это и понятно, так как K растет с увеличением t и P . Разность между ρ и β при увеличении давления возрастает, что также ведет к увеличению v .

Заключение. Из существующих таблиц для определения v наиболее полными и точными являются таблицы Английского адмиралтейства, которые и нужно применять для РАСК. После получения данных о разности опытных v и табличных можно будет таблицы Английского адмиралтейства расширить и улучшить для целей РАСК.

Эмпирические формулы

Нами уже был приведен ряд эмпирических формул для определения v , предложенных некоторыми авторами:

$$\text{Dr Maurer} - v = 1445 + 4,446 t - 0,0615 t^2 + (12 - 0,015 t) (S - 35).$$

$$\text{Wood \& Brown} \begin{cases} v = 1450 + 4,206 t - 0,0366 t^2 + 1,137 (S - 35), \\ v = 1449,64 + 4,206 t - 0,0366 t^2. \end{cases}$$

Претендовать на достаточную для РАСК точность они не могут, так как выведены для некоторых определенных пределов изменения t и S , в которых они и могут считаться достаточно правильными.

Метод Тонта, т. е. метод последовательного нахождения v , близкой к истинному значению, снятием с графика величин d_1 , d_2 и d_3 (см. формулу 2) и вывода

$$v - v' = \frac{d_1}{t_a} = \frac{d_2}{t_b} = \frac{d_3}{t_c}.$$

О точности, с которой можно будет таким способом получить v , до практического испытания говорить трудно. Важно то, что способ дает возможность получать v без непосредственного измерения самой v или измерения t , s и последующего определения v .

Метод Адамса

Математик С. & G. S. д-р Адамс дал способ косвенного определения v , который в основе имеет изложенный в § 2 метод Тонта для определения места судна.

Действительно, имея три опорных гидрофона A , C и B (рис. 21), расстояния между которыми и угол ACB известны, можно аналитически найти точку D пересечения 2 или 3 кругов (Аполлония), отвечающих определенным, соответствующим данной точке, отношениям времен. Найдя место пересечения кругов и имея t_1, t_2 и t_3 , найдем v , считая ее постоянной для всех 3 направлений.

Пусть оси координат, имеющие начало в точке A , направлены по AB и по $AK \perp AB$. Тогда точки будут иметь координаты: $A(0,0)$, $B(C,0)$, $C(b \cdot \cos A, b \cdot \sin A)$ и $D(x, y)$.

Обозначим отношения времен, определяющие круги (Аполлония), через

$$\frac{t_1}{t_2} = m, \frac{t_3}{t_1} = n \text{ и } \frac{t_2}{t_3} = \frac{m}{n}.$$

Тогда, выражая расстояния AD , DC и BD через координаты точек A , B , C и D и принимая их отношения при $v = \text{const}$, мы получим:

для первого независимого отношения

$$\frac{(x-c)^2 + y^2}{x^2 + y^2} = m^2$$

и для второго

$$\frac{(x-b \cos A)^2 + (y+b \sin A)^2}{x^2 + y^2} = n^2,$$

откуда, раскрывая скобки для первого отношения

$$(1-m^2)x^2 + (1-m^2)y^2 - 2cx = -C^2;$$

для второго

$$(1-n^2)x^2 + (1-n^2)y^2 - 2bx \cos A - 2by \sin A = -b^2$$

или

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 - \frac{2c}{1-m^2}x &= -\frac{C^2}{1-m^2} \text{ и } x^2 + y^2 - \frac{2b \cos A}{1-n^2}x + \\ &+ \frac{2b \sin A}{1-n^2}y = \\ &= -\frac{b^2}{1-n^2}. \end{aligned}$$

Окружность Аполлония, отвечающая первому отношению времен, выразится уравнением

$$\left(x - \frac{c}{1-m^2}\right)^2 + y^2 = \frac{c^2 m^2}{(1-m^2)^2}. \quad (42)$$

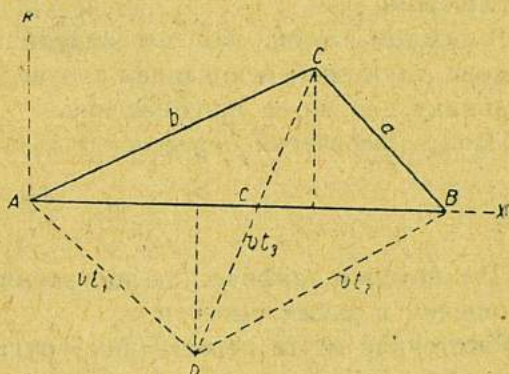


Рис. 21.

Координаты центра окружности $\left(\frac{c}{1-m^2}, 0\right)$ и радиус $\pm \frac{cm}{1-m^2}$.

Аналогично для второго отношения

$$\left(x - \frac{b \cdot \cos A}{1-n^2}\right)^2 + \left(y + \frac{b \cdot \sin A}{1-n^2}\right)^2 = \frac{b^2 n^2}{(1-n^2)^2}. \quad (43)$$

Координаты центра $\left(\frac{b \cdot \cos A}{1-n^2}, \frac{b \cdot \sin A}{1-n^2}\right)$ и радиус $\pm \frac{bn}{1-n^2}$.

Знаки перед радиусами выбираются так, чтобы сделать их положительными.

В каждом случае, как мы видели в § 2, центр будет лежать на стороне, служащей основанием соответствующему позиционному треугольнику или на ее продолжении.

Найдя графически пересечение кругов, мы будем иметь

$$v = \frac{AD}{t_1}.$$

Для проверки графических построений можно взять другие 2 пары отношений и также вывести v .

Расстояние места пересечения кругов Аполлония от начала координат Адамса выражает через следующее равенство:

$$v^2 t_1^2 = -q + \frac{2p(p+rs)}{1+s^2} \pm \frac{2p\sqrt{p^2+2prs-r^2-q-qs^2}}{1+s^2} \quad (44)$$

где

$$\begin{aligned} q &= \frac{c^2}{1 - \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2}; \quad p = \frac{c}{1 - \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2}; \\ r &= \frac{c^2 \left[1 - \left(\frac{t_3}{t_1}\right)^2\right] - b^2 \left[1 - \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2\right]}{2b \left[1 - \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2\right] \sin A}; \\ s &= \frac{c \left[1 - \left(\frac{t_3}{t_1}\right)^2\right]^2}{b \left[1 - \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2\right] \sin A} - \cotg A. \end{aligned}$$

Изложенные методы Тонта и Адамса для косвенного определения v по отношениям времен должны привлечь серьезное внимание в случае употребления РАСК, так как вполне вероятно, что полученное таким путем v будет более точно, чем v , полученное по таблицам. Важно также то, что этими способами мы можем получать v для больших расстояний от опорных гидрофонов и вне зависимости от видимости пунктов.

Практические приемы определения v

Определение v координированием по береговым предметам. Американские гидрографы при работах употребляют скорости звука, главным образом определенные практически, непосредственно в районе работ.

Судно одновременно взрывает за бортом бомбочки и определяется по задаче Потенота.

После внесения необходимых поправок скорость находится как среднее из нескольких таких определений [путем деления их определенного расстояния на соответствующий промежуток времени].

При наличии 2 судов скорость можно определить еще и следующим образом.

Одно судно на якоре служит гидрофонной станцией, второе бросает бомбочки. В момент взрыва первое судно и в момент приема — второе определяются по береговым опорным точкам. Вводятся необходимые поправки. Места наносятся на планшет крупного масштаба (1:10 000), определяется расстояние между судами, соответствующее значение t и отсюда v .

Опыт повторяется многократно.

Среднее v , определенное таким образом, может быть получено с ошибкой не более 1 м/сек.

Употребление проволоки при определении v . При промере банки Георга отдаленность от берега не позволяла применять визуальные методы координирования для определения v , поэтому американские гидрографы употребили для этой цели стальную фортепианную проволоку.

Употребление проволоки для измерения расстояний на воде введено английскими гидрографами, и прибор под названием „Taut wire measuring gear“ описан ими в „Manual of Navig.“, 1928 г.¹

Измерение расстояний проволокой состоит в том, что судно проходит измеряемую линию постоянным курсом и с постоянной скоростью, вытравливая через специальный барабан фортепианную проволоку; запас проволоки на барабане — более 100 миль.

Регистрируя количество вытравленной проволоки между двумя точками, определяют расстояние.

Вводятся поправки на конфигурацию дна.

Американцы применяли этот метод для определения следующим образом. Конец проволоки закреплялся через динамометр на полубаке 1-го судна, сам барабан с проволокой находился на корме 2-го судна. Суда ложились строго на один курс. Второе судно шло впереди.

¹ См. перевод в „Записках по гидрографии“, т. 2, 1934.

За корму 1-го выпускался магнетофон (гидрофон). Головное судно через равные промежутки времени с одного и того же места сбрасывало одинакового размера бомбочки, и при бросании (удар о воду) замечался момент и отсчет на шкале барабана.

Считая, что, во-первых, магнетофон сохранял одинаковое расстояние от кормы заднего судна, во-вторых, разность скоростей 2 судов все время оставалась постоянной, в-третьих, взрыв бомб происходил все время на одной глубине, так что фактор течения сказывался на всех сброшенных бомбах одинаково,—выводилась скорость звука в воде путем определения для каждой бомбы расстояния между местом бросания и магнетофоном и деления этого расстояния на соответствующую t .

Американцы брали до 30 бомб. В некоторых случаях по 30 взрывам получалось $v_{ср}$, которое отличалось от $v_{теор}$ для придонных слоев до $\pm 0,4$ м/сек.

Закключение. Из американского опыта работ с РАСК можно сделать вывод о том, что пока получение v теоретическим путем может быть сопряжено со значительными ошибками, необходимо при всех возможных случаях определять v практически в районе работ и принимать полученное значение при работе. Если гидрологические условия значительно меняются в отдельных участках района, то необходимо выводить v для каждого участка и наблюдать за ходом изменения t и s , внося соответствующие коррективы в v .

(Продолжение следует)

J. SMIRNITSKY

RADIO-ACOUSTIC POSITION FINDING OF SHIPS IN THE TIME OF HYDROGRAPHIC WORK AT SEA

Summary

The large scale of the hydrographic work started by the Hydrographic Department of the Chief Administration of the Northern Sea Route requires the speediest introduction of modern technical means and methods into the practice of hydrographic work. The backwardness of our technical means is felt specially in the most painstaking part of the work—the measurements.

In the present paper the author considers the question of the possibilities which presents the radioacoustic method of position finding of ships at sea during hydrographic work. This method is very successfully employed by the U. S. Coast and Geodetic Survey Dep. of Commerce.

The author endeavoured to set in a consequent harmonious order all the material concerning the radioacoustic method. In the given of the work the papers of various foreign authors on the geometry and physics of the method are analyzed and supplemented. For the deduction of the average exactitude which can be expected for the calculation of the v velocity of sound on the water by this method, the author analyzes the formula $v=f(t, p, s)$. The author comes to the conclusion that it is no easy task to obtain theoretically v with an exactitude of $\pm 1-1,5$ m/sec.

Н. Н. СЫСОЕВ

О ПРИМЕНЕНИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕЧЕНИЙ ПРИВЯЗНЫХ ПОПЛАВКОВ¹

Едва ли есть основания считать, что с внедрением в практику работ достаточного количества вертушек привязные поплавки будут забыты. Собственные движения судна, судовая девиация, искажение течений корпусом корабля, — все это вместе ограничивает применение вертушек и заставляет часто пользоваться поплавками. Кроме того, дешевизна метода и легкое применение его и лицами без особой квалификации служат причинами того, что метод привязных поплавков до настоящего времени практикуется.

Если наряду с широким применением привязных поплавков поставить вопросы: какова же точность этого метода, в каких условиях он может применяться, каковы пределы его применения, и постараться найти эти ответы в существующей литературе,² то при ее малочисленности нетрудно убедиться, что эти вопросы не затрагивались. Отсутствие определенных указаний об условиях и границах применения метода заставляет наблюдателей руководствоваться личными взглядами, что нередко приводит к недоброкачественности материалов и безусловно затрудняет их сравнение.

Необходимость уточнить условия наблюдений привязными поплавками и проработать вопрос о точности измерений ими была причиной исследований в этом направлении Методической партии Морского и Гидрометрического отделов Государственного Гидроло-

¹ Из работ Отдела гидрометеорологии моря Гос. гидролог. инст. См. общее примечание к работам того же автора в вып. VI Сборника „Северный морской путь“.

² Шпиндлер И. Б., Гидрология моря, ч. II; Рождественский А., Некоторые данные о приливоотливных явлениях в горле Белого моря. „Записки по гидрографии“, т. 66.

гического института, некоторые выводы из работ которой и сообщаются ниже.

Для опытных работ, поставленных Гидрологическим институтом на Белом море в 1934 г., в качестве привязных поплавков были взяты поплавки Митчеля, которые из существующих систем такого рода поплавков наиболее часто применяются для наблюдений на морях Союза.

Поплавки Митчеля представляют собой систему двух одинаковых по форме и размерам сосудов. При работе „митчелями“ оба сосуда скрепляются на некотором расстоянии (в зависимости от глубины наблюдений) друг с другом и загружаются так, чтобы только небольшая часть верхнего сосуда находилась над поверхностью воды. Измерение поплавками производится на лине, при этом наблюдается перемещение поплавка, дающее возможность судить об элементах течений, которые в случае измерений в поверхностных горизонтах принимаются равными со скоростью и направлением перемещения поплавка, а при измерении в глубинных горизонтах дают картину совместного действия глубинных (на глубине опускания нижнего сосуда) и поверхностного течений. В последнем случае определение глубинных течений производится вычислением.

Как следует из изложения сущности метода измерений поплавками Митчеля, в его основе лежат некоторые допущения, в частности допущение о тождественности между движением привязных поплавков и течениями, допущение о движении нижнего сосуда на глубине его погружения и допущение о том, что соединяющий сосуда лить не оказывает влияния на результаты измерений.

Выяснить, насколько эти допущения верны, каковы и как велики факторы, искажающие достоверность этих предположений, мы и поставим своей задачей.

Вполне понятно, что влияние обгона — увеличение скорости движения поплавка по сравнению со скоростью течения — здесь, в поплавках Митчеля, даже при наиболее невыгодных условиях (больших размерах поплавков и больших скоростях течений) значения не имеет. Наоборот, влияние сил трения, зависящих от трения литья о блоки и воду, преодоление тяжести литья, значительны и зависят от размера сосудов поплавка, скоростей течения, материала литья, длины вытравленной части его и многих других причин.

Для отдельных случаев порядок общей величины уменьшения скорости поплавка был установлен на основании сравнительных наблюдений, произведенных Методической партией на Белом море. Так, поплавки (с сосудами размером диаметр $(d) = 0,26$ м и высота $(H) = 0,43$ м, выпускаемые на шестимиллиметровом лине) в сравнении

с параллельно выпущенным свободно плывущим поплавком Митчеля, одинаковых размеров с первым, на скоростях течений в 15—20 см/сек., за время 5 минут давали преуменьшение показаний на 2—3 см/сек.

На основе тех же работ, выполненных на Белом море, отмечено, что скорость поплавка замедляется по мере увеличения длины вытравленной части линия и что скорость поплавка, при прочих равных условиях, тем меньше, чем меньше размеры сосудов и чем больше диаметр линия.

Для решения вопроса о степени справедливости допущения движения нижнего сосуда на глубине его погружения рассмотрим следующую задачу о равновесии сосудов поплавка, из которой к тому же следуют и другие важные для нас выводы.

Пусть имеются два сосуда одинаковых размеров, связанные между собою тросом (рис. 1).

Для простоты решения задачи о равновесии системы будем пренебрегать весом и гидродинамическим сопротивлением троса, скрепляющего оба сосуда поплавка.

Это допущение, справедливое для малых глубин погружения нижнего сосуда,¹ позволяет не интересоваться законом изменения скоростей по вертикали и принимать в расчет лишь скорости в слоях погружения сосудов поплавка.

Обозначим: W_1 и W_2 — водоизмещение сосудов, Q_1 и Q_2 — их вес, P_1 и P_2 — их пловучесть. В поплавках, применяемых на практике, $W_2 = 0$ и $P_2 = 0$, v_1 и v_2 — скорости течений в слоях погружения сосудов.

По условию, которому должны удовлетворять оба сосуда, следует:

$$P_1 = W_1 - Q_1 > 0;$$

$$P_2 = W_2 - Q_2 < 0.$$

Откуда пловучесть системы P должна удовлетворять условию:

$$P = P_1 + P_2 > 0.$$

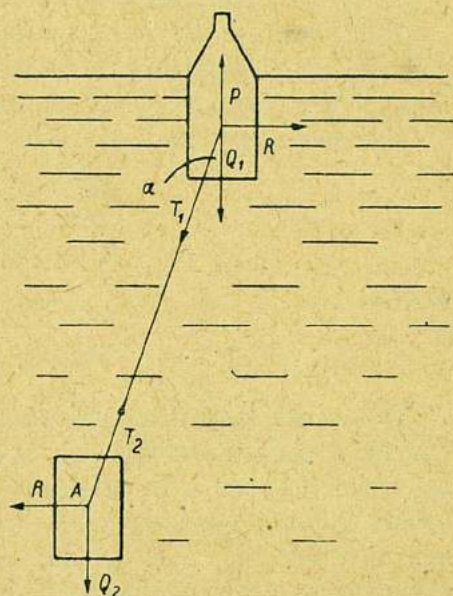


Рис. 1.

¹ Так, например, общая площадь сечения трехмиллиметрового соединительного линия длиной 30 м составляет 60% площади диаметрального сечения каждого из сосудов, что, конечно, не может быть оставлено без внимания.

Нижний сосуд при наблюдениях будет находиться под влиянием сил: Q_2 — веса, T_1 — натяжения нити, идущей от 1-го сосуда, и R — давления на сосуд, которое равно:

$$KF \left(\frac{v_2 - v_1}{2} \right)^2,$$

где K — коэффициент формы сосуда;

F — площадь диаметрального сечения сосуда.

Для составления уравнений равновесия, давление R и вес Q будем считать приложенными в геометрическом центре A , который в данном случае примем совпадающим с точкой привязи.

Уравнения равновесия при всех изложенных условиях будут:

$$\Sigma X = T_2 \sin \alpha - R = 0,$$

$$\Sigma Y = T_2 \cos \alpha - Q_2 = 0,$$

$$\Sigma M_A = 0,$$

откуда

$$T_2 = \sqrt{Q_2^2 + R^2} \text{ и } \operatorname{tg} \alpha = \frac{R}{Q_2}.$$

Таким образом следует, что натяжение зависит от веса нижнего сосуда и сопротивления его течению или, что то же самое, давлению на сосуд. Из тех же уравнений заключаем, что угол наклона линия прямо пропорционален давлению на сосуд и обратно пропорционален весу сосуда, т. е. разница между положением нижнего сосуда и глубиной его погружения будет возрастать при увеличении разности между скоростями поверхностного и глубинного течения с увеличением площади диаметрального сечения сосудов и уменьшением веса нижнего сосуда.

Производя расчет по выведенным формулам применительно к существующим размерам поплавков, можно показать на примерах, как сильно изменяется наклон линия, соединяющего сосуды при различной загрузке поплавка.

Приняв для примера $H = 43$ см, $d = 26$ см, $v_1 - v_2 = 50$ см/сек. и $K = 0,6$, откуда $R \approx 4,2$ кг, можно вычислить, что при загрузке верхнего сосуда, когда $Q_2 = 2,5$ кг, $\alpha \approx 59^\circ$, при загрузке же нижнего сосуда $Q_2 = 20$ кг, $\alpha \approx 12^\circ$. Пользуясь найденными величинами углов, определяем, что расхождение между численными значениями длины линия, соединяющего сосуды поплавка, и глубиной погружения нижнего сосуда для $\alpha = 59^\circ$ равно 48%, а для $\alpha = 12^\circ$ равно всего лишь 2%.

¹ Величина $\left(\frac{v_2 - v_1}{2} \right)^2$ может быть заменена через $(v_2 - v_{cp})^2$, так как при сделанном в начале задачи допущении v_{cp} системы будет равно полусумме v_1 и v_2 .

При рассмотрении метода измерений привязными поплавками, а вместе с тем и поплавками Митчеля должен быть освещен также вопрос о точности измерений.

Величина ошибки определения скорости течения для отдельных случаев может быть установлена на основании ошибок определения пути и времени, если при этом основную формулу для расчета скорости $v = \frac{s}{t}$ продифференцировать по s и t и представить в виде:

$$\Delta v = \frac{\Delta s}{t} \text{ и } \Delta v = \frac{s \Delta t}{t^2}.$$

На основании материалов и расчетов сравнения, проведенных нами, эти ошибки, при условии работы поплавками $H = 43$ см и $d = 26$ см с пеньковым линем $d = 6$ мм на малых скоростях до 8 см/сек., превышают ино-

гда 100%, а при скоростях до 30 см/сек могут достигать 50%. Ошибка в определении направления из тех же опытов в среднем равна $\pm 3^\circ$ и достигает в отдельных случаях $\pm 5 - 6^\circ$.

Еще значительно оказываются ошибки при расчете элементов глубинных течений, когда приходится иметь дело с двумя величинами, определенными с некоторыми ошибками. При этом, как нетрудно показать графически на примере вычитания векторов, ошибки результата по сравнению с ошибками исходных величин во многих случаях значительно возрастают.

Действительно, в результате вычитания векторов a и b (рис. 2), определенных с ошибками $\pm \Delta a$ и $\pm \Delta b$ и направленных под углом α , который в свою очередь также измерен с ошибкой $\pm \Delta \alpha$, могут быть получены сильно разнящиеся между собою по величине и направлению результаты. Так, любые две точки, соединяющие площади (рис. 2), могут быть концами результирующего вектора.¹

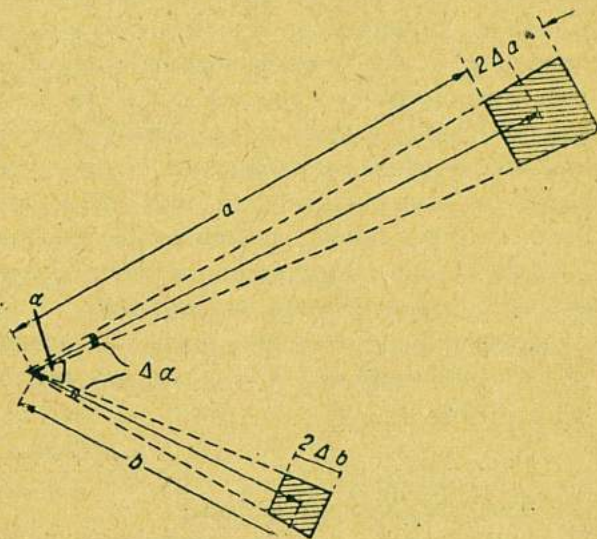


Рис. 2.

¹ Более подробно вопрос о сложении векторов разобран В. В. Тимоновым в его работе об измерении течений методом Нансена (рукопись Отдела гидрометеорологии моря ГГИ, 1933).

Наконец, поставим вопрос об условиях, допускающих применение привязных поплавков.

При рассмотрении влияния ветров на результаты измерения может быть отмечено следующее: при ветрах, дующих в направлениях перпендикулярных пути движения поплавок, пусковой линь поплавок прогибается в направлении ветра, и поплавок движется по равнодействующей ветра и течения. Допущение о том, что поплавок и лень имеют незначительную поверхность, подверженную действию ветра (по сравнению с поверхностью давления воды), справедливо лишь в том случае, если ветер дует по направлению лня или по направлениям близким к нему, тогда действительно давление ветра на лень практически мало. При всех же других случаях направления ветра общее давление на поплавок и лень возрастет с увеличением длины выпущенного лня, вследствие чего траектория движения поплавок имеет вид кривой.

Соотношение влияния ветра и течения на поплавок и его части можно установить на примерах, рассчитывая давление ветра и течения по формуле:

$$R = kpFv^2,$$

где k — коэффициент формы;

p — плотность действующей массы;

F — площадь диаметрального сечения тела;

v — скорость перемещения действующей массы.

Задаваясь точностью определения направления течения в 5° , определим ту скорость ветра, при которой ошибка определения не выйдет из этих пределов. Подсчет при этом будем вести для наиболее невыгодных условий, т. е. незначительных скоростей течения и направления ветра, действующего перпендикулярно лню.

Подставляя в уравнение:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_o}{R} = \frac{k_o p_o F_o v_o^2}{kpFv^2},$$

где R_o — давление ветра,

R — давление воды,

соответствующие значения для ветра и воды¹ и принимая, что действию ветра подвергается лишь одна треть сечения лня, для $\alpha = 5^\circ$ и $V = 8$ см/сек. получаем V_o лежащим между 6 и 7 м/сек.

Это вычисление показывает, что возможность производства наблюдений привязными поплавками указанных выше размеров ограничивается ветрами скоростью 6 м/сек, тем более, что ветер, возбуждая в тонком поверхностном слое воды течения согласного с ним нап्रा-

вления, действует не на треть сечения линя, как это мы приняли выше для расчета, а на все его сечение.

Что касается ограничения наблюдений в периоды волнения, то Методической партией оно установлено из соображений трудности наблюдения поплавками, как в отношении взятия пеленгов поплавков, так и в отношении определения момента окончания наблюдения. Согласно этим указаниям, наблюдения рекомендуется прекращать при волнении в 3—4 балла для крупных судов и 2—3 балла для маломерных.

Подытоживая настоящее исследование и принимая во внимание те цифры и расчеты, которые были получены в Морском отделе ГГИ при проработке вопроса об измерении течений привязными поплавками, могут быть сделаны следующие выводы:

1) Измерение течений привязными поплавками в случае применения их для поверхностных наблюдений при современном уровне методики измерения течений не может считаться устаревшим методом. Применение же поплавков для наблюдения глубинных течений, как было показано в настоящей работе, связано с большими ошибками и не может быть рекомендовано.

2) Устройство привязных поплавков, в частности поплавков Митчеля, как и метод наблюдений ими, просто, точность же метода, главным образом, из-за допущений, положенных в основу, и вследствие наличия здесь визуальных определений, например момента окончания наблюдений, в общем меньше, чем точность измерений вертушкой.

3) В некоторых случаях наблюдений, например при измерении течений с железных судов вертушками с магнитными указателями направления, когда на показания вертушек сильно влияет судовой магнетизм, или при измерении течений с больших судов, когда на приборы, находящиеся вблизи борта, сильно влияет судовой подпор, результаты наблюдений привязными поплавками дают материал более точный, нежели вертушечные определения.

4) Рекомендуется, в целях сравнимости наблюдений, применять поплавки $H=43-45$ см и $d=25-27$ см и в качестве линя употреблять плавающий линь. При отсутствии последнего к линю по всей его длине следует прикреплять поплавки, поддерживающие линь на плаву.

5) Наличие выноса нижнего сосуда к поверхности, гидродинамическое сопротивление троса заставляют ограничить применение поплавков типа Митчеля глубинами в 20 м. При этом для прикрепления нижнего сосуда рекомендуется применять линь не толще 2 мм.

6) При наблюдениях митчелями, в целях уменьшения выноса нижнего сосуда к поверхности, следует загружать нижний сосуд.

7) Наблюдения привязными поплавками размеров, указанных выше, рекомендуется прекращать при ветрах свыше 6 м/сек. и при волнении в 2—4 балла в зависимости от размеров судов.

8) Нижняя граница скоростей течений, которые могут быть измерены привязными поплавками указанных размеров, должна быть принята в 8 см/сек. При применении поплавков на скоростях от 8 до 30 см/сек. нужно считаться с возможностью получения ошибок до 50% от наблюдаемых скоростей.

Ошибка в определении направления поверхностных течений привязными поплавками может быть принята в $\pm 5^\circ$.

П. К. ХМЫЗНИКОВ

О РАЗМЫВЕ БЕРЕГОВ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ

Привезенное в Ленинград работниками якутской гидрографии известие о том, что о. Васильевский в море Лаптевых больше не существует, невольно ставит вопрос о размыве морских берегов. Остановимся сначала на только что приведенном случае.

Разрушение островов Семеновского и Васильевского

Острова Семеновский и Васильевский были открыты в 1815 г. якутом Максимом Ляховым, ехавшим с Баркина Стана (северо-восточная оконечность дельты реки Лены) на о. Котельный и сбившимся с дороги. Остров Васильевский оказался расположенным в 125 милях на север от мыса Борхая и в 44 милях к западу от о. Столбового. Остров Семеновский находится в 12 милях на северо-северо-восток от местонахождения о. Васильевского.

В 1823 г. эти острова были посещены и описаны П. Ф. Анжу, который с медико-хирургом А. Е. Фигуриным (выполнявшим одновременно функции натуралиста экспедиции) прибыл сюда 14 марта при своем следовании на о. Бельковский. По данным Анжу,¹ о. Васильевский имел длину до 4 миль и ширину в $\frac{1}{4}$ мили. Остров Семеновский, по описанию того же исследователя, был вдвое длиннее и вдвое шире.

¹ Опись берегов Ледовитого моря между реками Оленеком и Индигиркой и Северными островами лейтенанта Анжу 1821, 1822 и 1823 годов. „Записка Гидрографического департамента“, ч. VII, СПб., 1849, стр. 191.

10 сентября 1881 г. на о. Семеновском сделала двухдневную остановку американская экспедиция Де-Лонга, шедшая после гибели своего корабля „Жаннеты“ к устью реки Лены на трех шлюпках. В своем дневнике Де-Лонг¹ определил ширину острова в одну восьмую мили и отметил, что остров, видимо, размывается.

В 1912 г. транспорт-ледокол „Вайгач“ гидрографической экспедиции Северного Ледовитого океана 19 августа, идя от о. Столбового на запад, стал на глубине 8,2 м на якорь в расстоянии 2 миль от о. Васильевского. Через 1 $\frac{1}{2}$ суток корабль снялся с якоря, направился к о. Семеновскому и обошел его кругом. Далее судно проследовало к бухте Тикси.² Участником экспедиции К. К. Неупокоевым в составленной им лоции приведены следующие размеры островов: Семеновский, по его данным, не более 2 $\frac{1}{2}$ миль, Васильевский также 2 $\frac{1}{2}$ мили.³

Неупокоев высказывает при этом предположение, что когда-то здесь был один большой остров, что подтверждается наличием обширной отмели на О и NO—SW от о-вов Семеновского и Васильевского.

С 1912 г. до навигации 1936 г. рассматриваемые острова не посещались, хотя, повидимому, некоторые суда их видели издали.

В 1936 г. 3 августа гидрографическое судно „Хронометр“ (под командой И. И. Вологодина), идя от Баркин-стана, подошло к острову, который приняло за остров Васильевский, и приступило к постройке здесь навигационного знака. Последующим астрономическим определением высадившегося на берег астронома Л. Н. Надеева было установлено, что местоположение острова близко к положению о. Семеновского. В дальнейшем „Хронометр“ при отличной видимости сделал ряд галсов для отыскания второго острова. Однако на месте последнего была обнаружена лишь банка с глубиной моря в 3 м.

На о. Семеновском Л. Н. Надеевым была произведена инструментальная съемка (рис. 1), которая дает длину острова в 2 км, ширину 0,5 км и площадь около 0,7 кв. км. Наибольшая высота острова 24,4 м. Берега продолжают сильно разрушаться.

По данным Л. Н. Надеева, равно и по описаниям прежних исследователей, в сложении о. Семеновского, а также и исчезнувшего о. Васильевского принимал участие ископаемый лед, который пере-

¹ Де-Лонг Джордж, Плавание „Жаннеты“. Изд. Главсевморпути, Л. 1936, стр. 289.

² Арбенев Н. В. В Северном Ледовитом океане. СПб. Тип. Морского министерства, 1913.

³ Неупокоев К. К. Материалы по лоции Сибирского моря. Приложение к „Запискам по гидрографии“, вып. X, П., 1922, стр. 32—33.

межался с песчано-глинистыми отложениями, спаянными вечной мерзлотой. По возрасту эти отложения принадлежат к четвертичному периоду, что подтверждается находками экспедиции на „Хронометре“ мамонтовых клыков, черепа овцебыка и костей других четвертичных млекопитающих. Как известно, эти отложения песчано-глинистой толщи с ископаемым льдом широко распространены по побережью моря Лаптевых и на его островах. Ископаемый лед и схваченная

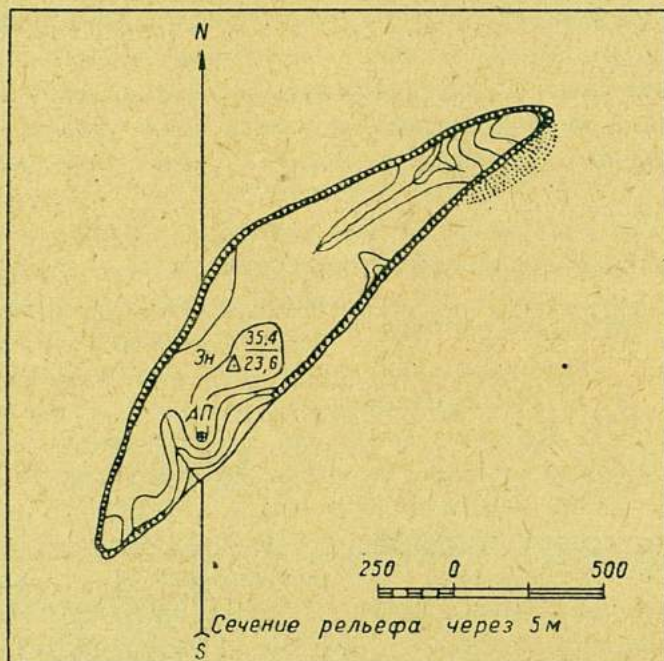


Рис. 1. План о. Семеновского по съемке Л. Н. Надеева.

мерзлотой песчано-глинистая толща представляют собой стойкие к механическим усилиям горные породы. Как известно, удар лома в мерзлую почву отбивает лишь небольшие его куски. С другой стороны, разложенный костер, оттаивающий мерзлую землю, дает возможность без особого труда лопатой выкопать в ней шурф любой глубины. Из сказанного следует, что фактором, наиболее быстро разрушающим охваченную мерзлотой рыхлую породу, является тепло. Однако в условиях Арктики тепловой фактор будет действовать какое-то ограниченное время и до какой-то глубины. Но разрушение породы произойдет наиболее интенсивно, если во время оттаивающего действия теплового фактора будет идти непрерывный унос освобожденного от мерзлоты рыхлого материала. В этом случае все термическое влияние приходящего извне тепла будет направ-

влено непосредственно на оттаивание мерзлоты, а не на нагревание оттаявшей толщи. Таким образом, быстрота разрушения толщи мерзлых рыхлых отложений, сочетающихся с массами ископаемого льда, будет зависеть от взаимодействия термического фактора (приноса тепла) с фактором динамическим (в частности уносом оттаявшего материала).

Сделав эти предпосылки к механизму разрушения толщ, аналогичных тем, которыми сложен о. Семеновский и из коих состоял разрушенный о. Васильевский, обратимся к наблюдениям за убыванием данных островов.

В этом процессе ежегодно разрушался и уносился некий объем пород, слагающих береговую линию каждого из рассматриваемых островов. Имея в виду неравномерный характер разрушения отдельных частей побережья, определить математически последовательное уменьшение их площади (или объема) крайне сложно. Приходится обратиться к более элементарному выражению этих изменений. Так, длина, а равно ширина каждого острова могут быть условно рассматриваемы как уменьшавшиеся пропорционально времени разрушения. Эти подсчеты уменьшения длины и ширины приведены в табл. 1.

Таблица 1

Убывание островов Семеновского и Васильевского
с 1823 г. по 1936 г.

По длине (в метрах)

Остров	Наблюденная длина			Промежуток времени между наблюдениями			Уменьшение длины в год в метрах		
	1823	1912	1936	1823—1912	1912—1936	1823—1936	1823—1912	1912—1936	1823—1936
Семеновский . . .	14816	4630	2000	89	24	113	114	109	113
Васильевский . .	7408	4630	0	89	24	113	31	(193)	(66)

По ширине (в метрах)

Остров	Наблюденная ширина		Промежуток времени между наблюдениями	Уменьшение ширины в год в метрах
	1823	1936		
Семеновский	926	500	113	3,8
Васильевский	463	0	113	4,1

Следует отметить, что упоминаемая в дневнике Де-Лонга ширина о. Семеновского в $\frac{1}{8}$ мили в подсчет не введена, так как она явно ошибочна и меньше ширины этого острова по съемке 1936 г.

При рассматривании таблицы бросается в глаза удивительная равномерность и быстрота уменьшения длины о. Семеновского, в среднем выражающаяся в 113 м в год. Наоборот, о. Васильевский, видимо, размывался сравнительно медленно, его скорость в период с 1823 г. по 1912 г. была всего 31 м в год. Если бы разрушение продолжалось с этой же скоростью и дальше, о. Васильевский оказался бы по длине размытым к 2061 г. Однако, обращаясь к данным по уменьшению ширины, видим, что скорость этого процесса одинакова для обоих островов. Из приведенных материалов ясно, что о. Васильевский разрушился путем уменьшения ширины, т. е. он как-бы сжимался по малой оси эллипса, и отношение длины к ширине у него все время, вероятно, увеличивалось. Иначе говоря, у острова не хватило ширины, несмотря на большую разницу в скорости разрушения по длине и ширине. Он оказался сжатым разрушением и размыт уменьшением ширины, почему в таблице 1 скорость уменьшения длины за период 1912—1936 гг., а равно и средняя за весь период (1823—1936 гг.) поставлены в скобки, как не соответствующие природе описываемого явления. Другой характер этот процесс имеет у о. Семеновского. Отношение длины к ширине у этого острова в 1823 г. было 16, а в 1936 г.—4. Таким образом, здесь вытянутая фигура (вероятно, близкая к треугольнику) стремится (в плоскости) к форме с равными измерениями сторон (т. е. к кругу или квадрату).

Уменьшение длины о. Семеновского, как мы видели, происходит равномерно и, следовательно, с временем оно связано прямолинейной зависимостью. Предположим, что и изменение ширины по времени также выражается прямолинейным графиком.

Уравнения этих прямых будут:

$$\begin{aligned} L + 0,1132 T - 221,64 &= 0, \\ B + 0,0038 T' - 7,87 &= 0, \end{aligned}$$

где L —длина в км, B —ширина в км, T и T' —промежуток времени в годах.

Точка пересечения данных прямых $L_1 = B_1$ и $T_1 = T'_1$ определяет год, когда длина острова станет равной ширине, а также и данную величину в километрах.

В этом случае $T_1 = 1950$, а $L_1 = B_1 = 0,51$.

Таким образом, в 1950 г. длина, равная ширине острова, будет около 510 м. Площадь в это время будет 0,20—0,26 кв. км (в зависимости от того, к какой фигуре,—кругу или квадрату,—она приблизится).

Полагая в приведенном выше уравнении изменения длины $L=0$, получим дату полного разрушения острова. Это будет $T=1954$ г.

Следовательно, если процесс разрушения о. Семеновского пойдет с той же скоростью, с какой он шел последние 113 лет, то, примерно, через 18 лет, — к 1950 г., — его постигнет участь о. Васильевского, т. е. он будет разрушен морем.

В результате исчезновения о. Васильевского, как мы видели выше, в море осталась банка с глубинами над ней в 3 м (а возможно и меньшими, не обнаруженными рекогносцировочным промером „Хронометра“).

Остров Диомид и банка „Литке“

В море Лаптевых известен еще один случай исчезновения островов — именно о-вов Меркурия и Диомид в проливе Дмитрия Лаптева. Данные об этих островах, надо сказать, очень скудны.

В 1739 г. 26 августа участник Большой северной экспедиции Дмитрий Лаптев на дуббель-шлюпке „Иркутск“ следовал от мыса Святой Нос на восток. В 28 милях от упомянутого мыса на NO был усмотрен остров, названный Меркурьевым, а далее, примерно через 16 миль пути, на NNW $\frac{1}{2}$ W в 14 милях был обнаружен еще один остров, получивший название о. Диомид. Врангель¹ полагал, что оба эти острова, видимо, лежали на весьма близком расстоянии друг от друга, так как на карте Лаптева обозначен один остров Диомид. Действительно, если положить на отчетную карту Лаптева данные им расстояния и направления, то оба острова сливаются.

Последним, кто видел о. Диомид, был якутский купец Шалауров, который в 1761 г. 26 сентября прошел между ним и материковым берегом, следуя в направлении к Колыме.

Последующие путешественники и промышленники о. Диомид² не обнаруживали и на картах Геденштрота (1811 г.) и Анжу (1821—1823 г.) он отсутствует.

А. В. Соколов, разбирая³ вопрос об о. Диомид, приходит к заключению, что остров, виденный Лаптевым, не тот остров, о котором упоминает Шалауров, так как последний определил его отстояние от берега примерно в 4 мили (7 верст). Далее Соколов полагает, что Лаптев принял за остров громадную стамуху.

¹ Врангель Ф., Путешествие по северным берегам Сибири и по Ледовитому морю, совершенное в 1820, 1821, 1822 и 1824 гг., ч. 1, СПб, 1841, стр. 75.

² В дальнейшем мы будем так называть оба острова (Диомид и Меркурьев), если разделение их вообще имело место.

³ Соколов А. В., Движение береговой черты Сибирского моря. „Записки по гидрографии“, т. IX, Л., 1930 г.

Однако высказанные возражения против существования о. Диомида нам кажутся недостаточно убедительными. Лаптев шел проливом, видимо, чистой водой и после западного шторма, который в данных условиях должен был разрушить такую огромную стамуху, какую исследователь нанес на свою карту в виде острова. Вообще трудно предположить, чтобы в проливе Лаптева могла какая-либо стамуха сохраниться до последних чисел сентября, да еще в громадных размерах. Работы Лаптева слишком тщательны, а он сам был достаточно опытным исследователем и безусловно не нанес бы на карту остров, в существовании которого не был бы уверен. Что касается расхождения между положением острова, указываемым Лаптевым, и тем расстоянием, которое дает Шалауров, то надо скорее это приписать возможной ошибке при глазомерном определении у последнего. К этому следует добавить, что, конечно, и определение Лаптева было приближенным и неточным.

Наше мнение таково, что о. Диомида существовал, был сложен теми же песчано-глинистыми отложениями с ископаемым льдом, что слагают прилегающие к проливу в этом районе берега материка и о. Большой Ляховский. В конце XVIII столетия остров был, надо полагать, разрушен морем, как это в наше время произошло с о. Васильевским. А если это так, то на месте о. Диомида должна оказаться также какая-то подводная отмель, как реликт бывшей суши.

Когда писал свою работу (в 1928—1929 г.) А. В. Соколов, место острова располагалось по карте ГУ № 985 „в середине пролива Лаптева, где глубины имеют исключительно ровный характер“, как подчеркнул Соколов.

Однако в навигацию 1934 г. ледорез „Литке“, следуя сквозным проходом Северным морским путем с востока на запад, в проливе Дм. Лаптева в широте $73^{\circ}00'$ и долготе $142^{\circ}25'$ открыл банку с глубиной в 7,3 м.

В навигацию 1936 г., видимо, ту же банку „Литке“ обнаружил пароход „Смоленск“, шедший в море Лаптевых из Владивостока. По данным „Смоленска“, эта банка располагается несколько юго-западнее, чем показал „Литке“. Следует отметить, что неточность в счислении возможна у обоих обнаруживших банку судов. Сравним известные нам данные „Литке“ об открытой им банке с данными о положении о. Диомида по Лаптеву (табл. 2).

В дополнение к таблице 2 укажем, что расстояние между устьем Хромской губы и мысом Святой Нос по карте Лаптева составляют 125 миль по направлению 282° , а по карте ГУ № 1378 около 117 миль на 286° . Из этого следует, что единственное более или менее замет-

Таблица 2

Сравнение местоположения о. Диомид по карте Лаптева с положением подводной банки, открытой л/к „Литке“ в 1934 г.

Сравниваемая величина	Остров Диомид по карте Лаптева	Подводная банка с глубиной 73 м по данным л/к „Литке“
Расстояние до материкового берега	17,5 мили	17 миль
Расстояние до мыса Святой Нос	41 миля	32 мили
Азимут с мыса Святой Нос	79°	82°
Расстояние до устья Хромской губы	88 миль	90 миль
Азимут от устья Хромской губы	293°	296°

Примечание. Данные о банке „Литке“ взяты по карте ГУ № 1378.

ное расхождение в расстоянии острова и банки до мыса Святой Нос легко объясняется неточностью счисления Лаптева в самом начале этого участка его плавания. Данная неточность, видимо, и привела к тому, что расстояние Святой Нос—устье Хромской губы у него преувеличено на 8 миль, что как раз составляет величину в расхождениях острова—банки до означенного мыса.

В целом можно сказать, что совпадение в положении избранных объектов полное.

Разрушение Быкова мыса

Четвертичные песчано-глинистые отложения с включением ископаемого льда, которыми были сложены рассмотренные нами о-ва Семеновский, Васильевский и, вероятно, Диомид, как нами ранее отмечено, широко распространены вообще по берегам моря Лаптевых. От северных склонов хребтов северной части Якутии, состоящих из более древних геологических образований, к морю тянется указанная песчано-глинистая толща с большим или меньшим включением ископаемого льда. Эта терраса имеет высоты от 20 до 60 м; местами она тянется почти сплошь, местами от нее сохранились лишь останцы в форме небольших островов или массивов, возвышающихся над террасами более низких уровней. Упомянутая терраса занимает северо-западную часть дельты Лены, затем Быковский полуостров и пространство к востоку от Хараулахских гор вплоть до восточных берегов моря Лаптевых. На южном берегу пролива Дм. Лаптева, о-вах Ляховских, Семеновском и в отдельных частях группы Анжу имеются более или менее значительные площади этой террасы. В целом можно считать,

что в современный геологический момент происходит под влиянием денудировующих факторов разрушение данного геологического образования. Однако, в зависимости от местных физико-географических условий, скорость разрушения весьма различна, как мы это видели на примере разрушения о. Семеновского. Там скорость этого процесса по длине была 113 м в год, а по ширине всего лишь 4 м.

Тем более нам кажется важным накопление непосредственных наблюдений над ходом данного процесса, производимых в различных местах и условиях. В районах, занятых указанной террасой, подробные съемки, из сравнения которых можно было бы выводить степень разрушения, начаты совсем недавно и пока еще не повторены.

Единственным в этом отношении исключением является северная часть Быковского полуострова, заснятая мензульной съемкой в 1912 г.¹

В 1935 г. инструментальная съемка этого района была повторена Якутским отделом Гидрографического управления Главсевморпути.

Для сравнения этих съемок в наших целях может быть избрано направление базиса А. И. Неелова от его южного конца к северному. По планшету Неелова в этом направлении расстояние до уреза воды равно 4747 м (2225 саж.). По планшету съемки 1935 г. расстояние по этому направлению составляет 4610 м, что дает размыв в 137 м за 23 года, или 6 м в год.

Порядок этой величины, видимо, характерен для разрушающихся берегов района Быковского полуострова. Так, за навигацию (за 2 месяца) 1920 г. лежащий невдалеке от Быкова мыса о. Дашка был размыт в северо-западной части на 4,3—6,3 м.² Полагая, что разрушение берегов преимущественно идет в летнее время, а в зимнее оно сравнительно ничтожно, эти величины можно признать близко подходящими к выведенным средним по Быкову мысу. Подобная же величина скорости размыва берегов была нами выявлена в 1928 г. в дельте р. Яны.³ По постепенному обрушиванию стоявшей близ берега юрты за навигационный период была получена величина разрушения берега в 4—6 м, а на взморье, по замеру обрушенных глыб,—в 5 м. Можно высказать предположение, что эти величины, возможно, являются как бы средними скоростями разрушения для данных районов и в данных физико-географических условиях.

¹ Неелов А. И., Отчет по исследованию устья реки Лены, произведенному в 1912 г. „Записки по гидрографии“, т. XXXVIII, вып. 1. СПб., 1914.

² Евгенов Н. И., Экспедиция к устьям рек Лены и Оленека „Труды Комиссии по изучению ЯАССР“, т. III, ч. 1. Акад. наук и Гидрографическое управление, Л., 1929, стр. 35.

³ Хмызников П. К., Гидрология бассейна реки Яны. „Труды СОПС и Гидрографического управления ГУСМП“, серия якутская, вып. 19. Акад. наук, Л., 1934, стр. 47—51.

В отдельных случаях в тех же районах при других условиях размыв может достигать значительно больших величин. Равно и в низовьях Яны, на главном русле, сразу по ответвлении протоки Правой на правом берегу, сложенном песчанистой толщей, в условиях бьющего в нее течения размыв берега с весны до начала августа 1928 г. характеризовался величинами от 10 до 30 м. Понятно, что здесь разрушение берега за год могло достигать глубины 40 м, а то и более.

Характер разрушения берегов

В начале нашей статьи мы указывали, что одним из основных факторов, определяющих разрушение берега, является фактор термический. На мерзлую породу с ископаемым льдом действует тепло воздуха и тепло морской воды. Из этих двух элементов преобладающее влияние имеет тепло воды. Вода по сравнению с воздухом обладает много большей теплоемкостью, а, кроме того, ее температура в этих районах, во всяком случае в поверхностных слоях, превышает температуру воздуха. Отдавая тепло встреченной мерзлой породе, вода в последней, близ своей поверхности, вытравливает нишу (рис. 2). Ниша углубляется до тех пор, пока вышележащая толща породы не обломится и не осядет в воду. Быстрота образования ниши, а также окончательного разрушения оторванной от берега глыбы (рис. 3) зависит также от степени уноса оттаявшего материала, т. е. от динамического фактора, как мы его раньше назвали. Если унос частиц замедлен и большая часть твердого материала разрушения остается на месте, весь процесс размыва замедляется, за исключением влияния на породу тепла воздуха. В этом случае сравнительно более интенсивное таяние идет сверху. Талая вода эродировывает как лед, так и породу, и в результате получают характерные формы „байджарахов“ — холмов песчано-глинистого материала, оставшихся на месте прежней толщи. Если и этот процесс почему-либо замедлится, байджарахи покроются слоём тундры, предохраняющей материал от дальнейшего разрушения.

Естественно, что форма берегов и физико-географические условия имеют огромное влияние на силу действия факторов разрушения и, в первую очередь, на тепловой фактор.

Любопытно упомянуть мнение М. М. Ермолаева, что небольшие размеры отделенных друг от друга таких островов, как Семеновский и Васильевский, вызывают усиленную циркуляцию вдоль берегов теплой воды, независимо от направления волн.¹

¹ Ермолаев М. М., Геологический и геоморфологический очерк острова Большого Ляховского. Полярн. Геофиз. ст. на о. Большой Ляховский „Труды СОПС“, серия якутская, вып. 7, Акад. наук, Л., 1932, стр. 197—198.



Рис. 2. Образование ниши в размываемом берегу мыса Борхая.



Рис. 3. Выход ископаемого льда на мысе Борхая, слева видна обрушившаяся глыба.

Если коснуться вопроса, на какую глубину в море идет влияние теплового фактора, то приходится присоединиться к мнению М. М. Ермолаева, определяющего ее положением нулевой изотермы воды. Для моря Лаптевых это глубина не более 10—12 м, а возможно и меньшая.

Наиболее же деятельным в отношении теплового влияния будет поверхностный слой воды от 0 до 3 м. Неудивительно, поэтому, что на месте о. Васильевского банка имеет глубину этого порядка величин. Последующее углубление путем теплового фактора, надо думать, происходит все более замедляющимися темпами, поскольку с глубиной температура воды падает. Это достаточно характеризуется банкой „Литке“, имеющей глубину около 7 м, как реликт Диомиды, разрушенного около 150 лет тому назад. Следует, однако, оговориться, что в последнем выводе, равно как и в предыдущем изложении, нами не учтено регрессивное движение моря, отмечающееся в разбираемом нами районе.

В нашей статье были рассмотрены лишь случаи разрушения берегов, сложенных песчано-глинистой мерзлой толщей, которая включает ископаемый лед. Это наиболее характерная горная порода для берегов моря Лаптевых. Однако на отдельных небольших участках береговая линия здесь бывает сложена и другими породами, как-то: гранитами, базальтами, кристаллическими сланцами и пр. Эти берега также в известных условиях разрушаются. Однако разрушение их происходит весьма медленно.

В заключение стоит указать, что скорость происходящего разрушения песчано-глинистых берегов оказалась во много раз больше, чем предполагали прежние исследователи. Из этого вытекает, что в условиях широкого развернутого строительства на севере на это явление должно быть обращено большое внимание; его надо тщательно изучать и вырабатывать меры борьбы с ним.

Устанавливаемые по побережью лоцдистанции в данном деле могут оказать огромную помощь точным определением направления и быстроты разрушения, а также выявлением условий, при которых таковое происходит. В первую же очередь следует особенно тщательно изучить о. Семеновский, банку на месте о. Васильевского и банку „Литке“. Это даст новый большой материал к определению процесса разрушения.

P. CHMYZNIKOV

ON THE DESTRUCTION OF THE SHORES OF LAPTEV SEA

Summary

In the navigation season of 1936 the hydrographic ship „Chronometer“ discovered the disappearance of Vassilievsky Island in the Laptev Sea. The observations of 1823, 1912 and 1936 have stated the destroying by the sea of a second island of the same group Semenovskiy Island. The rapidity of the diminishing of the islands Vassilievsky and Semenovskiy is given in table 1. The author concludes that the destruction of Vassilievsky Island resulted of the diminishing of its width, while Semenovskiy Island chiefly diminishes by its length. Toward the year 1950 its length will be equal to its width, while towards 1954 can be expected its total disappearance.

Further on the paper analyzes the question on the disappearance of Diomedes Island in the D. Laptev Strait. In result of the study of this question the author comes to the conclusion that the bank discovered in 1934 by the ice-cutter „F. Litke“ is a remnant of this island.

On the continent the destruction of the shores composed of Quaternary areno-argillaceous deposits with fossil ice proceeds also. A characteristic instance there of is the destruction of the Bykovskiy Peninsula deduced by the author by the comparison of instrumental survey done in 1912 and 1935. In the process of the destruction of the shores of Laptev Sea, composed of the above-named deposits, the influence of the thermal factors of the sea and river-water on the frozen ground is of special importance.

Новый секстан Г. Вильда. Фирма Вильд в Хеербруге (Швейцария), создавшая себе мировую известность своими конструкциями нивелиров и теодолитов, хорошо известных всем гидрографам, только что закончила изготовление нового секстана. Этот маленький инструмент отличается от прежних секстанов в той же мере, как теодолиты Вильда отличаются от всех прежних теодолитов. Наиболее тонкие и неж-

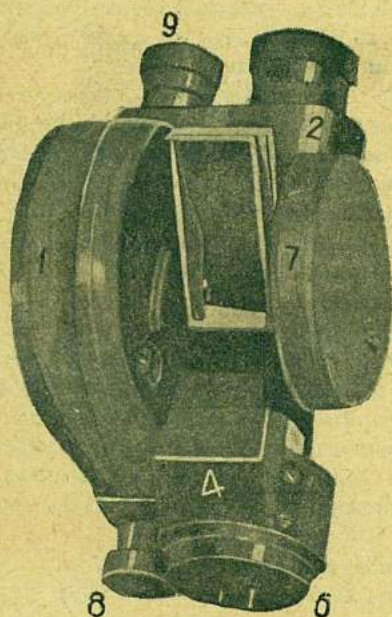


Рис. 1.

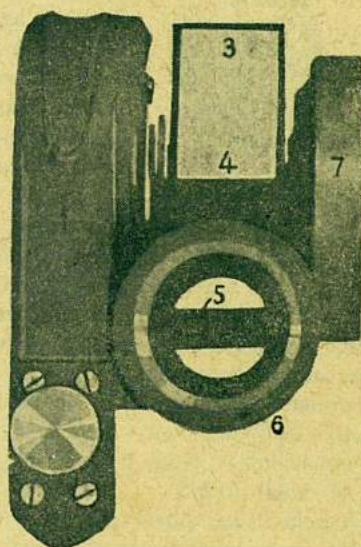


Рис. 2.

ные части инструмента, как, например, круг, отсчетный микрометр и т. д., помещены в специальный корпус. Круг с делениями сделан из стекла, без посеребрения, и отсчеты его производятся при помощи оптического микрометра. Принципы и улучшения конструкции круга позволили значительно уменьшить его размеры; в то же время применение полного круга вместо сектора позволило значительно облегчить центрирование.

Помещаемые в настоящей заметке рисунки дают представление об этом инструменте. Корпус 1 вмещает в себе круг с делениями и оптическую систему для отсчета, из которой на рисунке видны микрометрический винт 8 и окуляр микроскопа 9,

труба 2 неподвижно прикреплена к корпусу секстана. Большое зеркало 3 приводится в движение передаточным винтом, который вращает одновременно и зеркало и разделенный круг, сидящие на одной оси. Обычное малое зеркало заменено двумя призмами 4 и 5, что значительно способствовало уменьшению размеров всего инструмента. В кольце 6 заключаются цветные стекла, которые различными поворотами кольца могут быть поставлены на пути лучей, отраженных от большого зеркала. Труба с шестикратным увеличением очень светосильна; свободное отверстие объектива равно 20 мм. Благодаря системе призм изображение получается п р я м о е. Поле зрения равно $71\frac{1}{2}^\circ$, что значительно облегчает наблюдения. Призма 5 занимает центральную



Рис. 3.

часть объектива; два зрачка выхода, соответствующие двум световым пучкам, расположены один в другом симметрично.

Секстаном можно измерять угол до 145° . Для измерения угла в 145° надо сделать всего четыре оборота винта 7. Благодаря этому можно упразднить микрометрическое движение (1° поворота барабана 7 соответствует изменению отсчета лимба секстана на $6'$), а это значительно упрощает все действия при наблюдениях. Винт 8, приводящий в движение оптический микрометр, укреплен сбоку объектива, то дает возможность легко действовать им левой рукой, не опасаясь задеть при этом барабан винта 7.

Отсчет по кругу так ясен и прост, что исключается возможность каких бы то ни было ошибок. В микроскопе видны одновременно 2 изображения: справа изображение круга с делениями, а слева—микрометрического барабана. На круге нанесены градусные деления; надписаны они через каждые 5 градусов. Отсчеты круга производятся помощью оптического микрометра, как обыкновенно устроено в инструментах Вильда. В поле зрения микроскопа имеется неподвижная пара нитей, и ближайшее градусное деление круга вращением головки винта 8 подводится в середину указанных нитей. При этом перемещении изображения круга он сам, конечно, остается неподвижным; одновременно с этим в поле зрения перемещается изображение самого барабана, принимая во внимание, что барабан соединен неподвижно с пластинкой микрометра. Деления барабана отсчитывают непосредственно по индексу, который пересекает его изображение; деления барабана нанесены через минуту, а градуированное — через каждые 10, это дает возможность отсчитывать минуты (обычного деления) до 0,5.

Секстан может быть снабжен уровнем, видимым в поле зрения трубы.

При конструировании этого нового секстана, хотя и очень компактного и прочного, была, однако, принята во внимание важность облегчения регулировки и возможность простой замены отдельных оптических и механических частей.

Инструмент весит всего 900 г, секстан вполне уравновешен, его очень удобно держать твердо в руках.

Н. Н. Матусевич.

Технич. редактор А. А. Соловейчик.

Сдано в набор 9 июля 1937 г.

Подписано к печати 7 октября 1937 г.

Бумага 70×108 см. Печ. лист. $8\frac{1}{2}$.

Бум. л. $4\frac{1}{4}$.

Авт. л. 10.

95 000 зн. в п. л.

Леноблгортлит № 4042

Тираж 1000 экз.

Издание № 67.

Заказ № 1635.

Типография „Коминтерн“. Ленинград, Красная ул., 1.

Ц. 1987
Акт № 33

3871/3

35-19
104-7

Цена 5 руб.

2022

6

1953

35 - 19

104 - 7