

О ВОЗМОЖНОСТИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ СКОПЛЕНИЙ РЫБ ПО ДАННЫМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Инж. К. И. ЮДАНОВ

О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

В настоящее время гидроакустические приборы позволяют обнаруживать скопления рыб, установить глубину, на которой они находятся, и их протяженность. Однако, чтобы судить о целесообразности облова обнаруженных концентраций рыб, промысловнику важно знать не только размер скопления, но и его плотность.

Чтобы иметь представление о мощности обнаруженной концентрации рыб, промысловое судно вынуждено производить контрольный лов. Этот способ оценки плотности скопления рыб очень трудоемок.

Последнее время многие промысловики пытаются судить о плотности скоплений рыб по интенсивности их записи гидроакустическими приборами. Такая оценка мощности концентраций возможна только в том случае, если сравниваемые скопления рыб находятся на одинаковых глубинах. Невозможность сравнения плотности скоплений, находящихся на разных горизонтах, сильно ограничивает применение этого способа. Кроме того, способ сравнительной оценки позволяет лишь судить о том, где рыбы больше но не отвечает на вопрос, сколько ее в том или ином месте. По записям часто бывает даже трудно отличить отдельных рыб от стай.

Из сказанного ясна необходимость разработки быстрого и надежного способа количественной оценки обнаруженных скоплений.

Определение плотности концентрации рыб необходимо и для исследовательских целей, так как дает более точное представление о запасах рыб в водоеме, позволит детальнее разобраться в вопросах распределения поведения рыб, лучше изучить работу орудий лова и т. д.

Наиболее простым способом количественной оценки регистрируемых скоплений рыб должно явиться определение их плотности по силе отраженных ультразвуковых импульсов. Силу отраженных от рыб импульсов можно регистрировать измерительным прибором, включенным на выходе гидроакустической установки. Однако для того, чтобы измерения характеризовали плотность скопления, нужно учитывать ряд факторов, влияющих на величину эхосигналов. Величина показаний измерительного прибора зависит от мощности излучения, коэффициента усиления, длительности импульсов, отражательных свойств рыбы и т. д.

Чтобы лучше уяснить, как влияют на силу эхосигналов вышеперечисленные параметры гидроакустической установки и среды, остановимся на них более подробно.

Величина чувствительности гидроакустического прибора при постоянстве акустических свойств среды и отражающего объекта зависит от параметров прибора, в частности, от чувствительности передающе-

го и приемного вибраторов; от электрической мощности, подводимой к передающему вибратору; от фактора направленности вибраторов; от коэффициента усиления прибора; от длительности ультразвукового импульса; от частоты ультразвуковых колебаний.

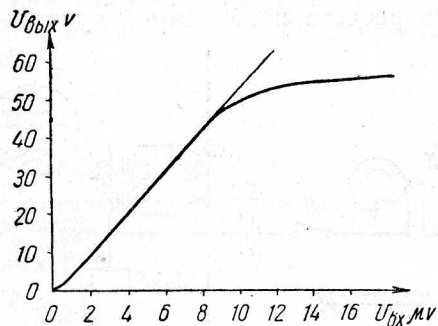


Рис. 1. Характеристика усиления переделанного усилителя НЭЛ-4су.

При нормальной работе установки все перечисленные параметры, за исключением коэффициента усиления, можно считать постоянными. Величина коэффициента усиления зависит от силы сигнала на входе усилителя. Объясняется это криволинейностью амплитудной характеристики усиления.

На рис. 1 показана амплитудная характеристика усиления для эхолота НЭЛ-4су, переделанного для целей

разведки рыбы. Как видно по характеру левой части кривой, напряжение на выходе усилителя вначале пропорционально напряжению на входе его. С возрастанием входного напряжения эта пропорциональность нарушается и, начиная с некоторого предельного значения входного напряжения, невозможно судить о силе входного сигнала по величине напряжения на выходе. При увеличении общей чувствительности гидроакустического прибора величина отражающегося от косяка сигнала, попадающего на вход усилителя, возрастает. Если учесть, что сила принятых отражений от скоплений рыб находится в обратной зависимости от расстояния до этих скоплений, то станет понятно, почему скопления малой плотности в верхних слоях воды регистрируются на ленте самописца эхолота так же ярко, как и косяки большой плотности.

Чтобы напряжение на выходе усилителя характеризовало силу отраженного от рыб сигнала, необходимо с увеличением напряжения на входе усилителя соответственно уменьшать степень усиления. Например, для того чтобы можно было судить о плотности скоплений атлантической сельди, находящихся в толще воды, по интенсивности записи их на ленте самописца, приходится работать на пониженном усилении. Однако при пониженном усилении эхолот может не зарегистрировать рыбу в более глубоких слоях воды, даже если она там есть в большом количестве. Поэтому нужно рекомендовать вести поиск рыбы при максимальном усилении, а при замерах эхосигналов уменьшать усиление до требуемого значения.

Пределы изменения усиления можно значительно сократить, применив автоматическую регулировку коэффициента усиления в зависимости от глубины, т. е. сделать коэффициент усиления минимальным в момент посылки и постепенно увеличивать его с глубиной. Например, в английском эхолоте MS-XII регулировка усиления по глубине достигается следующим образом. В момент, непосредственно предшествующий посылке сигнала, на конденсатор в цепи сетки первой лампы усилителя подается заряд, в результате чего на управляющей сетке лампы оказывается отрицательное напряжение. Затем конденсатор разряжается на сопротивление, включенное параллельно конденсатору, в результате чего отрицательное напряжение на сетке уменьшается, а коэффициент усиления соответственно растет.

На рис. 2 показано нарастание коэффициента усиления в эхолоте MS-XII с автоматической регулировкой во времени, применительно к записи грунта (кривая 1). На том же графике прямая 2 представляет собой средний требуемый коэффициент усиления в зависимости от глубины.

Каков должен быть характер нарастания коэффициента усиления применительно к записи рыбы можно определить только при помощи экспериментальных исследований. Минимальный коэффициент усиления в момент посылки следует подбирать из расчета необходимой чувстви-

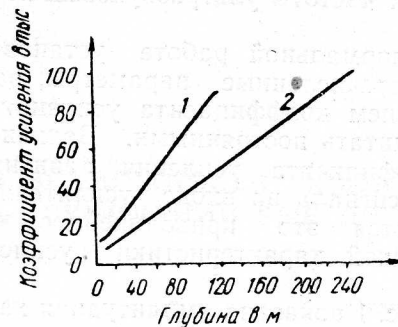


Рис. 2. График нарастания коэффициента усиления в усилителе MS-XII.

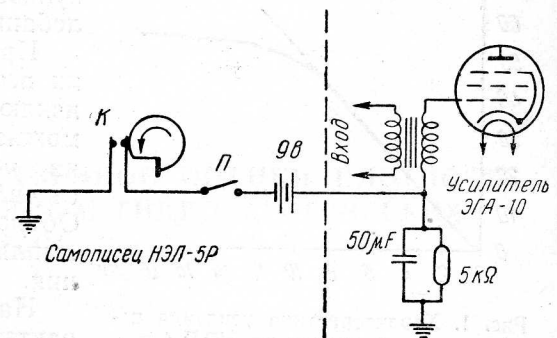


Рис. 3. Схема автоматической регулировки усиления по глубине (АРУГ) для эхолота ЭГА-10.

тельности для регистрации разреженной рыбы вблизи вибраторов путем подачи соответствующего смещения на управляющую сетку первой лампы усилителя. Желательно, чтобы величина и характер нарастания усиления с глубиной соответствовали требованиям регистрации разреженной рыбы вплоть до максимальных глубин, на которых еще возможны промысловые концентрации рыб. Нужный характер нарастания коэффициента усиления по глубине может быть достигнут соответствующим подбором емкости и сопротивления в цепи первой лампы.

Так, в схеме автоматической регулировки усиления по глубине (АРУГ), примененной автором в импортном эхолоте ЭГА-10 с самописцем отечественного эхолота НЭЛ-5р, перечисленные параметры были взяты с учетом условий распределения рыб в Балтийском море (рис. 3). Опробование указанной схемы в море показало, что с применением АРУГ не только упрощается оценка обнаруженных скоплений рыб, но и заглушаются всевозможные помехи.

Для определения плотности скопления рыб по силе отраженных от него сигналов необходимо знать точное значение чувствительности эхолота. Если известен характер нарастания усиления по глубине и коэффициент усиления для каждого фиксированного положения ручного регулятора усиления, то определение степени усиления на нужной глубине, а значит, и определение величины общей чувствительности эхолота при постоянстве всех его параметров не представит затруднений. О чувствительности эхолота можно также судить по результатам показаний измерительного прибора, установленного на выходе установки и регистрирующего силу отражения от стандартного препятствия — эталона. В качестве эталона можно рекомендовать пустотелый стеклянный или металлический шар определенного диаметра. Замеры чувствительности установки необходимо производить в однородной среде и так, чтобы эталон находился точно под вибраторами, на определенном расстоянии от них.

При определении плотности скопления рыб точность замеров зависит от стабильности чувствительности эхолота. При отклонении величины чувствительности от заданной может получиться значительная ошибка в определении плотности замеряемого скопления рыб, находящегося под судном. Во избежание этого, необходимо предусмотреть контроль чувствительности установки. Контроль должен осуществляться таким образом, чтобы можно было следить за правильностью работы всего гидроакустического прибора в целом.

Контроль чувствительности имеет большое значение не только при определении плотности скопления рыб, но и при эксплуатации гидроакустического прибора. В процессе поиска он позволяет своевременно обнаруживать неисправности и устранять их, дает уверенность в правильности показаний гидроакустической установки. Особенно важен контроль чувствительности гидроакустических установок при групповом поиске рыбы. Чувствительность однотипных гидроакустических приборов, применяемых в настоящее время для поиска рыбы, весьма различна, поэтому скопления рыб одинаковой плотности могут регистрироваться каждым прибором по-разному. Введение стандартной чувствительности для однотипных приборов и возможность контроля ее позволит сравнивать показания приборов в разных промысловых районах и водоемах.

ОБ ОТРАЖЕНИЯХ ОТ РЫБ

Рассмотрим, как происходит отражение ультразвуковой энергии, падающей на рыб. Пусть в точке A (рис. 4) помещена приемно-излучающая система. Выпущенная из этой точки серия колебаний длительностью τ займет в пространстве шаровой слой толщиной $c\tau$ (c —скорость звука в воде). По мере распространения ультразвуковых волн в толщу воды перемещается и указанный шаровой слой. Если на пути слоя встречается отдельная рыба, то от нее отражаются колебания начала импульса, затем середины и конца его. Длительность импульса, отраженного от одной рыбы, получается равной $c\tau$. Величина отражения зависит от многих причин, в частности от положения рыбы относительно ультразвукового пучка эхолота. Наибольшее отражение от рыбы получается, когда она находится в центральной части пучка. Чем дальше

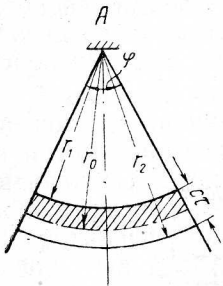


Рис. 4. Рассеивающий элемент пространства.

в стороне находится рыба, тем слабее эхосигнал от нее.

Несколько иначе происходит отражение ультразвукового импульса от косяка, состоящего из множества рыб. В этом случае в рассмотренный шаровой слой (см. рис. 4) попадает несколько штук или десятков рыб, и от всех рыб получаются отражения. Пусть в некоторый момент времени $t/2$ после посылки шаровой слой имеет внутренний радиус $r_1 = \frac{ct}{2}$ и внешний радиус $r_2 = r_1 + c\tau$. Спустя время t после окончания ультразвуковой посылки в точку приема придет суммарное отражение от рыб, находящихся в шаровом сегменте с внутренним радиусом r_1 и внешним радиусом $r_0 = r_1 + \frac{c\tau}{2}$. Следовательно, толщина слоя косяка, от которого отраженные волны приходят в точку приема одновременно, равна $\frac{c\tau}{2}$.

Таким образом, мгновенное отражение от косяка представляет собой суммарное отражение, которое приходит в точку приема от всех рыб, находящихся в слое воды, горизонтальная протяженность которого определяется углом ϕ , характеризующим направленность вибраторов, а вертикальная равна $\frac{c\tau}{2}$. Объем такого слоя называется рассеивающим элементом пространства¹.

Величина мгновенного отражения зависит от того, насколько полно косяк укладывается в объем рассеивающего элемента. Чем меньше размеры косяка по сравнению с размерами рассеивающего элемента, тем

¹ О рассеивающем элементе пространства см. работу Ю. М. Сухаревского [2].

меньшая часть энергии ультразвукового потока (пучка) падает на косяк, а значит, меньше отражение от него. Величина отражения от косяка будет наибольшей в том случае, если размеры облучаемого косяка больше или равны размерам рассеивающего элемента. На рис. 5 дано схематическое изображение рассеивающего элемента пространства и небольшого по размерам косяка применительно к гидроакустическим установкам вертикального и горизонтального действия.

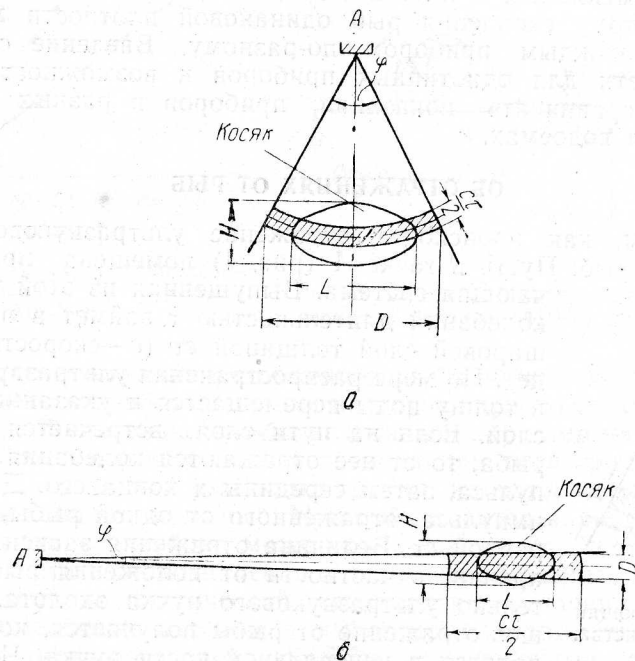


Рис. 5. Соотношения между размерами рассеивающего элемента пространства и косяка:
а—для эхолота; б—для гидролокатора.

Гидроакустическая установка вертикального действия (эхолот) имеет малую длительность посылки τ и широкий ультразвуковой пучок φ , отчего толщина рассеивающего элемента составляет примерно 1—2 м, а диаметр элемента D достигает десятков метров. Поэтому при регистрации мелких косяков можно ожидать неполного использования акустической мощности установки вертикального действия в основном из-за малой по сравнению с диаметром рассеивающего элемента горизонтальной протяженности косяка L . Гидроакустическая установка горизонтального действия (гидролокатор), наоборот, имеет большую длительность посылки и узкий ультразвуковой пучок. Диаметр рассеивающего элемента у такой установки сравнительно мал, а толщина достигает нескольких десятков метров. Поэтому при регистрации мелких косяков неполное использование акустической мощности гидролокатора возможно из-за малой по сравнению с толщиной рассеивающего элемента горизонтальной протяженности косяка.

Степень использования акустической мощности гидроакустической установки, особенно при широкой направленности ее вибраторов (например, в НЭЛ-5р), зависит также от положения косяка относительно оси симметрии ультразвукового пучка. В связи с неравномерностью распределения энергии в ультразвуковом пучке, отражение от косяка будет тем больше, чем он ближе к этой оси.

Влияние размеров косяка и его положения относительно рассеивающего элемента на величину эхосигнала осложняет определение плотно-

сти регистрируемого косяка. Это влияние можно свести на нет путем уменьшения размеров рассеивающего элемента. Таким образом, для того чтобы сила отражения от косяка рыбы не зависела от его размеров, необходимо для определения плотности косяка пользоваться гидроакустическими приборами с узко направленной приемно-излучающей системой и короткими ультразвуковыми посылками.

Как отмечалось выше, мгновенное отражение от косяка рыб есть результат суммирования элементарных отражений от множества рыб, находящихся в рассеивающем элементе. Суммарное отражение зависит от значений элементарных отражений и их количества. Величина элементарного отражения от отдельной рыбы определяется коэффициентом отражения ультразвука от рыбы, т. е. соотношением акустических сопротивлений¹ тела рыбы и окружающей ее воды. Коэффициент отражения от рыбы будет тем больше, чем больше акустическое сопротивление рыбы в сравнении с акустическим сопротивлением воды. Акустическое сопротивление среды (воды, рыбы и т. д.) зависит от ее физических свойств (плотности, сжимаемости). Отдельные части тела рыбы (голова, плавательный пузырь и т. д.) обладают различными физическими свойствами и, следовательно, имеют разные акустические сопротивления. Это осложняет картину отражения ультразвука от рыб.

Возможно, что акустические свойства рыбы зависят от ее биологического состояния — зрелости половых продуктов, упитанности и т. д., а потому могут изменяться в течение года в некоторых пределах. Изменяется в течение года также и величина акустического сопротивления воды, окружающей рыбу. Как меняется соотношение акустических сопротивлений рыбы и воды на разных морях в зависимости от времени года и вида рыбы пока неизвестно. Экспериментальные исследования должны ликвидировать этот пробел².

Размеры рыб соизмеримы с длиной ультразвуковой волны, падающей на рыбу, а потому величина и характер отражения от рыбы не соответствуют законам геометрической оптики. Чем меньше размеры рыбы по сравнению с длиной волны, тем слабее элементарное отражение от рыбы. Поэтому при постоянной длине волны, отражения от мелких рыб будут слабее, чем от крупных рыб того же вида.

При рассмотрении картины отражения от рыб необходимо учитывать явление дифракции. Дифракция ультразвуковых волн, т. е. частичное огибание ими рыбы, проявляется тем сильнее, чем меньше размеры рыб по сравнению с длиной волны. Вследствие преломления и дифракции значительная часть ультразвуковой энергии проникает в толщу косяка, где волны неоднократно отражаются от множества рыб. Таким образом, в точку приема приходят не только прямые отражения от отдельных рыб, но и многократные отражения, причем последние могут быть как от рыб, так и от окружающих пузырьков воздуха, от различных морских организмов и пр. Ультразвуковые волны, отраженные от рыб, встречая на своем пути других рыб, пузырьки воздуха и прочие неоднородности моря, отражаются от них, причем часть этих отражений придет к приемнику непосредственно, а часть — после новых отражений от рыб и неоднородностей. Иногда неоднородности моря накапливаются на границе плотности разных вод, в слое температурного скачка. В таких случаях слой скачка и неоднородности, скопившиеся в нем и встречающиеся на пути ультразвуковой волны к рыбе, являются как бы частичным экраном.

Какова общая картина отражений от скоплений рыб, а также как влияют размеры и плотность рыб, длина ультразвуковой волны, неод-

¹ Акустическим сопротивлением среды называется произведение скорости распространения звука в данной среде на плотность этой среды.

² Попытки в этом направлении были сделаны Е. В. Шишковой [5].

нородности моря на силу отражений, приходящих в точку приема, покажут экспериментальные исследования, которые должны быть проведены в самом ближайшем будущем.

Величина отражений от рыб зависит также от угла падения ультразвуковой волны, т. е. от положения рыб относительно ультразвукового луча. С изменением положения рыб относительно луча меняются углы падения, а значит, и величина приходящих в точку приема отражений от рыб. Отражение от рыбы будет максимальным, если ее тело будет расположено (по длине) перпендикулярно ультразвуковому лучу, и минимальным, если оно будет расположено параллельно лучу. Так как рыбы в воде обычно держатся горизонтально, то при горизонтальном луче направление движения рыб может существенно влиять на величину отражения от них. Поэтому при разведке рыбы с помощью гидролокатора, например на путях миграций сельди в Северной Атлантике, нужно стараться производить поиск перпендикулярно ходу рыбы.

При разведке рыбы с помощью эхолота направление движения рыб не влияет на работу прибора, особенно если вертикальный ультразвуковой пучок достаточно узок и имеет коническую форму. Это качество эхолота особенно важно при определении плотности косяков по силе отражений от них. Кроме того, эхолот позволяет установить глубину нахождения и размеры косяка, что также необходимо при определении плотности косяка и количества рыбы в нем.

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ЭХОСИГНАЛОВ

На регистрирующий прибор, установленный на выходе усилителя гидроакустического прибора, попадают отраженные от косяков рыб импульсы, причем мгновенные амплитуды этих импульсов есть не что иное, как результирующие элементарных отражений от рыб. Результат суммирования отражений от рыб зависит не только от величины и количества элементарных отражений, но и от сдвига фаз между ними. В зависимости от соотношения фаз элементарные отражения, складываясь, усиливают или ослабляют друг друга. Незначительные изменения в распределении рыб относительно вибраторов приводят к существенным изменениям в соотношении фаз между элементарными отражениями. Поэтому мгновенные амплитуды импульсов, отраженных от косяка рыб, могут колебаться в больших пределах и будут иметь случайный характер.

Возникает вопрос: можно ли по величине отраженных импульсов, мгновенные амплитуды которых случайны, судить о плотности обнаруженного косяка рыб?

Как следует из теории вероятностей, случайные явления при некоторых условиях подчиняются определенным закономерностям и могут рассматриваться методами статистического анализа. В нашем случае распределение мгновенных отражений от косяка рыб подчиняется закону нормального распределения вероятностей. Этот закон дает возможность оценить точность измерений, а также ближе подойти к установлению точного значения измеряемой величины.

Для нормального распределения при измерениях, произведенных с одинаковой точностью, наиболее вероятным значением измеряемой величины является среднее арифметическое из результатов, полученных при всех измерениях. В нашем случае определение одной случайной мгновенной амплитуды отраженного от косяка импульса соответствует одному измерению плотности рыб, находящегося в рассеивающем элементе. Если принять плотность косяка равномерной по занимаемому им объему и не учитывать поглощения ультразвука по толщине косяка, то среднее арифметическое всех мгновенных амплитуд

отраженного импульса будет характеризовать плотность косяка. Таким образом, для того чтобы показания регистрирующего прибора характеризовали плотность обнаруженного косяка рыб, прибор должен отмечать средние арифметические значения амплитуд, отраженного от косяка импульса.

Из теории вероятностей следует, что ошибка среднего арифметического для ряда измерений при увеличении числа последних непрерывно уменьшается, но это уменьшение, начиная с некоторого числа измерений, становится очень незначительным. Отсюда следует, что для уменьшения ошибки среднего арифметического нерационально идти по пути чрезмерного увеличения количества мгновенных амплитуд в отраженном от косяка импульсе, т. е. измеряемый импульс может быть коротким.

Однако вряд ли можно получить большую точность в определении плотности косяка по результатам замеров, так как рыбы внутри него распределены неравномерно, вследствие чего их количество на единицу объема воды может значительно изменяться для различных участков косяка. Поэтому нам представляется практически возможным путем усреднения замеров определять только среднюю плотность косяка. Точность в определении средней плотности косяка будет зависеть от количества измеренных отраженных импульсов.

Количество замеров, которое можно сделать, пока косяк регистрируется прибором, зависит от горизонтальной протяженности косяка, скорости хода судна и частоты ультразвуковых посылок. Поэтому плотность косяков малого размера лучше замерять на малом ходу судна. Было бы идеальным, если бы при замерах удавалось учитывать поглощение ультразвука по толщине косяка¹.

На точность определения плотности косяка будет влиять и волнение моря. При качке судна вследствие изменения наклона вибраторов и их положения относительно регистрируемого косяка будут наблюдаться дополнительные флюктуации отраженных импульсов. На величину отражений от косяка влияют также пузырьки воздуха, которые служат препятствием для распространения ультразвука и, попадая под вибраторы, могут вызывать при сильном волнении большие ошибки в измерениях. Поэтому производить замеры при большом волнении моря не рекомендуется.

В настоящее время автором начаты работы по созданию устройств, позволяющих осуществлять в эхолоте плавную фазировку и измерять силу эхосигналов от рыб. Кроме этого создается прибор для контроля чувствительности эхолота.

Чтобы облегчить решение проблемы количественной оценки плотности скоплений рыб, автор предполагает в ближайшее время провести экспериментальные исследования с так называемыми искусственными косяками. Эта работа позволит установить зависимость силы эхосигналов от плотности скоплений, отражательные свойства рыб и т. д.

В результате станет возможным определение количества рыб в обнаруженном скоплении.

¹ Поглощение ультразвука в плотном рыбном скоплении может быть весьма значительно [6].

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гензель Г. С. и Заездный А. М., Основы акустики, М.—Л., 1952.
 2. Сухаревский Ю. М., Теория реверберации моря, обусловленная рассеянием звука, «ДАН СССР», 1947, т. LVIII, № 2.
 3. Сухаревский Ю. М., Реверберация моря при направленном излучении и приеме звука, «ДАН СССР», 1947, т. LVIV, № 5.
 4. Федоров И. И., Навигационные эхолоты, М.—Л., 1948.
 5. Шишкова Е. В., Измерение отражения ультразвука от рыбы, «Рыбное хозяйство», 1955, № 12.
 6. Шишкова Е. В., Затухание ультразвука в рыбных скоплениях, «Рыбное хозяйство», 1956, № 3.
 7. Яковлев К. П., Математическая обработка результатов измерений, М., 1953.
-