



## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОВЕДЕНИЕМ РЫБ

Д-р техн. наук, академик МАНЭБ  
В.И. Кудрявцев – ВНИРО

**Е**ще недавно большинство ученых и исследователей полагали, что рыбы могут воспринимать и реагировать только на низкочастотные акустические колебания. Поэтому практически все экспериментальные работы и исследования по применению акустики для управления поведением рыб выполнялись в звуковом диапазоне частот. В результате накоплена обширная информация о механизмах, органах восприятия звуков рыбами и другими водными животными, о реакциях рыб на звуки и т.д.; демонстрировались возможности привлечения и отпугивания рыб с помощью звуковых сигналов. В то же время по ряду причин, в том числе из-за отсутствия системного комплексного подхода к исследованиям по данной проблеме, еще нельзя говорить о постоянном или регулярном использовании метода управления поведением рыб с помощью акустических колебаний звукового частотного диапазона.

В последнее десятилетие был проведен целый ряд аквариальных, садковых, полигонных и натуральных морских работ, позволивших подтвердить, что ряд видов рыб, особенно стайных, чувствителен к ультразвуку. Первые же экспериментальные исследования в этом направлении были выполнены учеными Московского университета еще в 60-е годы с черноморской хамсой (Лебедев Н.В. и др. *О реакциях черноморской хамсы на акустические раздражители. М. «Биологические науки», 1965, № 2, с. 15–18*). Они изучали реакции хамсы на акустические колебания в диапазоне частот от 1 до 40 кГц в аквариальных условиях и в бассейне площадью 100 м<sup>2</sup>. Характер и степень реагирования оценивались по изменениям двигательной активности рыб с использованием киносъемики. Было установлено, что хамса реагирует не только на звуковые частоты, но и на ультразвук.

Позднее, с расширением применения рыбопоисковых гидролокаторов при траловом и кошельковом лове, операторы сонаров как отечественных, так и зарубежных рыболовных судов нередко сообщали о реагировании косяков рыбы на ультразвуковые зондирующие импульсы указанной аппаратуры. Однако некоторые ученые пытались найти другие объяснения данным сообщениям. Так, С. Версу и В. Водреу (*Physiological and ethological reactions of fish to low frequency noise radiated by sounders and sonars. Int. Symp. on fisheries acoustics, Seattle, USA, 1987. P. 16*) по результатам акустических измерений излучающих трактов некоторых норвежских гидроакустических рыбопоисковых приборов

определили, что акустические антенны, кроме излучения импульсов на основной ультразвуковой частоте, создают весьма интенсивное низкочастотное излучение с высокой направленностью. Ученые пришли к выводу, что рыбы в данном случае реагируют на паразитные низкочастотные составляющие зондирующих импульсов рыбопоисковой аппаратуры.

В конце 80-х годов В.Н. Шабалиным (*Shabalin V.N. The sensitivity of fishes to the high frequency hydroacoustic and electromagnetic fields. ICES. C.M. Copenhagen, 1991*) были проведены аквариальные исследования восприятия рыбами ультразвуковых колебаний с исключением возможного влияния паразитных низкочастотных акустических, а также электромагнитных полей. Он управлял поведением карпа с помощью высокочастотных акустических сигналов, заставляя рыбу проходить в одно, два или три небольших кольца при использовании лишь тональных колебаний. В частности, было определено, что карп реагирует на частоты до 125 кГц. Пороговые уровни вплоть до 80 кГц были менее 0,1 Па.

В 1992 г. ЦНИИ «Гидроприбор» совместно с ВНИРО начал разработку ультразвукового акустического концентратора рыбы АКР-500 для рыбопромысловых судов тралового лова (Тимин Б.Н., Кудрявцев В.И. *Трал для лова рыбы. Патент РФ № 2007077, 1992*). Он выполнен в виде (рис. 1) автономного устройства с электропитанием за счет энергии движения трала от встроенного гидрогенератора и буксируется за траловым мешком. После отдачи трала

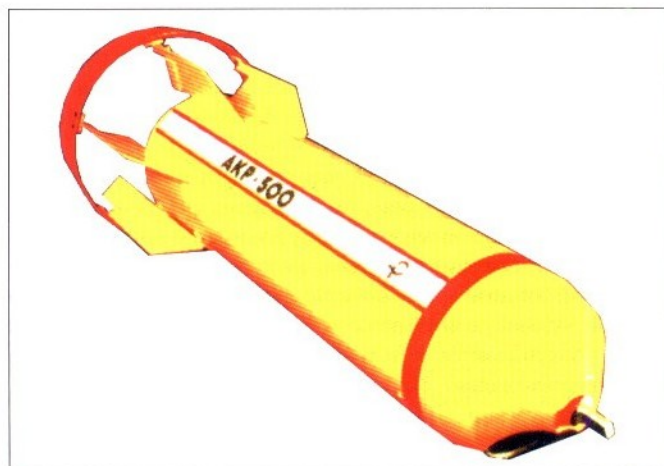


Рис. 1. Внешний вид АКР

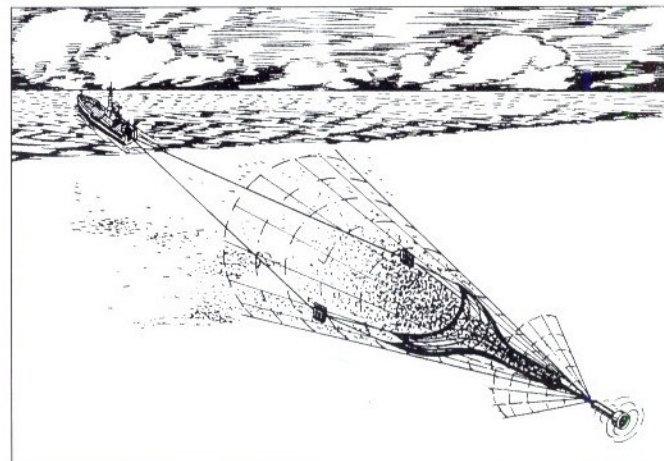


Рис. 2. Акустическое поле АКР

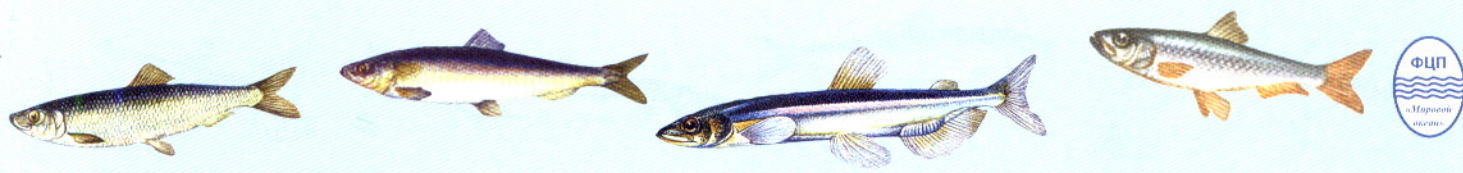


Таблица 1

Таблица 2

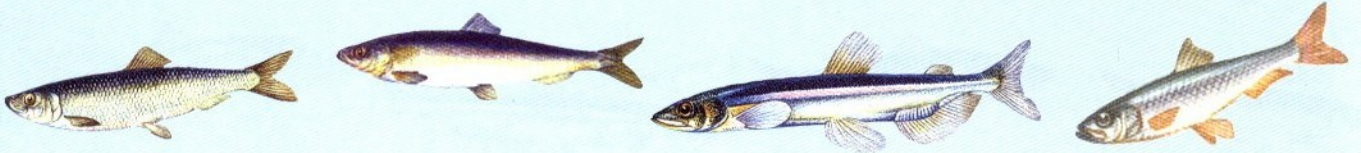
Дата	Начало траления (ч, мин)	Продолжительность траления (ч, мин)	Улов, +с АКР – без АКР (т)	Дата	Начало траления (ч, мин)	Продолжительность траления (мин)	Улов, + с АКР, – без АКР (т)
26-27.05	22-35	5,00	4,2 –	4.09	15-45	210.00	5,0 –
28-29.05	Ночь	4,30	4,0 –	4.09	21-45	325.00	13,0 –
1-2.06	23-50	3,30	3,8 +	5.09	04-00	360.00	5,0 –
2.06	14-50	3,00	3,0 –	5.09	11-05	295.00	5,0 –
2-3.06	22-50	5,00	6,0 +	5.09	16-30	135.00	15,0 +
3.06	19-30	3,00	4,0 –	5.09	20-00	240.00	7,0 –
4.06	00-10	4,30	8,0 +	6.09	00-50	275.00	5,0 –
4.06	17-40	4,00	12,0 +	6.09	06-20	340.00	6,0 –
5.06	10-50	2,30	7,8 +	6.09	12-50	210.00	17,0 +
5.06	16-45	3,00	5,0 –	7.09	06-30	140.00	10,0 –
6.06	00-00	2,30	4,0 +	7.09	10-10	350.00	15,0 +
6.06	17-40	3,10	3,9 –	7.09	17-20	275.00	15,0 –
7.06	01-15	3,00	4,5 –	7.09	22-45	290.00	45,0 +
7.06	08-00	3,15	3,5 –	8.09	05-10	380.0	20,0 –
7.06	14-30	3,30	3,6 –	8.09	12-25	310.00	5,0 +
7.06	20-00	3,00	5,0 +	8.09	18-30	190.00	3,0 –
8.06	19-10	3,10	4,5 –	8.09	23-45	245.00	30,0 –
10.06	00-30	5,00	12,0 +	9.09	05-00	300.00	17,0 –
13.10	10-00	4,00	4,5 –	9.09	17-00	260.00	7,0 –
14.10	10-00	5,00	7,8 +	9.09	23-10	280.00	1,5 –
14.10	16-30	3,30	2,0 –	10.09	10-40	330.00	15,0 –
19.10	10-00	3,50	4,0 +	10.09	17-00	265.00	9,0 –
19.10	15-20	2,30	1,3 –	10.09	22-15	315.00	11,0 +
20.10	09-20	5,00	5,0 –	11.09	04-25	315.00	10,0 –
20.10	15-30	4,10	5,2 +	11.09	10-45	300.00	3,0 –
21.10	08-30	5,30	2,0 –	11.09	17-00	145.00	2,0 –
25.10	10-10	4,00	2,0 –	11.09	22-00	420.00	45,0 +
25.10	19-00	5,20	1,0 –	12.09	06-40	110.00	0,5 –
26.10	08-30	5,00	5,2 –	12.09	14-15	195.00	6,0 –
26.10	15-00	4,20	2,6 +	12.09	18-30	290.00	22,0 +
				13.09	00-00	240.00	14,0 –
				13.09	04-50	305.00	15,0 +
				13.09	13-10	195.00	1,0 –
				14.09	00-00	240.00	11,0 –
				14.09	04-50	210.00	3,0 –
				14.09	09-50	295.00	3,0 –
				14.09	15-30	480.00	10,0 –
				15.09	00-15	335.00	6,0 +
				15.09	08-00	480.00	16,0 +
				15.09	17-00	280.00	6,0 +
				15.09	22-25	425.00	12,0 +

АКР формирует циклическое дискретное высокочастотное акустическое поле с несущей частотой 30 или 90 кГц, охватывающее внешнюю поверхность рыболовного трала в направлении от тралового мешка к судну. Акустическое поле вращается вокруг (снаружи) трала со скоростью 1 оборот за 2 с (рис. 2). В каждом цикле работы АКР излучает серию импульсов различной длительности для уменьшения возможной адаптации рыб.

Основное преимущество высокочастотных акустических колебаний заключается, во-первых, в возможности более простой реализации направленного излучения, что важно при траловом лове. Во-вторых, высокочастотное излучение в отношении как энергетического, так и информационного воздействия может вызывать лишь отрицательную реакцию (отпугивание), которая является более устойчивой и стабильной по сравнению с привлекающей при меняющихся характеристиках окружающей среды и физиологическом состоянии рыб. В АКР предусмотрена возможность отключения излучения в направлении к поверхности воды, дну или в обоих направлениях для исключения влияния отражений от поверхности

и дна на создаваемое акустическое поле. При нахождении в воде он имеет положительную плавучесть.

В первой половине 90-х годов садковые, аквариальные и натурные экспериментальные исследования в ультразвуковой области выполнялись американскими исследователями и исследователями других стран. Основные работы были связаны с решением проблемы предотвращения попадания сельдевых рыб в гидротехнические сооружения. Установлено, что интенсивные высокочастотные акустические импульсы могут отпугивать сельдевых: *Alosa pseudoharengus* (использовались частоты 100 и 125 кГц при уровне источника 195 дБ относительно 1 мкПа, приведенном к расстоянию 1 м), *Alosa aestivalis* (110 и 140 кГц при уровне источника, превышающем 180 дБ относительно 1 мкПа / 1 м), *Alosa sapidissima* – 122–128 кГц при уровне 180 дБ (Nestler J.M. et al. Responses of blueback herring to high-frequency sound and implications for reducing entrainment at hydropower dams. North Amer. Journal of Fish Management, 1992, 12: 667–683; Dunning et al. Alewives avoid high-frequency sound. N.American J. of Fish Management, 1992, 12: 407–



416; Ross Q.E. et al. Response of alewives to high-frequency sound at a power plant intake on Lake Ontario. *N.American J. of Fish Management*, 1993, 13: 291–303; Ross Q. E. et al. Reducing impingement of alewives with high-frequency sound at a power plant intake on Lake Ontario. *N.American J. of Fish Management*, 1996, 16: 548–559; Con Edison, 1994).

В 1994 г. были проведены две серии испытаний опытного образца АКР на близнецовом траловом лове салаки в Балтийском море; в сентябре 1996 г. – АКР-1000 на траловом лове ставриды и скумбрии в Норвежском море и в 1999 г. – демонстрационные испытания на траловом лове салаки в Балтийском море на научно-исследовательском рыболовном судне Argos Института морских исследований (Швеция). В первом случае лов производился с двух малотоннажных судов типа ТБ, во втором – крупнотоннажным траулерам типа «Меридиан», работавшим одинаковыми тралами по схеме «дубль». Концентрации рыбы были разреженными и траления, соответственно, – продолжительными. При работах в Норвежском море рыба находилась в поверхностном слое и траления проводились с перемещением верхней подборы – тралового щитка – по поверхности воды. Такая ситуация позволяет получать более объективные результаты при сравнительных испытаниях работы трала с концентратором и без него благодаря практическому исключению случайных больших уловов. Результаты сравнительных тралений 1994 г. приведены в табл. 1, 1996 г. – в табл. 2.

Статистическая обработка результатов выполнялась согласно методологии сравнительных испытаний тралов (Сергеев Ю.С. *К методике сравнительных промысловых испытаний тралов. Сб. НТИ ВНИРО, 1968. Вып. 2. С. 39–50*). При таких испытаниях сравнение проводится или по среднесуточной производительности, или по средним уловам за час траления. В первом случае задействованы два судна, так как при использовании одного судна достичь убедительных результатов невозможно. Однако даже при использовании двух однотипных судов в связи с большой продолжительностью таких испытаний существенное влияние на достоверность оценки могут оказывать возможные изменения характера скоплений и их поведения, хотя и снижается влияние случайностей, связанных с работой судов.

В нашей ситуации при использовании одних и тех же тралов, одной и той же пары судов и одного судна (во втором случае) практически исключается влияние случайностей, связанных с работой рыболовной, траловой системы и команды. Разреженные концентрации рыбы в период испытаний и, соответственно, значительная продолжительность большинства тралений также позволяют говорить о малой вероятности влияния случайностей, обусловленных характером и поведением облавливаемых скоплений. Учитывая изложенное выше, считаем более корректным подход к оценке эффективности АКР по средним уловам за час траления.

Средние уловы за час траления с АКР,  $P_{cp1}$ , и без АКР,  $P_{cp2}$ , определялись как

$$P_{cp1} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} P_i}{\sum_{i=1}^{n_1} t_i}, \quad P_{cp2} = \frac{\sum_{j=1}^{n_2} P_j}{\sum_{j=1}^{n_2} t_j},$$

где  $P_i$  – улов за  $i$ -траление,  $t_i$  – время  $i$ -траления с АКР,  $P_j$  – улов за  $j$ -траление,  $t_j$  – время  $j$ -траления без АКР,  $n_1, n_2$  – количество тралений (соответственно с АКР и без АКР).

Для оценки репрезентативности результатов определялись их среднее колебание или вариабельность средних уловов за час траления  $\sigma_1$  (с АКР) и  $\sigma_2$  (без АКР), или среднеквадратичные отклонения с использованием следующих выражений:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} (P_i - P_{cp1})^2}{n_1 - 1}},$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_2} (P_j - P_{cp2})^2}{n_2 - 1}}.$$

Средние стандартные ошибки репрезентативности испытаний –  $\sigma_{cp1}$ ,  $\sigma_{cp2}$  – определялись как

$$\sigma_{cp1} = \sigma_1 / \sqrt{n_1}, \quad \sigma_{cp2} = \sigma_2 / \sqrt{n_2}.$$

Средняя стандартная ошибка репрезентативности разности среднечасовых уловов с АКР и без него определялась как

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{cp1}^2 + \sigma_{cp2}^2}.$$

Тогда истинная разность среднечасовых уловов с концентратором и без него выражается как

$$(P_{cp1} - P_{cp2})_{ист} \cong (P_{cp1} - P_{cp2}) \pm \delta \sigma_p, \text{ или}$$

$$(P_{cp1} - P_{cp2}) - \delta \sigma_p < (P_{cp1} - P_{cp2})_{ист} < (P_{cp1} - P_{cp2}) + \delta \sigma_p,$$

где  $\delta$  – коэффициент доверия. При  $\delta \cong 1$  доверительная вероятность  $p \cong 0,68$ , когда  $\delta \cong 2$ ,  $p \cong 0,95$ .

Используя указанные выражения и данные табл. 1, получаем следующие результаты. Истинная разность среднечасовых уловов с АКР и без него для первой серии испытаний (июнь 1994 г.)  $\cong 0,79 \pm 0,273$  т/ч при  $p \cong 0,68$  и  $0,79 \pm 0,34$  т/ч или в интервале на 42:94 % больше за счет применения АКР\* при вполне статистически значимой для таких испытаний достоверности (доверительной вероятности)  $p \cong 0,8$  и  $0,79 \pm 0,546$  т/ч при  $p \cong 0,95$ . То же самое для двух объединенных серий (июнь и октябрь 1994 г.)  $\cong 0,66 \pm 0,2$  т/ч при  $p \cong 0,68$  и  $0,66 \pm 0,25$  т/ч или в интервале на 41:91 % больше с АКР\* с достоверностью  $p \cong 0,8$  и  $0,66 \pm 0,4$  т/ч при  $p \cong 0,95$ .

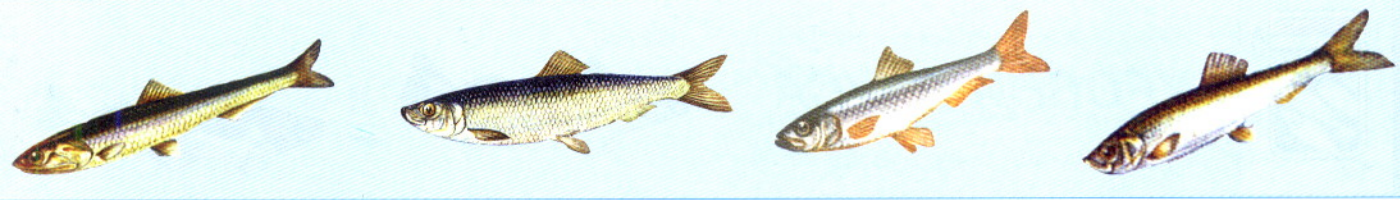
Две серии объединены для статистической обработки, так как характеристики скоплений были практически одинаковыми (в октябре – более разреженные).

Истинная разность среднечасовых уловов с АКР и без него для испытаний в Норвежском море, соответственно, будет выражаться как  $\cong 1,25 \pm 0,75$  т/ч при  $p \cong 0,68$ ;  $1,25 \pm 0,93$  т/ч или в интервале на 16:91 % больше с АКР\* с достоверностью  $p \cong 0,8$ ;  $1,25 \pm 1,06$  т/ч с  $p \cong 0,85$  и  $\cong 1,25 \pm 1,21$  т/ч при  $p \cong 0,89$ .

Статистическая обработка последних данных (см. табл. 2) с использованием программы «Statistika for Windows» также показала, что из различных факторов (длительность траления, время суток, АКР) только влияние концентратора было существенным (с вероятностью  $p = 0,94$ ). Таким образом, результаты промысловых испытаний и оценки эффективности АКР можно считать вполне достоверными и они также подтверждают, что ультразвук может влиять на поведение некоторых видов рыб. При промысловых и демонстрационных испытаниях в Балтийском море о влиянии АКР на поведение салаки также можно было судить по изменениям показаний рыбы на отображающих устройствах траловых зондов.

Следует остановиться еще на ряде работ, связанных с использованием ультразвука. S.D. Kraus и др. (*Acoustic alarms reduce porpoise mortality. Nature (London), 1997. 388: 525*) отмечали, что ультразвуковые сигналы, создаваемые гидроакустическими излучающими устройствами, устанавливаемыми на больших рыболовных орудиях для отпугивания дельфинов, также отпугивали и сельдевых. K. Kumagai и др. (*Hydroacoustic evaluation of american shad behaviour to an acoustic deterrent in the priest rapids dam fish ladder. Report HTI, Seattle, 1999. P. 16*) использовали ультразвуковые ко-

\* Последнее определяется как  $((P_{cp1} - P_{cp2}) \pm \delta \sigma_p) / P_{cp2} \times 100$



лебания со «скользящей» частотой 115–125 кГц для селективного отпугивания американского шеда при проходе лососевых через рыбоход дамбы в бассейне р. Колумбия. J. Astrup и B. Mohl вначале (*Detection of intense ultrasound by the cod. J. Exp. Biol., 1993. 182: 71–80*) пришли к выводу, что треска *Gadus Morhua* реагирует на импульсы 38 кГц рыбопоисковых эхолотов. Затем ее реакция на указанную частоту, хотя и с низкой чувствительностью (194 дБ относительно 1 мкПа), была ими подтверждена при поведенческих экспериментах (*Astrup J. u Mohl B. Discrimination between high and low repetition rates of ultrasonic pulses by the cod. J. Fish. Biol., 1998. 52: 205–208*).

Для того чтобы исключить сомнения по поводу возможного влияния на поведение рыб низкочастотных акустических составляющих при излучении ультразвуковых импульсов, D.A. Mann и др. (*Ultrasound detection by a teleost fish. Nature (London), 1997. 389: 341; Mann D.A. et al. Detection of ultrasonic tones and simulated dolphin echolocation clicks by a teleost fish, the American shad. J. Acoust. Soc. Am., 1998. 104 (1): 562–568*) провели тщательные аквариальные поведенческие эксперименты с воздействием на американского шеда чистыми тонами при максимальном исключении влияния других физических стимулов. При этом они использовали классическую методологию регистрации изменения сердечной деятельности рыб и их мускульной энергии. В результате было установлено, что американский шед (*Alosa sapidissima*) реагирует на частоты, по меньшей мере, до 180 кГц, начиная с низких – 0,2 кГц. Были определены и пороги восприятия – порядка 20 Па в диапазоне 25–100 кГц и существенно более низкие – 0,2–0,8 кГц.

Подтверждения, полученные в последнее время относительно влияния высокочастотных акустических колебаний на поведение рыб, поставили как перед учеными-гидроакустикими, так и ихтиологами ряд вопросов, без ответа на которые сложно говорить о возможности широкого практического применения соответствующих устройств в рыбохозяйственных целях. Это, к примеру, оптимальные частоты реагирования, пороговые уровни откликов для различных видов рыб, дистанции реакции и др. Необходимо уделить больше внимания исследованиям привыкемости рыб к воздействию ультразвука, повторяемости и стабильности их реагирования. Как рыбы реагируют на ультразвуковые колебания на различных стадиях жизненного цикла? Наиболее важным остается вопрос о том, каким образом рыбы обнаруживают высокочастотное акустическое воздействие.

Необходимо ответить и на вопрос, что помогает рыбам воспринимать ультразвук. Наиболее состоятельным представляется предположение, что эта способность выработалась у рыб в результате длительного взаимодействия с зубатыми китообразными, такими, как дельфины, и др., которые при охоте за рыбой используют высокочастотное излучение. Указанная гипотеза уже получила определенное подтверждение при поведенческих экспериментальных исследованиях (*Mann u др., 1998*). Было определено, что американский шед может также обнаруживать и реагировать на имитированные последовательности эхолокационных «щелчков» бутылконосых дельфинов (они состояли из восьми импульсов длительностью 50 мкс с интервалами между ними 50 мкс). Пороговый уровень восприятия, определенный по междупиковым величинам «щелчков», составил  $171 \pm 2$  дБ/1 мкПа.

Параллельно целесообразно продолжать работы по развитию устройств для практического использования в рыбном хозяйстве и промышленном рыболовстве применительно к объектам лова, по которым уже имеется обещающая информация. В частности, это

относится и к АКР. Накопление информации при его использовании на траловом промысле разных объектов лова в различных условиях позволит ответить и на вышеперечисленные вопросы. При сравнительной оценке работы АКР необходимо, однако, учитывать, что на его эффективность могут оказывать влияние характер распределения и поведение рыб. В основном это относится к ситуациям лова объектов, сконцентрированных в косяках и отдельных стаях, особенно подвижных, когда существует вероятность случайных больших уловов. Ее снижению будет способствовать техническое совершенствование концентратора, а именно: обеспечение возможности его дистанционного включения после выхода судна и трала на курс траления.

Целесообразно также иметь в аппаратуре набор случайно меняющихся в циклах излучения программ сигналов для уменьшения «привыкания» объектов лова к акустическому воздействию. Было бы полезно разработать двухлучный вариант АКР, устанавливаемый на траловых досках и имеющий «ножевую» характеристику направленности: узкую в горизонтальной плоскости и широкую – в вертикальной. Блоки могут иметь существенно меньшую мощность излучения и массо-габаритные характеристики, а также не оказывать даже косвенного влияния на селективность трала. Конечной целью развития тралового АКР можно считать создание акустической системы управления поведением облавливаемых концентраций после их обнаружения, начиная с зоны впереди тралера и до захода рыбы в трал (рис. 3).

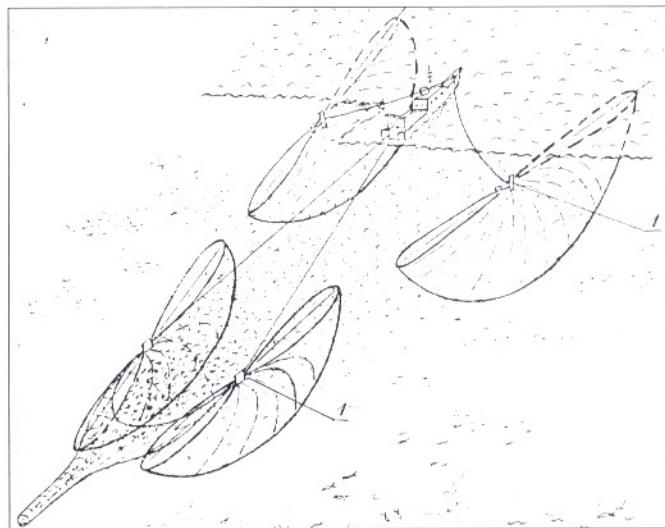


Рис. 3. Акустический траловый концентрирующий комплекс: 1 – акустические излучатели

**Kudryavtsev V.I.**  
**Concerning application of high-frequency acoustic fields to control fish behaviour**

During the last 15 years a number of studies have been conducted that have confirmed some opinions concerning an influence of ultrasound on fish behaviour. Our experimental researches discussed in the paper have also shown that in any case some fish species can sense and react on high-frequency acoustic fields. Results of processing of trawlings data with and without our trawl acoustic concentrator were quite statistically significant. However as a result of all these investigations we have got many additional questions which have not yet been researched by both acoustics and biologists. Some perspectives of acoustic trawl concentrator development are discussed.