

Раздел I. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ И ТАКТИКИ ЛОВА

597—15:639.2.081.1

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ ЛОВА

В. Н. Мельников

Астрыбвтуз

Одним из основных путей повышения эффективности рыболовства является совершенствование способов управления поведением рыбы в процессе лова. Процесс управления в общем случае можно представить как упорядочение некоторой материальной системы. Исходя из этого общего представления, различные авторы характеризуют управление с учетом качественных и количественных отличий систем и процессов, которые в них протекают. В нашем случае под управлением объектом лова будем понимать такое воздействие на поведение рыбы путем сообщения ей управляющей информации или уменьшения вредного влияния неуправляющей информации, при котором повышается эффективность промысла. Это определение достаточно конкретно и в то же время выражает основные идеи, заложенные в управлении как общенаучной категории.

Необходимо подчеркнуть, что управление объектом лова мы связываем с передачей ему управляющей информации, вкладывая в понятие «информация» весьма широкий смысл. С другой стороны, целью управления является сообщение объекту лова некоторого поведения из возможного набора поведений. Концепция выбора поведения объекта лова адекватна основным положениям теории информации. Оба эти фактора позволяют рассматривать управление поведением рыбы в поле ощущений орудий лова и средств интенсификации промысла как информационный процесс, хотя, как будет показано ниже, возможны не только информационные, но и энергетические взаимодействия объекта лова с внешней средой.

Мы попытаемся рассмотреть некоторые теоретические вопросы управления поведением рыб в процессе лова с привлечением таких понятий, как система, информация, управление, которые относятся к важным общенаучным категориям и некоторых идей теории автоматического управления.

Постановку рассматриваемой проблемы в таком виде, по-видимому, нельзя считать преждевременной, хотя необходимо учитывать трудности, связанные с недостаточной изученностью многих вопросов, на которые теория управления объектом лова должна опираться.

МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ РЫБЫ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ОРУДИЙ ЛОВА И СРЕДСТВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОМЫСЛА

Поведение рыбы является совокупностью реакций на внешние раздражения и внутренние стимулы. Рассматривая вопросы управления поведением рыбы в зоне ощущений орудий лова и средств интенсификации промысла, целесообразно принимать во внимание лишь двигательные реакции и те вегетативные реакции, которые влияют на усиление, развиваемое рыбой, и ее ориентацию в пространстве.

Перемещение рыбы в пространстве полностью определено, если известны уравнения ее движения. Они позволяют определить латентный период, направление и скорость перемещения в различные моменты времени, длительность перемещения. При отсутствии гидродинамического поля параметры движения рыбы могут служить оценкой двигательной реакции рыбы. При действии на рыбу различных полей в совокупности с гидродинамическим перемещение ее обусловлено как двигательной реакцией на воздействие соответствующего физического поля, так и движением потока воды. В этом случае двигательную реакцию в первом приближении характеризуют величины не в абсолютном, а в относительном движении. Приближенность обусловлена тем, что гидродинамическое тело само по себе искажает характер двигательного ответа на другие раздражители и, кроме того, изменяет условия, в которых происходит перемещение рыбы. Таким образом, при оценке двигательной реакции на любой раздражитель или их совокупность необходимо учитывать характеристику гидродинамического поля.

Поведение рыбы под влиянием внешних воздействий характеризуется некоторой неопределенностью, и его невозможно точно предсказать, поэтому при изучении и описании поведения рыб в зоне ощущений орудия лова в общем случае следует обращаться не к детерминированным, а к вероятностно-статистическим соотношениям. Полной статистической характеристикой поведения рыбы в этом случае является совокупность многомерных функций распределения или плотностей вероятностей мгновенных значений параметров, характеризующих перемещение рыбы.

Описание поведения рыбы с помощью этих функций весьма сложно. В то же время для решения задач управления поведением рыбы в зоне действия орудий лова наиболее пригодна оценка ее поведения с помощью статистических моделей, которые довольно широко применяются в других отраслях науки.

Рассмотрим в общих чертах модель поведения рыбы, принимая во внимание лишь двигательные реакции. Пусть необходимо знать поведение n рыб, причем для каждой из них в данный момент времени определяется k элементов поведения. Тогда поведение совокупности рыб в некоторый момент времени можно описать множеством из T значений

$$T = nk. \quad (1)$$

Будем считать T мгновенной реализацией поведения рыбы, которая выражается точкой в T -мерном пространстве. Координатами этого пространства являются определяемые элементы поведения рыбы. Каждый из k элементов поведения изменяется в некотором диапазоне значений, которые можно разбить на дискретные уровни. Число дискретных уровней определяет точность и надежность определения поведения. Фиксированный диапазон изменения каждого из элементов поведения

(признаков) принято называть классом. Учитывая характер поставленной задачи, признаками классов в некоторый момент времени можно считать направление и скорость перемещения рыбы. Направление перемещения характеризуют двумя признаками в сферических координатах (долготой φ и полярным расстоянием Θ) и тремя — в декартовой системе координат, которые можно выразить косинусами углов, образованных заданным направлением движения с положительными направлениями координатных осей.

Скорость перемещения алгебраически характеризуют одним признаком. Диапазон возможных направлений и скоростей перемещения зависит от степени ограниченности пространства, в котором такое перемещение возможно, усилия, развиваемого рыбой, и т. д. Каждый из указанных признаков может принимать бесчисленное множество значений. Разбивая диапазон изменения отдельных признаков на ряд участков, получим интервалы, которые определяют классы направлений и скоростей перемещения.

Каждый признак можно представить в виде координатной оси, поэтому при использовании, например, сферической системы координат получим трехмерное пространство, ограниченное пределами изменения признаков. Если это пространство разбить на интервалы, соответствующие интервалам классов, то каждый интервал на графике будет соответствовать определенному классу. Каждая точка внутри этого пространства представляет отдельную реализацию рассматриваемого элемента поведения и может быть представлена в виде некоторого вектора в пространстве реализаций.

Поведение рыбы в общем случае не является стационарным процессом, поэтому однократное создание модели поведения рыбы соответствует лишь определенному промежутку времени, внутри которого признаки и их реализации либо остаются неизменными, либо изменяются незначительно. Таким образом, интервал времени, в течение которого рассматривается поведение рыб, необходимо разбить на ряд периодов и для каждого периода построить модель поведения.

Совокупность отдельных реализаций поведения, полученных для p различных промежутков времени, можно назвать реализацией поведения. Реализация поведения рыбы может быть представлена точкой в S -мерном пространстве, где

$$S = pT. \quad (2)$$

При построении модели поведения рыбы выбор диапазона изменения отдельных признаков обычно не вызывает затруднений. Значительно сложнее рационально разбить эти диапазоны на интервалы, определяющие классы направлений и скоростей. Увеличение числа интервалов повышает точность оценки поведения, но одновременно требует увеличения количества исходных данных для такой оценки, поэтому диапазон изменения признаков следует разбивать лишь на такое количество интервалов, которое достаточно для практического решения задачи. Например, при исследовании поведения рыбы у крыла ставного невода в простейшем случае важно установить, куда пойдет рыба — вправо или влево вдоль крыла или отвернет от него. В этом случае диапазон возможных направлений перемещения достаточно разбить на три интервала, а диапазон возможных скоростей перемещения не разбивать на интервалы совершенно. При исследовании поведения рыбы в зоне действия трала необходима большая точность в оценке направления и скорости перемещения рыбы. В зависимости от положения

рыбы относительно орудия лова, вида и конструкции трала и т. д. диапазон возможных направлений перемещения следует разбивать на четыре—восемь участков, обычно неодинаковых по величине. Диапазон возможных скоростей перемещения в этом случае достаточно делить на два-три интервала.

Продолжительность периодов, для которых строится модель поведения рыбы, зависит в основном от скорости изменения параметров движения рыбы, значимости изменения положения рыбы относительно орудия лова и других источников физического поля. Если принимать во внимание только первый фактор, то эта продолжительность должна быть соразмерима с периодом, в течение которого поведение рыбы соответствует одному классу. Влияние второго фактора сказывается только тогда, когда при изменении положения рыбы в зоне действия орудия лова изменяется необходимая точность оценки параметров ее перемещения и это служит основанием для уменьшения продолжительности периода.

ВИДЫ И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ ЛОВА

Важным вопросом теории управления объектом лова является классификация видов и способов управления. От характера решения этой задачи в значительной степени зависит направление дальнейших исследований в этой области. Будем классифицировать управление объектом лова по способу передачи и биологической эффективности информации, способу управления и, наконец, по принципу действия систем управления. Очевидно, возможна классификация управления объектом лова и по другим признакам, например, по биологической значимости раздражителя, характеру реакции на раздражитель (положительная, отрицательная, нейтральная) и т. д.

По способу передачи информации будем различать контактное и неконтактное управление. Контактное управление осуществляется при непосредственном соприкосновении объекта лова с элементами орудия лова. Неконтактное управление связано с действием на рыбу физических полей, образованных орудиями лова и средствами интенсификации промысла. Физические поля могут быть источником или средством передачи информации.

При неконтактном управлении следует различать управление в зависимости от физической природы управляющего поля (управление с помощью световых, электрических, акустических и других видов полей) и от биологической эффективности действия поля.

По последнему признаку следует различать управление, основанное на принципе энергетического взаимодействия, когда биологические эффекты пропорциональны интенсивности воздействующих полей, и управление, основанное на принципе собственно информационного взаимодействия, при котором биологические эффекты, обусловленные этими взаимодействиями, зависят не от величины энергии, а от количества информации, воспринимаемой рыбой.

При энергетическом взаимодействии происходит преобразование энергии физического поля в другие ее формы. Однако информационную сторону взаимодействия физических полей с объектом лова довольно часто необходимо учитывать при анализе таких явно энергетических воздействий, как тепловые, электрические и т. д. Особенно полезен информационный подход к действию физических полей малой интенсивности, когда энергетические эффекты становятся невозможными.

Управление объектом лова должно способствовать попаданию рыбы в зону действия орудия лова и уменьшению вероятности ухода из нее. Это может быть достигнуто различными способами. Соответственно будем различать следующие основные способы управления:

путем использования направляющих функций элементов орудий лова как механических преград и физических полей;

с использованием задерживающих функций элементов орудий лова как механических преград и физических полей;

путем существенного изменения двигательной активности рыб;
по принципу наименьшего воздействия орудий лова на объект промысла;

путем уменьшения вредного влияния на рыбу различных неуправляющих воздействий (кроме вредных воздействий орудий лова);

путем дезориентации рыбы.

Управление в процессе лова может одновременно или последовательно осуществляться различными способами. Рассмотрим некоторые особенности указанных способов управления.

Управление с использованием направляющих свойств орудий лова и средств интенсификации промысла можно осуществлять при свободном и полностью или частично принудительном перемещении рыбы.

При свободном перемещении рыба определяет направление в физическом поле, используя неравномерность углового распределения ощущений в отдельных точках поля, изменение интенсивности поля в пространстве (следование «по градиенту» или по линиям равных ощущений), разницу в интенсивности действия поля на нервные окончания, расположенные в различных точках тела рыбы, которая обусловлена не характером углового распределения ощущений, а одновременным действием на рыбу нескольких физических полей.

При перемещении физического поля или изменении его интенсивности рыба может направленно перемещаться вслед за стимулом или от него.

Полностью или частично принудительное перемещение рыбы можно осуществить с помощью подвижных, а иногда и неподвижных элементов орудий лова как механических преград, гидродинамических и электрических полей постоянного тока.

Управление с использованием задерживающих свойств элементов орудий лова как механической преграды не требует пояснений. Если в этой роли выступают физические поля, то следует различать два случая управляющего воздействия. Первый из них, наиболее распространенный, наблюдается при отрицательной реакции рыбы на поле, когда она не проходит обычно дальше его зоны обнаружения; второй — характерен для рыб с положительной реакцией, когда рыба заходит в зону действия поля и задерживается в ней. В обоих случаях физическое поле может выполнять роль заграждения лишь при определенных количественных и качественных его показателях.

Существенное изменение двигательной активности рыбы, как метод управления поведением рыб, осуществимо в основном с помощью физических полей. В принципе этот способ можно реализовать и механическим путем (например, путем создания стесненных условий с помощью элементов орудий лова или плотной концентрации рыбы). Большее значение имеет снижение двигательной активности. Оно достигается обычно при безусловном действии некоторых физических полей определенной интенсивности и качественного состава (электрических,

тепловых, плотности массы). Повышение двигательной активности рыб возможно как при условном так и безусловном действии практически всех видов физических полей.

Управление по принципу наименьшего воздействия орудий лова на объект промысла преследует цель сохранения до определенного времени естественного поведения рыбы. Его можно осуществить путем уменьшения интенсивности физического поля орудия лова, сигналы которого вредно влияют на поведение рыбы, использованием вспомогательных источников полей, уменьшающих вероятность отрицательного влияния или обнаружения рыбой физических полей орудия лова, изменением функций рецепторов и свойств поля управления.

К вредным неуправляющим воздействиям относится обширная группа воздействий, мешающих выполнению задач управления. Такую роль играют в большинстве случаев воздействия акустического поля судов и промышленных механизмов, естественного светового поля при лове рыбы с применением искусственного света, различные биосигналы, увеличивающие защитные свойства скопления в зоне действия орудий лова, и многие другие. Уменьшить или полностью уничтожить влияние вредных воздействий на рыбу можно теми же способами, которые применимы для управления по принципу наименьшего воздействия.

Дезориентация рыбы связана с таким воздействием физических полей на нее, в результате которого она принимает неверное решение, приводящее к увеличению вероятности ее поимки. Дезориентировать рыбу можно применением механических систем или физических полей, затрудняющих выбор направления для выхода рыбы из зоны ощущений орудий лова или заставляющих ее перемещаться в ложном направлении; использованием физических полей, отвлекающих рыбу от опасности в виде орудия лова; применением нескольких видов физических полей, оказывающих на рыбу различное действие и ставящих перед рыбой проблему выбора, и т. д.

По виду систем управления будем различать управление с помощью незамкнутых и замкнутых систем, которые можно классифицировать так же, как это принято в теории автоматического управления. Краткая характеристика систем управления в соответствии с этой классификацией будет дана ниже.

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ ЛОВА

Система управления объектом лова, как и всякая система управления, состоит из трех основных элементов: объекта управления (объекта лова), поля управления (внешней среды) и управляющей системы, которая включает, в частности, орудие лова и средства интенсификации промысла.

Под объектом управления следует понимать совокупность рыб, которые подвергаются управляющему действию со стороны орудия лова и физических средств интенсификации промысла. Не останавливаясь здесь на внутренних процессах, протекающих в объектах управления, рассмотрим, какие внешние воздействия на рыбу необходимо учитывать при анализе работы систем управления.

В теории автоматического регулирования все внешние воздействия на объект управления принято подразделять на контролируемые $A=f(a_1; a_2; \dots; a_n)$ и неконтролируемые $C=f(c_1; c_2; \dots; c_n)$. Контролируемые и неконтролируемые величины, по которым ведется управление, называются управляющими $B=f(b_1; b_2; \dots; b_n)$.

Особенность управления объектом лова состоит в том, что в процессе лова не измеряют величин, которые непосредственно определяют внешние воздействия на рыбу. В лучшем случае контролируют параметры некоторых источников внешних воздействий (главным образом орудий лова и средств интенсификации промысла). По-видимому, в дальнейшем контроль за величиной даже основных внешних воздействий производиться не будет из-за технических трудностей. В то же время контроль за параметрами источников внешних воздействий, а также параметрами физических полей в некоторых их точках будет развиваться. Будем считать внешние воздействия контролируемыми, если контроль осуществляется хотя бы одним из двух указанных способов. Контроль за внешними воздействиями всегда связан с необходимостью решения технических задач различной степени сложности и материальными затратами, поэтому его следует осуществлять лишь тогда, когда это способствует совершенствованию функций системы управления.

К управляющим будем относить только контролируемые и неконтролируемые внешние воздействия, источниками которых являются орудия лова и средства интенсификации промысла и которые способствуют выполнению задач управления объектом лова. Элементы орудий лова и средства интенсификации промысла обычно оказывают управляющее воздействие только в некоторой части зоны их действия. Все неуправляющие внешние воздействия орудий лова и средств интенсификации промысла, а также внешние воздействия других источников будем относить к неуправляющим контролируемым или неконтролируемым внешним воздействиям, независимо от того, способствуют или препятствуют они успешному лову рыбы.

По известным начальным условиям и внешним воздействиям A , B и C с учетом протекания процессов внутри самого объекта можно в принципе найти выходные управляемые величины $X = f(x_1; x_2; \dots; x_n)$, к которым мы относим направление и скорость перемещения рыбы. Однако из-за сложности и недостаточной изученности внутренних процессов в объекте лова преждевременно ставить вопрос о составлении уравнений, связывающих все рассматриваемые величины. Хотя достаточно правильное описание реакции объекта лова как биологической системы на внешние воздействия возможно лишь при использовании сложных математических моделей, весьма полезными могут оказаться попытки моделирования с помощью сравнительно простого математического описания. Как указывает Дж. Милсум, основная особенность биологических систем управления состоит в том, что несмотря на многоканальность линий связи и использование статистического метода передачи информации, что препятствует детальному исследованию систем, они выполняют довольно простые функции. Это подтверждает возможность моделирования путем применения сравнительно несложного математического аппарата. По существу, в некоторых случаях при действии на рыбу гидродинамических, световых, электрических и тепловых полей приближенное моделирование можно выполнить уже сейчас.

Поле управления в нашем случае удобно рассматривать, с одной стороны, как источник внешних контролируемых и неконтролируемых воздействий (шумов), с другой, как канал, по которому происходит передача внешних воздействий от различных источников к объекту лова.

Шумы источников поля управления могут играть роль помех или полезных с точки зрения управления сигналов. Помехи ухудшают усло-

вия приема управляющих воздействий, изменяют размеры, форму и структуру зоны управляющего действия орудий лова и средств интенсификации промысла в сторону, противоположную той, которая необходима для успешного управления. Полезные шумы, наоборот, улучшают свойства зоны ощущений. Помехи и полезные шумы могут влиять на объект лова не только «смешиваясь» с сигналами, но и оказывать «самостоятельное» информационное воздействие. С точки зрения результатов лова, такое воздействие может иметь различные последствия, как положительные, так и отрицательные.

Поле управления как канал передачи внешних воздействий к объекту лова (канал связи при информационном воздействии) характеризуется в общем случае условиями распространения физических полей, стабильностью передачи внешних воздействий, достоверностью передаваемой информации, пропускной способностью.

Условия распространения физических полей влияют на количественную, а иногда и качественную сторону внешних воздействий на объект лова и характеризуются в основном интенсивностью ослабления и характером изменения качественного состава физических полей при удалении от источника поля. Они зависят от таких свойств водной среды, как прозрачность, электропроводность, вязкость, теплопроводность и т. д., а в ограниченном водном пространстве — от граничных условий на поверхностях раздела¹.

Стабильность передачи внешних воздействий зависит в основном от степени изменения гидрологических условий, распределения рыбы в водоеме, а также от характера влияния этих изменений на характеристику физических полей.

Достоверность передаваемой информации в связи с передачей ее по каналу связи зависит от уровня помех и степени изменения параметров сигнала в поле управления.

Пропускная способность физических полей, служащих для передачи информации, определяет то количество информации, которую способен передать канал связи в единицу времени. С точки зрения информационной емкости будем различать волновые поля (акустические, электромагнитные), которые позволяют передавать сигналы с различной амплитудой и частотой, и статические (все другие виды полей), в которых информация отличается лишь амплитудой. Естественно, что пропускная способность волновых полей значительно больше, чем статических, и они несут обычно больший объем информации.

Управляющая система может состоять из ряда элементов, выполняющих различные функции. В общем случае такая система включает исполнительное устройство (орудия лова и средства интенсификации промысла); измерительные устройства, предназначенные для получения данных об интенсивности действия физических полей на рыбу и о положении и параметрах перемещения объекта лова в рассматриваемый момент времени; устройства сравнения, в которых данные о действительном положении и параметрах перемещения объекта лова сравниваются с величиной уставки, задаваемой с помощью особого устройства и характеризующей требуемые в данный момент времени положение и параметры движения рыбы; усилитель, который подает результаты рассогласования на исполнительное устройство с тем, чтобы оно изменило свои параметры, ориентацию или характер перемещения и попыталось воздействовать на объект лова так, чтобы уменьшить рас-

¹ Источник внешних воздействий может быть расположен вне воды и тогда необходимо учитывать свойства воздушной среды.

согласование. Естественно, что отдельные элементы управляющей системы могут отсутствовать, и в простейшем случае она состоит только из исполнительного устройства.

Систему управления объектом лова, как и любые системы управления, можно изобразить в виде функциональных и структурных схем. На функциональной схеме каждому элементу системы соответствует определенное звено, она позволяет проследить путь управляющего воздействия от одного элемента системы к другому. В структурной системе каждое звено соответствует определенной математической операции преобразования внешнего воздействия. В зависимости от полноты математического описания и особенностей математических моделей различных звеньев для одной и той же системы управления можно составить различные структурные схемы. Функциональные схемы некоторых систем управления объектом лова будут приведены ниже при описании этих систем.

ВИДЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ ЛОВА

Как уже отмечалось, управление объектом лова можно осуществить с помощью систем управления, работающих на различном принципе. Схемы таких систем мало чем отличаются от тех, которые разработаны теорией автоматического регулирования. Однако ряд особенностей управления объектом лова дает основание рассмотреть основные схемы управления с учетом этих особенностей.

Разомкнутые системы управления. В разомкнутых системах управления управляющие воздействия задаются без учета действительного состояния и положения объекта лова. Основанием для выбора управляющих воздействий в этом случае служит цель управления, известные условия внешней среды и априорные данные о возможной реакции рыбы на действующие в рассматриваемых условиях раздражители. В принципе разомкнутые системы управления должны работать при контролируемых внешних воздействиях. В нашем случае разомкнутые системы управления в ущерб эффективности управления могут работать и с неконтролируемыми внешними воздействиями. В разомкнутых системах управления информация содержится в виде «компонента структуры» элементов орудий лова или сигналов, источником которых являются орудия лова, средства интенсификации промысла и т. д. Каждой системе соответствует определенное количество связанной информации, обусловленное качественной определенностью орудия лова и средств интенсификации промысла. Эта информация характеризует степень сложности системы. Количество связанной информации в такой системе не остается постоянным. Оно изменяется при изменении положения и формы орудий лова, параметров, источников средств интенсификации. Без вмешательства извне такая система способна лишь терять информацию, например при разрушении орудия лова.

В разомкнутых системах управления объектом лова будем различать постоянное и переменное во времени управляющее воздействие.

Учитывая специфику систем управления объектом лова, будем считать управляющее воздействие постоянным во времени, если выходной сигнал управляющей системы остается постоянным или подвергается случайным стационарным колебаниям, связанным со случайными колебаниями параметров источника поля. При этом сигнал, воспринимаемый объектом лова, в общем случае будет непостоянным в результате

изменения положения орудия лова и других источников поля относительно объекта лова, колебания свойств внешней среды и т. д. (рис. 1).

Управление объектом лова с помощью незамкнутых систем управления с постоянным во времени управляющим воздействием в настоящее время является основным способом управления, характерным для многих сетных орудий лова и средств интенсификации промысла.

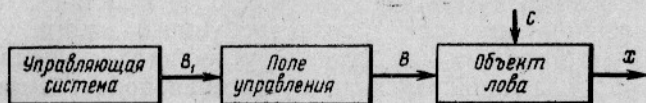


Рис. 1. Схема управления при постоянном во времени управляющем воздействии.

При переменных во времени управляющих воздействиях в разомкнутых системах будем различать управление по возмущению и программное управление по системе жесткого регулирования.

Управление по возмущению следует применять для компенсации изменения внешних воздействий на объект лова. Изменение внешних воздействий в процессе лова обычно связано с колебаниями гидрологических, метеорологических и астрономических условий, появлением индустриальных помех или помех биологического происхождения и т. д. При таком способе управления нет причинной связи между изменением поведения и состояния объекта лова и действием компенсирующих средств на рыбу. Функциональная схема управления по возмущению имеет вид, показанный на рис. 2.

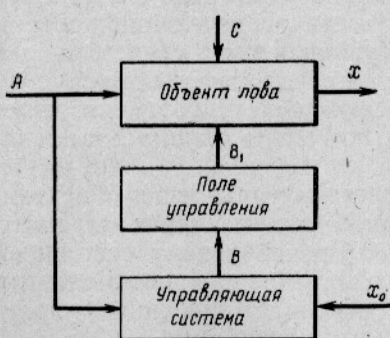


Рис. 2. Функциональная схема управления по возмущению.

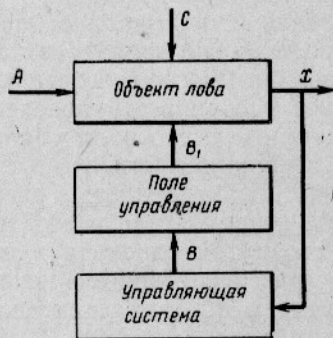
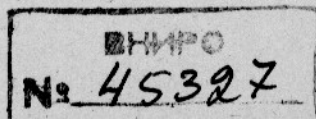


Рис. 3. Схема управления объектом лова, когда известно точное математическое описание объекта.

Программное управление по разомкнутой системе жесткого регулирования ведется по заданному закону изменения управляющих величин, который обеспечивает требуемый закон изменения управляемых величин. Наиболее успешно такая схема применяется тогда, когда известно точное описание объекта управления (реакция рыбы на известные воздействия), а все внешние неуправляющие воздействия невелики или путем регулирования по возмущению их влияние может быть сведено до минимума. Трудность применения этого метода управления состоит в том, что зависимость между управляющими и управляемыми величинами сложна и не всегда однозначна. Однако, имея некоторые данные о характере и степени влияния внешних воздействий (например, физических полей на рыбу), можно составить программу измене-



ния управляющей величины. Примером управления по рассматриваемой схеме является способ лова рыбы с применением света, основанный на периодическом изменении напряжения, подаваемого на источник света, или регулировании глубины погружения источника с залавливающим устройством.

Программа может задаваться или непосредственно в виде закона изменения управляющей величины B (наиболее простой и пригодный в нашем случае вариант), или в виде требуемого закона управления X_0 , по которому с помощью специального устройства вычисляется соответствующая управляющая величина B , которая подается на управление объектом лова. Второй вариант в принципе пригоден для управления объектом лова, если известно точное математическое описание объекта.

Схема управления по первому варианту не отличается от изображенной на рис. 2, а схема управления по второму варианту показана на рис. 3.

Замкнутые системы управления. Для замкнутых систем управления характерно использование информации по принципу обратной связи. Управление объектом лова по принципу обратной связи — это процесс, который вопреки изменению условий промысла и неблагоприятному поведению объекта лова стремится привести систему управления в состояние, обеспечивающее наибольший промысловый эффект. Система управления объектом лова, работающая по принципу обратной связи, позволяет хранить, накапливать и преобразовывать поступающую информацию, а также использовать ее для управления своим поведением, для улучшения управляющего воздействия. В такой системе различают заданное (оптимальное) состояние системы, которое характеризуется наиболее благоприятным распределением объекта лова в поле управления и состоянием управляющих средств, и действительное. Оптимальное состояние системы может изменяться в зависимости от особенностей поведения рыбы в поле управления, колебания параметров самого поля управления, состояния орудия лова и средств интенсификации промысла и т. д.

Как и любые реальные системы, система управления объектом лова никогда не находится в оптимальном состоянии и лишь стремится достичь его путем перехода в наиболее близкое к нему состояние. Различие (рассогласование) между действительным и оптимальным распределением объекта лова является основной причиной управления объектом лова.

В замкнутых системах, где управляющее воздействие зависит непосредственно от управляемой величины, можно реализовать несколько принципов управления. Простейшим из них является принцип управления по отклонению. Он приемлем при наличии неконтролируемых воздействий на объект лова и при недостаточно полном его описании. Интенсивность и характер управляющих воздействий в этом случае зависят от степени рассогласования. Контроль за положением объекта лова может осуществляться с помощью различных средств подводных наблюдений, а уменьшение рассогласования — путем изменения параметров, ориентации и характера перемещения орудий лова и средств интенсификации промысла (рис. 4).

Более сложным является программное управление по отклонению (рис. 5). Необходимость применения замкнутых систем при программном управлении возникает в тех случаях, когда наблюдаются неуправляющие воздействия, которые в значительной степени влияют на поведение рыб.

В этом случае в управляющее устройство поступают две величины: требуемый (эталонный) закон изменения управляемой величины (уставка) X_0 и фактическое значение управляемой величины X . Эталонное распределение рыбы в отдельные моменты времени сравнивается с действительным распределением и на основе этого вырабатывается

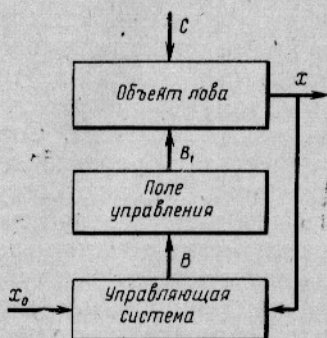


Рис. 4. Функциональная схема управления объектом лова по отклонению.

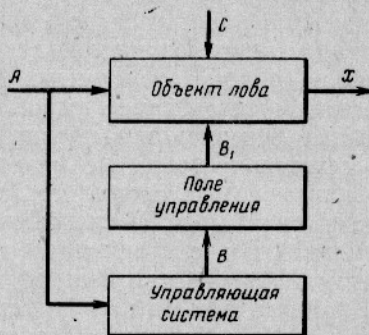


Рис. 5. Схема программного управления по отклонению.

управляющее воздействие, сокращающее рассогласование до минимума. Процесс сравнения и выработка на этой основе управляющего воздействия являются наиболее сложной частью управления по этой схеме.

К замкнутым относятся также самонастраивающиеся системы, которые позволяют поддерживать экстремум управляемой величины. Для этого на объект лова подаются пробные воздействия со стороны управляющей системы δX (рис. 6), анализируется характер поведения рыбы в результате этого пробного воздействия и затем устанавливается управляющее воздействие, приближающее положение объекта лова к оптимальному. Важным условием успешного применения этого метода для управления поведением является наличие существенных, но медленно изменяющихся внешних воздействий (например, изменения естественного светового режима при лове рыбы с применением искусственного света). Это перспективная, хотя и сложная система управления объектом лова.

Наиболее сложной является самообучающаяся система управления. Чтобы такая система обеспечила оптимальные условия работы, она должна запоминать режимы управления при различном поведении рыбы, автоматически накапливать опыт управления. В зависимости от значений входных и выходных величин такая система выбирает из памяти нужные значения управляющих воздействий. Самонастраивающиеся системы до сих пор не получили широкого распространения в технике в связи с их сложностью. По этой причине, а также потому, что условия для самообучения в нашем случае весьма неблагоприятны, трудно рассчитывать на применение самообучающихся систем в рыболовстве в ближайшее время.

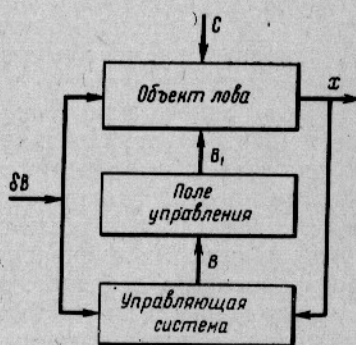


Рис. 6. Схема самонастраивающейся системы.

Различные виды управления по принципу обратной связи можно совмещать с управлением с помощью незамкнутых систем управления, которое иногда называют компенсационным управлением. При этом компенсационное управление служит для «чернового» управления объектом лова, а управление с обратной связью — для более тонкого управления.

Приведенное описание возможных систем управления объектом лова показывает, что современная техника промышленного рыболовства в основном пользуется самыми несовершенными системами управления, и совершенствование управления объектом лова является одним из главных резервов повышения эффективности промысла. Состояние нашей техники в принципе позволяет осуществлять управление с использованием самых сложных систем управления. Однако отсутствие математических моделей поведения даже для наиболее простых случаев внешних воздействий на объект лова тормозит решение этой теоретически и практически важной задачи. Следует иметь в виду, что на первых порах и весьма приближенные модели поведения могут сыграть важную роль в развитии способов управления поведением рыб в процессе лова.

Начиная разработки систем управления объектом лова, следует представлять всю сложность и трудоемкость задачи. Не случайно, например, по американским источникам, проектирование и постройка системы управления снарядами занимает до 10 лет. Создание систем управления объектом лова можно представить как процесс постепенного приближения к окончательному, наиболее рациональному варианту. Важной частью проектирования систем управления объектом лова являются теоретические исследования и основанные на них расчеты, исследование условий промысла и реакции рыбы на различные внешние воздействия. Предварительным итогом таких исследований должен стать выбор вида систем управления, пригодных для решения поставленной задачи, управляющих физических полей и типов орудий лова. Такой предварительный выбор позволяет наметить несколько вариантов основных элементов систем управления. Дальнейший анализ, основанный преимущественно на теоретических методах, должен привести к выбору одного или нескольких основных вариантов, пригодных для дальнейших работ. Предварительная стадия проектирования должна заканчиваться выработкой обоснованных заданий на проектирование. Ошибки на этой стадии проектирования могут существенно осложнить работу, так как они обычно не могут быть своевременно обнаружены и исправлены. За предварительной стадией следуют обычные этапы проектирования: эскизное, техническое и рабочее. После окончания проектирования и постройки системы управления должны начаться испытания и доводка системы управления. На этой стадии сравнивается действительное управляющее действие системы с тем, которое должно иметь место на основании расчетов и исследований. Если наблюдаются серьезные отклонения, то главная задача состоит в выяснении причин расхождения между заданием и результатом и выработке способов их устранения. Если устранение недостатков в работе системы возможно, то производится ее доводка и сдача в эксплуатацию.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Процесс управления не всегда приводит к нужным результатам. Это объясняется тем, что управляющие воздействия в отдельных точках поля ощущений не всегда соответствуют тем, которые обеспечивают

выполнение управляющих функций. Кроме того, на выполнение задачи влияют различные случайные факторы. Это позволяет ставить вопрос об эффективности управления, связывая его с вероятностью выполнения задачи управления. Очевидно, эта задача может быть решена при условии выполнения задач управления в отдельных точках зоны действия поля орудия лова.

Будем считать, что поле управления ограничено областью V , и в этой области выдача управляющих воздействий производится с плотностью вероятности $\beta(x; y; z)$, а при получении управляющих воздействий задача управления решается с вероятностью $F_0(x; y; z)$. Тогда вероятность выполнения задачи управления можно определить по формуле

$$P = \iiint_V \beta(x; y; z) \cdot F_0(x; y; z) dx dy dz. \quad (3)$$

Величина P является количественной мерой эффективности управления. Функция $F_0(x; y; z)$ зависит от степени совершенства сигнала в каждой точке поля и, следовательно, от свойств управляющей системы и поля управления и особенностей реакции рыбы на это воздействие. В связи с этим функция $F_0(x; y; z)$ может быть представлена в виде двух функций: $F_0'(x; y; z)$, которая характеризует плотность вероятности получения объектом лова совершенного сигнала, и $F_0''(x; y; z)$, определяющей плотность вероятности нужной реакции при заданной степени совершенства сигнала. Тогда

$$P = \iiint_V \beta(x; y; z) F_0'(x; y; z) F_0''(x; y; z) dx dy dz. \quad (3')$$

Определение P связано с большими трудностями, так как требует знания характера и степени влияния самых разнообразных факторов на ее величину. Особенно затруднено определение функции F_0 . Кроме того, основная цель определения P состоит в оценке эффективности действия управляющей системы. В то же время значительное число факторов, определяющих P , непосредственно не связано с параметрами управляющей системы, поэтому удобно ввести показатель эффективности управляющей системы в виде отношения вероятности P выполнения задачи управления рассматриваемой управляющей системой к максимально возможному ее значению P_{\max} при использовании образцовой управляющей системы¹.

Значения функции эффективности действия F_0 и размеры зоны действия поля выражаются сложными аналитическими зависимостями и их прямое интегрирование невозможно, поэтому следует стремиться аппроксимировать F_0 и V простейшими аналитическими выражениями.

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Управление объектом лова осуществляется в основном с помощью физических полей, причем их взаимодействие может носить энергетический и информационный характер. Вопрос энергетического взаимодействия для частных видов полей (световых, акустических), а также общие соображения по этому вопросу изложены нами ранее, поэтому здесь будут даны лишь основные представления об этом виде взаимодействия.

¹ Под образцовой следует понимать такую управляющую систему, которая является источником оптимальных управляющих воздействий.

При энергетическом воздействии физических полей на рыбу происходит преобразование энергии поля в энергию той формы движения материи, которая определяет уровень реакции объекта лова на это физическое поле. Эффективность энергетического воздействия на рыбу однородного по составу физического поля можно оценить условно-эффективной величиной F , которая пропорциональна мере реакции приемника при действии этого поля и определяется по формуле

$$F = v R, \quad (4)$$

где R — величина, характеризующая энергию поля, падающую на соответствующий приемник рыбы;
 v — чувствительность приемника.

Если на рыбу действует неоднородное по качественному составу поле со сплошным спектром, то F можно найти по формуле

$$F = (v_{\lambda})_m \int_0^{\infty} v_0(\lambda) R(\lambda) d\lambda, \quad (4')$$

где $R(\lambda)$ — величина, характеризующая спектральную плотность энергии, падающей на приемник рыбы;
 $v_0(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность приемника;
 $(v_{\lambda})_m$ — максимальное значение спектральной чувствительности приемника.

Условно-эффективная величина F нелинейно связана с мерой реакции приемника рыбы, поэтому эффективность энергетического действия физических полей на рыбу иногда удобно оценивать с помощью действительно эффективных величин Φ . Они определяются числом порогов чувствительности от нуля до соответствующей условно-эффективной величины. В общем случае Φ можно найти по формуле

$$\Phi = \int_0^F \frac{dF}{\Delta F}, \quad (5)$$

где ΔF — разностный порог чувствительности приемника.

При определении условно и действительно эффективных величин возникают затруднения при выборе $(v_{\lambda})_m$, v , $R(\lambda)$ и R . Для биологических приемников обычно нельзя установить и измерить меру реакции приемника, поэтому вместо $(v_{\lambda})_m$ и v следует принимать условно некоторые удобные значения. При действии на рыбу неоднородных по качественному составу полей этот вопрос решается выбором системы эффективных величин. Так, при действии на рыбу светового поля за основу можно принимать систему световых величин и считать $(v_{\lambda})_m = 683$ или систему энергетических величин, когда $(v_{\lambda})_m = 1$. При оценке действия других физических полей на рыбу в большинстве случаев также удобно исходить из энергетической системы единиц и считать $(v)_m$ и v равными единице.

Величины $R(\lambda)$ и R необходимо выбирать с учетом природы воздействия физического поля на рыбу. Однако, во-первых, природа воздействия не всегда известна, во-вторых, часто возникают затруднения при практическом определении этих величин. Для оценки эффективности энергетического действия физических полей на рыбу в настоящее время наиболее пригодны следующие величины: лучистая яркость, или облученность (световое поле); истинное напряжение тела рыбы, или суммарная сила тока, протекающего через тело рыбы (электрическое поле); акустическое давление и смещение частиц жидкости (акустиче-

ское поле); количество молекул, или масса активного вещества, соприкасающегося с обонятельным или вкусовым анализатором в единицу времени (поле плотности массы); гидродинамическая сила, или мощность потока, набегающего на рыбу (гидродинамическое поле); плотность энергии магнитного поля (магнитное поле); разность температур тела рыбы и воды или поглощенная телом рыбы в единицу времени тепловая энергия (тепловое поле).

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЗОНЫ ДЕЙСТВИЯ ОРУДИЙ ЛОВА И СРЕДСТВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОМЫСЛА

Рассмотрим основные положения теории информации, которыми мы в дальнейшем будем пользоваться, поскольку многие из них еще не имеют общепризнанного толкования.

Анализируя работу систем управления объектом лова, можно исходить из различных теорий, видов и свойств информации. Прежде всего необходимо отметить статистическую теорию информации. С точки зрения статистической теории информации само понятие информации может быть представлено как снятая, уничтоженная неопределенность и применимо в сфере любых случайных явлений. В последние годы появилась более широкая (невероятностная) точка зрения на природу информации. Необходимость невероятностного подхода к теории информации связана с тем, что не всякий процесс носит вероятностный характер. Можно указать на такие невероятностные подходы к теории информации, как комбинаторный, динамический, топологический, алгоритмический.

Все упомянутые теории информации изучают с учетом специфики тех или иных структур переход от неопределенности к определенности. В последние годы появились попытки еще более широкого подхода к определению информации. Многие ученые считают, что информация — это разнообразие, а движение разнообразия представляет собой информационные процессы или их проявление. Как указывает А. Л. Урсул, информация — это разнообразие, которое один объект содержит в другом в процессе их взаимодействия. Понятие информации, по Урсулу, охватывает три различных типа разнообразия: сложности, разнообразие отношений порядка, которое характеризует порядок расположения элементов в множестве и указывает на степень упорядоченности множества, и разнообразие любых отношений и взаимосвязей элементов в множестве, показывающее степень организации множества.

Представление информации как разнообразия, хотя и страдает некоторыми методологическими недостатками, весьма ценно при исследовании вопросов управления поведением рыб. Если принять такое представление информации за основу, то в нашем случае информация — это разнообразие, отображающее количественные и качественные различия орудий лова, средств интенсификации промысла, условий внешней среды, объекта лова и взаимодействия между ними. Три типа разнообразия, отмеченные выше, позволяют производить качественную и количественную оценку самых различных систем управления объектом лова и процессов, проходящих в них. Такое определение информации дает возможность рассматривать с информационной точки зрения воздействие на рыбу даже таких полей, как электрические, гидродинамические, тепловые, и механических преград, поскольку и в этом случае объект лова фиксирует изменение (разнообразие) внешних условий.

Оно позволяет также использовать для решения конкретных задач количественные и качественные зависимости, разработанные различными теориями информации.

Из всех теорий информации наибольшее распространение и математическое обоснование получила статистическая теория, математическим аппаратом которой мы и будем в основном пользоваться.

Сигнал, шум, пороговые значения, характеризующие чувствительность рыбы к физическому полю, само поле ощущений наиболее полно и правильно можно описать на основе их вероятностно-статистического анализа. Такое описание производят с помощью отдельных числовых характеристик закона распределения случайной величины. В теории информации для характеристики систематической случайной составляющей, как и в теории вероятности, используют значение математического ожидания, а для характеристики случайной составляющей вместо всех моментов более высоких порядков применяют энтропию как своеобразный момент, характеризующий неопределенность рассматриваемой величины.

Для вычисления неопределенности сигнала, шума и пороговых значений в некоторой точке поля необходимо знать количество показателей, характеризующих каждый из них, законы распределения показателей и связь между ними в вероятностном смысле. Статистический анализ показывает, что сигнал, шум и пороговое значение могут быть описаны одним или несколькими признаками с различными законами распределения, причем признаки могут быть зависимыми или независимыми. Сигнал, шум, пороговые значения и поле ощущений в некоторой точке водоема в общем случае характеризуются n -мерными функциями плотности вероятности (каждая одномерная функция характеризует плотность вероятности соответствующей величины в определенном направлении).

Энтропию $H(x)$ n -мерного распределения можно найти по известной формуле

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1; \dots x_n) \log [\theta_1 \dots \theta_n p(x_1; \dots x_n)] dx_1 \dots dx_n, \quad (6)$$

где $p(x_1; \dots x_n)$ — многомерная функция плотности вероятности;

θ — интервал дискретности по i -му параметру, который выбирается, исходя из допусков на точность измерений, существующего уровня помех и т. д.

Эту же энтропию можно найти из выражения, представляющего обобщенное понятие условий энтропий.

Выражение (6) предполагает существование между параметрами x_i статистической связи. Такая связь существует, например, между параметрами, характеризующими угловое распределение света в водоеме. Если статистическая связь между параметрами отсутствует, то энтропию можно определить по формуле, которая является частным случаем предыдущей (при статистической независимости параметров x_i). Когда сигнал, шум, пороговое значение и само поле ощущений в некоторой точке водоема характеризуются одномерными функциями распределения (например, при исследовании действия на рыбу поля плотности массы, теплового поля и т. д.), то энтропию можно вычислить по формуле

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log p(x) dx - \log \theta. \quad (7)$$

Среди законов распределения случайных величин при исследовании зоны действия орудий лова наибольшее распространение получило одномерное или многомерное нормальное распределение. Нормальный закон распределения часто встречается при статистическом описании сигнала и шума, при определении порогового значения большой совокупности рыб.

Энтропия H_N некоторой величины x , имеющей центрированное нормальное распределение с дисперсией σ^2 и плотностью вероятности

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

равна

$$H_N = -\log \frac{\theta}{\sqrt{2\pi}\sigma} + \frac{1}{2} \log e. \quad (9)$$

По аналогичным, но значительно более сложным формулам определяют энтропию n -мерного нормального распределения.

Зная энтропию сигнала, шума и пороговых значений, можно вычислить энтропию в отдельных точках зоны действия поля. Некоторые параметры, определяющие зону действия поля, являются зависимыми, другие — независимыми. Например, сигнал и шум при исследовании зоны действия светового поля обычно не связаны между собой, а пороговое значение в общем случае зависит от уровня сигнала и шума. В этом случае сначала определяют энтропию системы зависимых параметров, а затем полученную энтропию складывают с энтропией остальных параметров.

Энтропию в отдельных точках поля можно находить не только по энтропии сигнала, шума и пороговых значений, но и после вычисления по этим параметрам величин, непосредственно характеризующих зону действия поля в рассматриваемой точке.

ЭНТРОПИЯ ВЫБОРА РЫБОЙ ЧАСТНОГО ПОВЕДЕНИЯ И КОЛИЧЕСТВО ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЕЕ УСТРАНЕНИЯ. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ РЫБЫ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ОРУДИЙ ЛОВА

Как уже отмечалось, поведение рыбы в зоне действия орудий лова и средств интенсификации промысла носит случайный характер и, следовательно, характеризуется неопределенностью. Для снятия этой неопределенности объект лова должен получить некоторое количество информации. Чтобы определить энтропию выбора частного поведения, воспользуемся некоторыми положениями теории информации, причем под событием — термином, принятым в теории информации, — будем понимать такую совокупность проявлений реакции рыбы, которая однозначно и полностью характеризует рассматриваемые стороны ее поведения.

Минимальное количество информации, которую должен переработать объект лова, чтобы его поведение соответствовало заданному, равно в каждой точке энтропии H_0 выбора частного поведения объекта лова из общего набора возможных поведений N_0 . Эту энтропию можно определить по известной из теории информации формуле Шеннона [71]

$$H_0 = - \sum_{i=1}^{N_0} p_i \log_2 p_i, \quad (10)$$

где p_i — вероятность нахождения объекта лова в i -ом частном поведении.

$$\begin{aligned} \text{Когда} \quad & p_i = \text{const}, \\ & H_0 = \log_2 N_0. \end{aligned} \quad (11)$$

Выбор объектом лова частного поведения из N_0 возможных поведений можно разбить на ряд этапов. Наиболее характерными из них в общем случае являются этапы обнаружения, ориентировочной, условной и безусловной реакций. Эти этапы соответствуют основным участкам поля (например, зону безусловного действия поля переменного электрического тока можно разбить на три этапа: возбуждения, угнетения и электрошока).

В ходе осуществления этапов управления последовательно уточняется характер поведения объекта лова.

На этапе обнаружения из двух возможных событий осуществляется одно, соответствующее обнаружению или пропуску рыбой физического поля. Следовательно, на этапе обнаружения энтропия выбора рыбой поведения

$$H_{\text{обн}} = - \sum_{i=1}^2 p_{i_{\text{обн}}} \log_2 p_{i_{\text{обн}}}. \quad (12)$$

Вероятность $p_{i_{\text{обн}}}$ обнаружения рыбой физического поля будем определять для рыбы, которая попала в зону действия поля, где вероятность обнаружения поля отлична от нуля. Величина $p_{i_{\text{обн}}}$ может изменяться в очень широких пределах и зависит от многих факторов: вида и структуры поля, вида и состояния объекта лова, направления и скорости его перемещения, условий внешней среды и т. д. Соответственно, будет различной и энтропия этапа обнаружения как энтропия опыта с двумя исходами.

На этапе ориентировочной реакции рыба выясняет свое отношение к физическому полю как раздражителю. Поведение рыбы на этом этапе можно считать определенным, если отношение ее к раздражителю выражено как положительное, отрицательное или нейтральное, хотя всегда следует иметь в виду некоторую условность такой оценки реакции, особенно при определении энтропии выбора частного поведения рыбы.

Таким образом, на этапе ориентировочной реакции

$$H_{\text{ор}} = - \sum_{i=1}^3 p_{i_{\text{ор}}} \log_2 p_{i_{\text{ор}}}. \quad (13)$$

Определение p_i на этапе ориентировочной реакции обычно не вызывает затруднений, если добывается рыба одного вида, пола и примерно одинакового возраста, когда отношение к раздражителю по указанному признаку проявляется как правило, весьма определенно.

На этапе условной и безусловной реакций поведение рыбы в каждой точке можно охарактеризовать направлением и скоростью перемещения рыбы. Для этих этапов будем иметь

$$H_{\text{усл}} = - \sum_{i=1}^{N_{\text{усл}}} p_{i_{\text{усл}}} \log_2 p_{i_{\text{усл}}}; \quad (14)$$

$$H_{\text{б}} = - \sum_{i=1}^{N_{\text{б}}} p_{i_{\text{б}}} \log_2 p_{i_{\text{б}}}. \quad (15)$$

где $N_{усл}$ и $N_б$ — общее число возможных видов поведения рыбы в каждой точке соответственно на этапах условной и безусловной реакций;

$p_{i_{усл}}$ и $p_{i_б}$ — вероятность осуществления каждого из частных видов поведения на тех же этапах.

Общее число частных видов поведения $N_{усл}$ и $N_б$ равно произведению количества возможных направлений перемещения из рассматриваемой точки на число интервалов в диапазоне возможных скоростей перемещения. Метод определения указанных величин рассмотрен ранее при описании модели поведения рыбы в поле ощущений.

Вероятности $p_{i_{усл}}$ и $p_{i_б}$ можно найти, учитывая особенности воздействия физических полей на рыбу, и по данным статистической обработки результатов наблюдений за ее поведением.

Наиболее удобен следующий порядок определения $p_{i_{усл}}$ и $p_{i_б}$. Сначала пытаются выявить класс поведения, вероятность осуществления которого равна 1. Если такого класса нет, то необходимо установить наличие нескольких равновероятных классов поведений. Если и таких классов поведения подобрать нельзя, то следует отобрать те, вероятность осуществления которых равна 0, а затем установить вероятность поведения, соответствующего остальным классам.

Энтропия поведения рыбы в отдельных точках зоны действия поля не остается постоянной. На ее величину влияет характер внешних воздействий, физиологическое состояние рыбы, направление и скорость перемещения рыбы, характер относительного расположения рыбы и срудия лова или других источников физических полей и т. д.

Чаше по мере перемещения рыбы к источнику физического поля в зоне условной и безусловной реакций количество возможных частных видов поведения уменьшается, соответственно уменьшается неопределенность их выбора.

Расчет наибольшей энтропии поведения в отдельных точках зоны действия поля позволяет построить линии равных энтропий и установить степень неопределенности действия зоны как разность между энтропией в точке, где она имеет максимальное значение, и максимальной энтропией в пределах зоны. Однако необходимо иметь в виду, что этот показатель характеризует не только качество зоны ощущений, но и условия внешней среды, особенности реакции рыбы на физическое поле и т. д.

На этапах обнаружения и ориентировочной реакции энтропии $H_{обн}$ и $H_{ор}$ соответствуют минимальному количеству информации, которую должен получить объект лова для ликвидации неопределенности поведения рыбы. Для снятия неопределенности на двух остальных этапах в принципе достаточно сообщить объекту лова количество информации, равное энтропии выбора рыбой поведения в одной из точек зон условной и безусловной реакций, где она имеет максимальное значение $H_м$.

Таким образом, минимальное количество информации, необходимое для снятия суммарной энтропии поведения на всех этапах управления,

$$I_n = H_{обн} + H_{ор} + H_м. \quad (16)$$

Необходимое количество информации на каждом этапе I_i должно быть получено и переработано в течение некоторого времени T_i , поэтому необходимая средняя скорость поступления информации

$$R_i = \frac{I_i}{T_i}. \quad (17)$$

В процессе управления неопределенно не только поведение рыбы в каждой точке поля ощущений, но и ее положение как объекта управления. Действительно, в результате управления объект лова должен подойти к некоторой поверхности S_1 или попасть в некоторый объем V_1 , где он подвергается улавливающему действию орудия лова. Если рыба находится в некоторой зоне поведенческих реакций, которая ограничена поверхностью площадью S_0 , а объем внутри нее равен V_0 , то неопределенность положения рыбы как объекта управления зависит от соотношения рассматриваемых площадей или объемов, и она будет уменьшаться по мере приближения рыбы к цели управления.

Неопределенность H_{II} положения рыбы так же, как и энтропию выбора рыбой частного поведения, можно определить по формуле Шеннона, преобразованной для случая равновероятных событий,

$$H_{II} = \log_2 \frac{V_0}{V_1}; \quad (18)$$

$$H_{II} = \log_2 \frac{S_0}{S_1}. \quad (19)$$

Хотя устранение неопределенности положения объекта лова в процессе управления связано с сообщением рыбе управляющей информации, видимо, не существует прямой связи между H_{II} и количеством информации, необходимой для ликвидации этой неопределенности.

Таким образом, минимальное количество информации, которое должен переработать объект лова в процессе управления его поведением, можно определить по формуле (16). Расчеты показывают, что это количество информации составляет, как правило, 4—6 бит. На самом деле в процессе управления рыба должна переработать обычно значительно большее количество информации, поскольку за время управления в общем случае меняется состояние системы управления, в том числе положение рыбы в поле управления. Кроме того, для усвоения информации обычно требуется некоторая ее избыточность.

Без специально поставленных экспериментов можно лишь строить предположения о действительно перерабатываемом в процессе управления количестве информации, однако сверху это количество ограничено скоростью переработки информации центральной нервной системой рыбы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ В СИГНАЛЕ. ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОМЕХ

Сигнал, который определяет воздействие орудий лова и средств интенсификации промысла на рыбу, в каждой точке водоема можно охарактеризовать функцией $B = f(b_1; b_2; \dots; b_n)$, описывающей его распределение по n -мерному пространству с координатами b_1, b_2, \dots, b_n , которые являются признаками сигнала. Если разбить рассматриваемое пространство на элементарные объемы, то каждому i -му объему будет соответствовать сигнал с определенными параметрами.

Общие интервалы изменения аргументов признаков обычно ограничены, и каждый из них может быть разделен на ряд интервалов $k_{b_1}, k_{b_2}, \dots, k_{b_n}$. Тогда в n -мерном пространстве всегда окажется $N = k_{b_1} \cdot k_{b_2} \cdot \dots \cdot k_{b_n}$ элементарных объемов с различными свойствами сигнала. Поскольку в нашем случае отдельные признаки сигнала носят вероятностный характер, то свойства сигнала в каждом элементарном

объеме могут быть установлены лишь с некоторой степенью вероятности. Диапазон различных свойств сигнала также ограничен, поэтому в рассматриваемой точке физического поля может быть лишь конечное число различных градаций сигнала m . Таким образом, в каждой точке поля сигнал может быть описан числом N элементарных объемов, каждый из которых относится к одному из m градаций сигнала. При условии, что вероятности выбора градаций равны, и при статистической независимости каждого из объемов количество информации, которое содержит сигнал, можно определить по формуле [19]

$$I = N \log_2 (m + 1), \quad (20)$$

Поскольку вероятности выбора градаций обычно неравны, то количество информации, определяемое по формуле (20), представляет собой предельный объем информации, которую может нести сигнал с определенными значениями N и m .

Часто необходимо знать не абсолютное количество информации в сигнале, а объем информации, отнесенный к одному элементарному объему,

$$I_{\text{отн}} = \log_2 m, \quad (21)$$

В общем случае в каждой точке поля ощущений, кроме сигнала, на рыбу действуют шумы. Если шумы играют роль помех, то они увеличивают как интервал неопределенности свойств сигнала, так и минимальные значения интервалов изменения признаков сигнала, внутри которых сигнал не различается по своим свойствам. Таким образом, при наличии шумов будет меньше как элементарных объемов N_p , так и возможных градаций m_p . Следовательно, действительное количество информации, воспринимаемое рыбой при действии помех,

$$I_p = N_p \log_2 (m_p + 1). \quad (22)$$

Потери информации ΔI при действии помех

$$\Delta I = I - I_p = N \log_2 (m + 1) - N_p \log_2 (m_p + 1). \quad (23)$$

Рассмотрим, от каких факторов зависят и как определяются N и m при действии на рыбу различных физических полей. Число элементарных объемов с различными признаками сигнала в значительной степени зависит от характера величин, которые определяют воздействие орудий лова и средств интенсификации промысла на рыбу.

К первому виду относятся физические поля, действие которых на рыбу в каждой точке однозначно и характеризуется скалярными величинами, зависящими только от координат точки (тепловые поля, поля плотности массы, акустические поля давления). Для волновых полей такого типа N зависит от частной характеристики и времени действия сигнала, а для статических — только от времени действия сигнала.

Действие на рыбу полей второго вида характеризуется скалярными величинами — функциями точки и направления (световые поля). Число элементарных объемов N с различными свойствами сигнала для таких видов полей зависит от диапазона длин волн, направления линии зрения и времени действия сигнала. Очевидно, в этом случае количество информации, которое может получить рыба, зависит от ориентации и направления ее зрения.

Величины, определяющие действие на рыбу полей третьего вида, относятся к векторным (гидродинамические поля, акустические поля смещения и т. д.). Число N для волновых полей этого типа зависит от частного диапазона и времени действия сигнала, ориентации рыбы, а для статических полей — от двух последних факторов.

При определении градаций ступеней сигнала m следует исходить из того, что диапазон возможных значений сигнала ограничен, а рыба способна обнаружить лишь такое различие в величине сигнала, при котором отношение этой разницы к одной из величин сигнала превышает дифференциальный порог.¹

Поскольку число различимых органами чувств рыбы уровней сигнала ограничено, то возможно дискретизировать сигнал, т. е. перейти к квантованному сигналу. Если принять шаг квантования, равным дифференциальному порогу γ , то при условии, что в рассматриваемом диапазоне значений эффективного сигнала $B_{\max} - B_{\min}$ справедлив закон Вебера—Фехнера, будем иметь:

$$m = \frac{1}{\gamma} \ln \frac{B_{\max}}{B_{\min}}. \quad (24)$$

В более общем случае

$$m = \int_{B_{\min}}^{B_{\max}} \frac{dB}{f(B)}, \quad (25)$$

где $f(B)$ — функция, характеризующая зависимость порога ощущений от эффективной величины сигнала.

Таким образом, число градаций ступеней сигнала m зависит от диапазона возможных значений эффективной величины сигнала и пороговой величины органов чувств рыбы.

При переходе от одной точки зоны ощущений к другой количество информации в сигнале изменяется, так как не остается постоянным число элементарных объемов (колеблется количество интервалов изменения отдельных признаков) и число различимых градаций сигнала (колеблется диапазон изменения эффективной величины сигнала и пороговая величина органов чувств рыбы). Как правило, при приближении к источнику сигнала количество информации в нем увеличивается, однако это может сопровождаться как увеличением, так и уменьшением общей ценности информации с точки зрения ее управляющего действия на рыбу.

Наиболее характерно определение количества информации в сигнале при исследовании действия на рыбу светового поля.

Световые поля могут быть средством различения подводных объектов и ориентации в пространстве (информационное воздействие поля) или характеризуют интенсивность освещения в водоеме (энергетическое воздействие поля). При этом второй случай можно рассматривать как частный случай первого.

Световое поле в каждой точке водоема в общем случае может быть списано функцией $B(\lambda, \varphi, \Theta, t)$, которая устанавливает распределение спектральной плотности мощности по длинам волн λ , в различных направлениях (направление взгляда определяется долготой φ и широтой Θ) и по времени t . Таким образом, функция представляет собой распределение величины B в четырехмерном пространстве. Каждому

¹ В ряде случаев вместо дифференциального порога можно принимать во внимание разностный порог ощущения.

i -му объему четырехмерного пространства соответствует величина энергии

$$W_i = \int_{\Delta \lambda_i} \int_{\Delta \varphi_i} \int_{\Delta \theta_i} \int_{\Delta t_i} B(\lambda; \varphi; \theta; t) d\lambda d\varphi d\theta dt. \quad (26)$$

При определении количества информации, которую рыба получает в световом поле при информационном воздействии, будем учитывать распределение энергии лишь в пределах телесного угла, охватывающего изображение рассматриваемого объекта, а при энергетическом воздействии — в пределах поля зрения рыбы. Решение задачи значительно упрощается, если можно пренебречь различием спектральной плотности распределения энергии по различным направлениям.

С учетом этого допущения N и m зависят от диапазона видимых яркостей и пороговой контрастной чувствительности глаза рыбы. Возможный диапазон видимых яркостей зависит в основном от углового распределения яркости в водоеме, цвета рассматриваемого объекта и его ориентации, расстояния до рассматриваемого объекта и направления, в котором он рассматривается. Как показали наши исследования, отношение яркости элементов орудий лова обычно не превышает 30—40, а по данным различных гидрооптических исследований, отношение яркости световых лучей в водоеме по различным направлениям составляет не более 80—100.

Контрастная чувствительность глаза рыбы, по данным В. Р. Протасова, в условиях наблюдения, близких к оптимальным, изменяется от 0,01 до 0,12. Действительная величина контрастной чувствительности может колебаться в значительно больших пределах, так как зависит от интенсивности освещения в водоеме, угловых размеров рассматриваемого объекта, распределения яркости по полю зрения и многих других причин.

Если считать, что восприятие яркости рыбой подчиняется закону Вебера—Фехнера, то число градаций яркости m можно найти по формуле (24). Расчеты показывают, что m в нашем случае колеблется от 1 до нескольких сотен. Однако практически число различных градаций яркости по ряду причин изменяется значительно меньше. Например, для глаза человека в оптимальных условиях число различных градаций яркости составляет всего 30—40 вместо 170—200, получаемых по расчету.

Число элементарных объемов N в стационарном световом поле, служащем для рыбы только средством ориентации в пространстве, зависит в основном от углового распределения света в водоеме, размеров поля зрения и пороговой чувствительности глаза рыбы. Можно считать, что при дневном световом режиме N имеет величину порядка 10^2 , уменьшаясь при переходе от дневного режима освещения к ночному.

Если в световом поле находятся элементы орудия лова или другие объекты, то N зависит не только от указанных выше факторов, но и от размеров, формы, структуры, распределения цвета по поверхности объектов и т. д. Даже с учетом довольно равномерного углового распределения света в водоемах и малой контрастности обычно рассматриваемых рыбой объектов число N в этом случае может быть порядка 10^3 и более.

Таким образом, в стационарном световом поле в водоеме сигнал может нести различное количество информации, причем максимальное ее значение составляет примерно $5 \cdot 10^3$ бит. Для сравнения можно указать, что информационная емкость телевизионных устройств колеблется от $8,8 \cdot 10^4$ до $8,8 \cdot 10^5$ бит.

Если световое поле нестационарно, то при определении количества информации необходимо учитывать изменение светового поля во времени путем квантования по времени. При выборе интервала квантования Δt необходимо учитывать временные характеристики зрения рыбы. Зрительные процессы инерционны. Требуется время, чтобы накопить некоторую энергию, достаточную для выделения светового сигнала из шума. По этой причине изменения раздражителя во время внутри интервала, не превышающего некоторой критической длительности, останутся незамеченными. Интервал квантования Δt , равный критической длительности, в первом приближении, можно принимать равным критической частоте мельканий глаза рыбы¹.

Задача определения количества информации, которую несет световое поле, значительно усложняется, если ее решать на спектральном уровне. Однако в подавляющем большинстве случаев такое уточнение не повлияет существенным образом на результат. Это связано со значительной равномерностью углового распределения цветности в водоемах и довольно быстрым сближением видимой цветности различных частей объекта и фона при удалении от объекта.

При определении количества информации, которую несет акустический сигнал, акустическое поле давлений в каждой точке может быть охарактеризовано функцией $B(\nu; t)$, описывающей распределение спектральной плотности мощности звука по частоте ν и времени t . Следовательно, рассматриваемая функция представляет собой распределение B в двумерном пространстве. Тогда

$$W_i = \int_{\Delta \nu_i} \int_{\Delta t_i} B(\nu; t) d\nu dt. \quad (27)$$

Определение количества информации в акустическом сигнале требует данных о воспринимаемой рыбами полосе частот, различении тонов различной высоты, пороговой чувствительности органов слуха и т. д.

На основании литературных данных можно составить представление о количестве информации в звуковом сигнале, которая определяется по способности органа слуха рыбы отмечать разнообразие в таком сигнале. Очень ориентировочно можно считать, что максимальное количество информации в таком сигнале соответствует пропускной способности органов чувств рыбы порядка 10^3 — 10^4 бит/с.

При энергетическом действии волновых и статических полей (тепловых, гидродинамических, электрических и т. д.) информационную емкость сигнала можно найти несколько условно по числу уровней квантования величины, которая определяет воздействие физического поля на рыбу. Квантование следует производить в интервале, верхняя граница которого соответствует либо максимально возможному значению этой величины, либо значению величины, при котором воздействие поля достигает крайнего (с точки зрения управления объектом лова) эффекта (электрошок или электронаркоз — при действии электрического поля, прекращение сопротивления потоку — в гидродинамическом поле, ослепление рыбы — в световом поле, потеря двигательной активности при понижении температуры — в тепловом поле и т. д.). Шагом квантования при этом является разностный порог приемника. Следо-

¹ По-видимому, яркие вспышки на большой площади регистрируются глазом рыбы так же, как и глазом человека, как отдельные, если период этих вспышек значительно меньше критической частоты мельканий.

вательно, число уровней квантования можно определить по формуле (5) для вычисления действительно эффективных величин, приняв соответствующие значения верхнего предела интегрирования.

ОБЪЕКТ ЛОВА КАК ПРИЕМНИК ИНФОРМАЦИИ

Рыба пользуется всеми тремя способами получения информации: пеленгацией, локацией и сигнализацией. В зоне действия орудий лова и средств интенсификации промысла преобладающую роль играет первый способ получения информации, основанный на восприятии различного рода сигналов и шумов. Значительно меньшую роль играет локационный способ. Встречаются лишь единичные указания об использовании рыбами локации с помощью акустических и электромагнитных полей. По-видимому, локация осуществляется и с помощью гидродинамических полей, образуемых рыбой при движении. На первый взгляд, передача информации сигнализацией как средством общения между рыбами в нашем случае не имеет значения. На самом же деле роль обмена информацией между рыбами в зоне ощущения ими орудий лова может быть очень велика. Об этом свидетельствует различный характер одиночного и группового поведения рыб и многочисленные эксперименты, в которых изучались вопросы их ориентации и сигнализации.

Из трех способов получения рыбой управляющей информации лишь первый позволяет активно воздействовать на рыбу, посылая управляющие сигналы. Два других можно использовать в целях управления, влияя на количество информации, которую рыба получает этими способами. Такая задача может быть решена изменением условий внешней среды, особой конструкцией орудия лова или воздействием на функции рецепторов. Необходимо также учитывать возможности, которые открывает в управлении поведением рыб имитация биосигналов, особенно акустических.

Основными информационными характеристиками рецепторных систем объекта лова являются чувствительность, пропускная способность и помехоустойчивость.

Из различных понятий информационной чувствительности, разработанных в основном для систем воспроизведения наиболее пригодна в нашем случае информационная оценка чувствительности g , равная отношению количества информации, поступающей на объект лова I_B , к входной энергии W_B

$$g = \frac{I_B}{W_B} \quad (28)$$

Информационная чувствительность объекта лова к физическому полю, кроме прочих причин, зависит от величины входной энергии, поэтому наиболее полно информационную чувствительность можно оценить графиком $g = f(W)$. Построение графика по многим причинам связано со значительными трудностями и практически целесообразно ограничиться определением двух величин: пороговой информационной чувствительности $g_{\text{пор}}$ как отношения порогового количества информации $I_{\text{пор}}$ к входной энергии $W_{\text{пор}}$, несущей это количество информации,

$$g_{\text{пор}} = \frac{I_{\text{пор}}}{W_{\text{пор}}} \quad (29)$$

и информационной чувствительности g_m при входной энергии $W_{\text{макс}}$, когда сигнал несет максимальное количество информации $I_{\text{макс}}$,

$$g_m = \frac{I_{\text{макс}}}{W_{\text{макс}}}. \quad (30)$$

Эти величины не только достаточно хорошо характеризуют информационную чувствительность объекта лова к рассматриваемому физическому полю, но и позволяют определять интенсивность сигнала, соответствующего пороговому количеству информации или несущего наибольшее количество информации. Они позволяют также сравнивать информационную чувствительность различных объектов лова.

При оценке пороговой информационной чувствительности рецепторных систем объекта лова необходимо учитывать весьма интересное, но требующее проверки положение о постоянстве порогового количества информации. В соответствии с этим положением для работы органов чувств необходимо постоянное пороговое количество информации, независимо от различия внешних условий.

Для некоторых видов полей (электрических, тепловых и т. д.) $I_{\text{макс}}$ формально соответствует наибольшему количеству энергии в сигнале. Практически $I_{\text{макс}}$ необходимо определять для такого значения $W_{\text{макс}}$, при котором достигается наибольший, с точки зрения управления, эффект.

Наиболее важным показателем рецепторной системы является ее пропускная способность. Она характеризует количество информации, которую система может пропустить в единицу времени.

В общем случае пропускная способность органа чувств изменяется во времени и определяется функцией $C(t)$. Тогда количество информации I , воспринимаемой им за время T , можно определить по формуле

$$I = \int_0^T C(t) dt. \quad (31)$$

Пропускная способность обычно зависит от степени развития органов чувств и центральной нервной системы. Многие ученые отмечают зависимость пропускной способности от количества нервных окончаний различных органов чувств и даже считают, что она в десятичных единицах примерно соответствует количеству нервных волокон. Это подтверждают данные о количестве нервных клеток и объеме информации, воспринимаемой органами зрения, слуха и осязания человека, хотя по другим органам чувств это соответствие нарушается (см. таблицу).

Вид рецепции	Количество нервных окончаний	Объем воспринимаемой информации, бит/с	Вид рецепции	Количество нервных окончаний	Объем воспринимаемой информации, бит/с
Зрение	10^8	$3 \cdot 10^8$	Ощущение тепла и холода Обоняние Вкус	10^5	$2 \cdot 10^3$
Слух	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$		10^7	10^2
Осязание	$5 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$		10^7	10

Данные о количестве нервных окончаний и свойствах некоторых органов чувств рыбы, сведения о реакции ее на различные раздражители, приведенные ниже данные о возможном количестве информации,

которую несут сигналы различной физической природы, позволяют сделать вывод о том, что основные рецепторы рыбы (органы зрения и слуха) имеют очень высокую пропускную способность, которая не реализуется центральной нервной системой¹ и значительно превосходит необходимую для ликвидации неопределенности поведения скорость поступления информации.

Пропускная способность других органов чувств, по-видимому, значительно меньше из-за небольшого объема пропускаемой одновременно информации или значительного времени ее восприятия.

При анализе информационной емкости сигнала для некоторых видов полей мы исходили из предельно возможного количества информации в сигнале, поэтому полученные значения информационной емкости соответствуют в основном максимальной пропускной способности органов чувств с учетом критической длительности сигнала. Однако пропускная способность органов чувств зависит от условий, в которых работают соответствующие приемники рыбы, и их физиологического состояния, поэтому она может колебаться в чрезвычайно широких пределах.

Таким образом, при использовании различных физических полей для управления поведением рыб необходимо всякий раз учитывать, соответствует ли скорость поступления управляющей информации пропускной способности объекта лова в рассматриваемых условиях. При этом необходимо помнить, что в центральной нервной системе происходит отбор и отбраковка информации.

Наиболее важным средством уменьшения количества перерабатываемой информации является обобщение совокупности простых признаков в образы. В результате такой анализаторной деятельности организма бесконечное множество состояний внешней среды сводится к малому количеству решений.

Рыбам свойственно опознание образов (зрительных, звуковых, запаховых и, возможно, других). Образом может стать не любая совокупность простых признаков, а лишь такая, которая встречается довольно часто и имеет для рыбы большое сигнальное значение (различные часто встречаемые виды рыб, объекты питания и т. д.).

Образы, как правило, описываются совокупностью сравнительно небольшого числа признаков. Эта совокупность мало изменяется при различных преобразованиях, сохраняющих образ. Рыба, например, четко опознает хищника или объект питания, несмотря на различия, иногда значительные, в размерах, форме, окраске и т. д. Точно так же рыба хорошо опознает звуковые образы, имеющие сигнальное значение, несмотря на их амплитудно-частотную и временную разницу.

Кроме образов, необходимо различать совокупность большого числа простых признаков, для опознания которых рыба должна перерабатывать большое количество информации. Задача опознания такой совокупности простых признаков усложняется тем, что, как показала Н. В. Праздниковой, у рыб сильно ограничено инвариантное различение, по крайней мере при зрительном опознании. Она показала, что при таком опознании не имеет значения только изменение масштаба.

Сталкиваясь с такой совокупностью признаков в виде сигналов различного рода, рыба или не обращает на нее внимания, или у нее возникает ориентировочная реакция как стремление «познакомиться» с предметом или явлением.

¹ Например, человек усваивает зрительную и звуковую информацию со скоростью всего 15—50 бит/с.

Количество переработанной информации и степень знакомства с источником информации будут зависеть от скорости восприятия рыбой информации и продолжительности ориентировочной реакции.

Чтобы определить скорость переработки рыбой информации, необходимо знать количество возможных сообщений и время для опознания каждого из них. Например, установлено, что зрительных образов типа «самолет», «стол», «дом» у взрослого человека порядка 1000. Следовательно, объем сообщения составляет $\log_2 1000 \approx 10$ бит. В среднем для правильного опознания достаточно предъявить изображение на 0,2 с. Отсюда скорость переработки зрительной информации у человека составляет 50 бит/с.

Количество зрительных образов у рыб определить трудно. Однако очень примерную оценку можно дать, если учесть, что наиболее важными для них являются внутривидовые, пищевые и оборонительные взаимоотношения, поэтому основное число зрительных образов у рыб связано именно с этими взаимоотношениями. Количество таких образов у рыб, по-видимому, лежит в интервале $10 \div 10^2$ и, следовательно, объем зрительного сообщения составляет примерно 3—7 бит.

Определение времени опознания зрительных образов также связано с известными трудностями. Приблизительно об этой величине можно судить в ряде случаев по времени наступления двигательной реакции при предъявлении рыбе зрительного образа (из наблюдений за поведением рыб) и времени начала биоэлектрической активности соответствующих участков головного мозга (при электрофизиологических исследованиях). В первом случае результат будет в основном завышенным, во втором — заниженным. По нашим данным и данным других авторов, время распознавания зрительного образа у рыб колеблется от 0,2 до 0,4 с. Следовательно, скорость переработки рыбами зрительной информации в оптимальных условиях составляет в среднем 15—20 бит/с.

В таких же пределах, по-видимому, лежит скорость переработки звуковой информации, так как объем звукового сообщения и время опознания звуковых и зрительных образов для рыбы примерно совпадают.

О скорости переработки информации, поступающей через органы обоняния и вкуса, можно говорить примерно в таком же приближении, как для световых и акустических сигналов, поскольку сведений о количестве обонятельных и вкусовых образов у рыб недостаточно. Известно лишь, что кроме запаха рыб своего вида, рыбы способны четко реагировать на запах других рыб, растений, животных, причем число различных запахов разных рыб может достигать 15. Известно также, что химические вещества, выделяемые одним и тем же видом рыб, могут быть различными по составу и, по-видимому, все они воспринимаются по крайней мере особями того же вида.

Исследования, проведенные Г. А. Малюкиной и Г. В. Юркевичем, Г. А. Малюкиной и С. С. Соломатиним показывают, что орган обоняния рыб, как и животных других классов, является медленно адаптирующимся сенсорным образованием, для которого латентный период составляет $10-10^2$ с и более.

Даже эти весьма отрывочные данные говорят о том, что скорость переработки информации, поступающей через орган обоняния, значительно меньше, чем скорость переработки зрительной и звуковой информации, и составляет примерно 0,1—1 бит/с.

О скорости вкусовых восприятий нельзя составить даже такого приближенного представления. Однако сравнительно большая длитель-

ность латентного периода при действии поля плотности массы на орган вкуса животных позволяет предполагать, что скорость переработки информации в этом случае также не превышает 1 бит/с.

Когда информация в световых, акустических сигналах и полях плотности массы воспринимается как совокупность большого числа простых признаков, а не в виде образов, обычно не имеет смысла говорить о переработке информации центральной нервной системой и можно ограничиться лишь рассмотрением объема информации, воспринимаемой органами чувств рыбы. Это в равной степени относится к информационной оценке воздействия тепловых, гидродинамических и электрических полей.

Об информационном воздействии на рыбу магнитных и электромагнитных полей некоторых видов говорить преждевременно, поскольку данные о их влиянии на рыбу почти полностью отсутствуют.

Помехоустойчивостью в общем случае называют способность некоторой системы противостоять воздействию помех. Помехоустойчивость объекта лова можно рассматривать с различных точек зрения и соответственно оценивать различными величинами. Дадим несколько возможных вариантов такой оценки, связывая ее с биофизической и тактической стороной воздействия физических полей на рыбу.

Биофизическая сторона помехоустойчивости отражает воздействие помех на объект лова как приемник сигналов. Помехоустойчивость в этом случае можно оценить отношением сигнал/шум, при котором рыба еще способна выделить сигнал из шума. Под отношением сигнал/шум можно понимать отношение различных величин, каждое из которых применимо к специальным видам сигналов и помех. Например, отношение мощности сигнала к мощности шума применимо к стационарным сигналам большой длительности, отношение амплитуды сигнала к среднеквадратическому значению шума — к гармоническим сигналам и т. д. Помехоустойчивость рыбы, оцененная отношением сигнал/шум, в значительной степени зависит от структуры сигналов и шумов.

Тактическая сторона помехоустойчивости связана с выполнением задачи управления объектом лова, и ее анализ сводится к оценкам эффективности управления при наличии помех. Как уже отмечалось, эффективность управления объектом лова можно оценить функциями, которые выражают плотность вероятности получения рыбой сигнала и вероятность решения задачи управления, если сигнал получен. Следовательно, помехоустойчивость объекта лова в этом случае можно оценивать двумя отношениями сигнал/шум, первое из которых такое же, как при биофизической оценке помехоустойчивости, а второе — равно величине, при которой наблюдается значительное снижение управляющего действия сигнала.

Несмотря на наглядность выражения помехоустойчивости объекта лова через отношение сигнал/шум, такая оценка не позволяет установить, какие факторы влияют на помехоустойчивость. По этой причине значительный интерес представляет информационная оценка помехоустойчивости систем. Информационную помехоустойчивость объекта лова можно охарактеризовать через избыточность информации.

Избыточность информации

$$\delta = \frac{C - R^*}{R^*}, \quad (32)$$

где R^* — скорость поступления информации; необходимая для управления объектом лова.

Очевидно, управление объектом лова в соответствии с заданием возможно, если $C > R^*$, или $\delta > 0$. Таким образом, величина δ характеризует принципиально возможную помехоустойчивость объекта лова.

К. Шеннон показал, что максимально возможная пропускная способность системы

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right), \quad (33)$$

где W — полоса пропускания системы;
 P_c и $P_{ш}$ — соответственно мощности сигнала и шума.

Мощность шумов $P_{ш}$ складывается из внутренних шумов (например, шумов в нервных каналах) $P_{вн}$ и внешних (шумов поля управления) $P_{п}$

$$P_{ш} = P_{вн} + P_{п}. \quad (34)$$

Если решить совместно уравнения (32) и (33) и учесть выражение (34), то получим предельную величину внешних шумов, при которой объект лова подвержен управляющему действию

$$P_{п} = \frac{P_c}{\frac{C}{2^{W(1+\delta)} - 1}} - P_{вн}. \quad (35)$$

Из этого выражения непосредственно видна зависимость помехоустойчивости от избыточности информации и других характеристик объекта лова как управляемой системы.

Следует отметить, что избыточность информации можно связать не только с помехоустойчивостью объекта лова. Избыточная информация в процессе управления может быть излишней, преждевременной или способствующей увеличению избыточности на следующем этапе управления.

Существуют и другие способы оценки тактической помехоустойчивости. Например, Н. Л. Теплов и К. Ю. Аграновский считают численной мерой помехоустойчивости вероятность правильного решения системой задачи, а та, в свою очередь, связывается с вероятностью правильного обнаружения сигнала. Если считать априорную вероятность появления сигнала равной единице, то вероятность правильного обнаружения сигнала можно определить по формуле

$$P_{пр} = 1 - \int_0^{u_0} p(u_{с.п}) du_{с.п}, \quad (36)$$

где $p(u_{с.п})$ — плотность распределения вероятности огибающей сигнала совместно с помехой;

u_0 — пороговое значение органа чувств рыбы.

Вероятность правильного обнаружения повышается с увеличением отношения сигнала к помехе; при заданном отношении сигнала к помехе она зависит от порогового уровня. Оценка помехоустойчивости с помощью выражения (36) пригодна, если обнаружение рыбой управляющего сигнала гарантирует выполнение цели управления.

При выполнении этого условия помехоустойчивость объекта лова можно сравнивать с потенциальной помехоустойчивостью идеального приемника и судить о степени совершенства рыбы с этой точки зрения.

О СВЯЗИ МЕЖДУ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ РАЗДРАЖИТЕЛЯ И ВЕЛИЧИНОЙ ОЩУЩЕНИЯ

Недостаточное развитие способов управления объектом лова в значительной степени обусловлено отсутствием для рыб данных о связи между интенсивностью раздражителя и величиной ощущения. Рассмотрим метод, который позволяет получить зависимость между ними для любого биологического объекта, если действие раздражителя сопровождается развитием в объекте некоторых наблюдаемых процессов активности и можно измерить пороговое значение интенсивности раздражителя, при которой тот или иной вид активности возникает.

Предлагаемый метод является в значительной степени универсальным, так как он пригоден для установления рассматриваемой связи для различных биологических объектов с учетом таких показателей раздражителя как модальность, интенсивность, длительность, пространственная и временная характеристики и т. д.

Метод определения зависимости между интенсивностью раздражителя F и величиной ощущения (возбуждения) Φ основан на свойстве распределения большого числа независимых случайных величин подчиняться нормальному закону. Если по данным большого числа измерений пороговой интенсивности раздражителя построить кривую плотности распределения, то ее отличие от кривой нормального распределения без учета погрешностей методики исследований связано с несоответствием принятого типа шкалы по оси, где откладываются значения F , закону связи между Φ и F .

Следовательно, задача состоит в том, чтобы подобрать такой тип неравномерной шкалы по этой оси, применение которой при построении кривой плотности распределения пороговой интенсивности даст график нормального распределения. Тип шкалы можно установить лишь методом подбора, т. е. путем последовательного построения нескольких графиков с различными типами неравномерных шкал. Задача облегчается тем, что связь между Φ и F весьма часто должна быть логарифмической (закон Вебера—Фехнера) или степенной (закон Стивенса). По этой причине подбор типа шкалы обычно следует начинать с построения логарифмической и степенной шкал. Для уменьшения трудоемкости выполнения работы и необходимого объема экспериментальных данных целесообразно использовать следующий порядок установления связи между Φ и F , использованный нами при исследовании действия на рыбу (*Cyprinus carpio* L.) непрерывного постоянного тока (принимали во внимание пороговые значения, соответствующие минимальной реакции):

1. Заполняется таблица экспериментальных данных:

F_i, B	n_i	N_i	$\frac{N_i}{\Sigma n_i}$	$1 - \frac{N_i}{\Sigma n_i}$	F_i, B	n_i	N_i	$\frac{N_i}{\Sigma n_i}$	$1 - \frac{N_i}{\Sigma n_i}$
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0,575	1	1	0,008	0,992	0,975	9	100	0,81	0,19
0,625	5	6	0,05	0,95	1,025	7	107	0,87	0,13
0,675	9	15	0,12	0,88	1,075	6	113	0,92	0,08
0,725	15	30	0,25	0,75	1,125	4	117	0,95	0,05
0,775	16	46	0,37	0,63	1,175	3	120	0,97	0,03
0,825	17	63	0,51	0,49	1,225	2	122	0,99	0,01
0,875	15	78	0,65	0,35	1,275	1	123	1,00	0,00
0,925	13	91	0,74	0,26					

$$\Sigma n_i = 123$$

В первый столбец заносят в возрастающем порядке в сгруппированном или несгруппированном виде значения F_i , во второй — количество значений, соответствующих каждому F_i , в третий — число значений n_i по нарастающему итогу. Заполнение четвертого и пятого столбцов не требует пояснений.

2. Данные, приведенные в последнем столбце таблицы, наносят на специальную координатную сетку. По оси абсцисс такой сетки откладывают тот или иной тип неравномерной шкалы F . По оси ординат наносят значения $1 - \frac{N_i}{\Sigma p_i}$, причем шкала подобрана таким образом, что точки, принадлежащие некоторой кривой нормального распределения, лежат на прямой линии.

3. Через нанесенные эмпирические точки проводят прямую и устанавливают, возможна ли линейная интерполяция экспериментальных данных. Для этого подсчитывают величину критерия согласия Колмогорова, равную

$$\lambda = D \sqrt{\Sigma n_i}$$

где D — максимальное отклонение статистической функции распределения для некоторого значения F_i от теоретической, устанавливаемое по отстоянию эмпирической точки от прямой.

Если значение λ оказывается меньше единицы, то можно считать, что тип неравномерной шкалы характеризует связь между Φ и F . Так, в рассмотренном примере $\lambda = 0,33$ и, следовательно, логарифмическая зависимость, отвечающая закону Вебера—Фехнера, оказалась справедливой. Аналогичная зависимость получена по данным исследования порогов некоторых реакций для ряда рыб дельты Волги при действии на них переменного непрерывного тока и на оптомоторной установке.

Приведенные примеры являются лишь иллюстрацией предлагаемого метода установления связи между Φ и F и на их основе нельзя делать каких-либо обобщений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Аграновский К. Ю. Радиокрибернетические методы управления морскими объектами. Л., «Судостроение», 1967. 360 с.

Асланова Н. Е. Поведение пелагических рыб в Черном море в период их зимовки. — «Труды совещания по вопросам поведения и разведки рыб». М., 1955, с. 144—153.

Аронов М. П. Некоторые вопросы изучения поведения рыб. — «Труды ВНИРО», 1966, т. LX, с. 189—201.

Баранов Ф. И. Техника промышленного рыболовства. М., Пищепромиздат, 1960. 696 с.

Гуревич С. Б. Эффективность и чувствительность телевизионных систем. М.—Л., «Энергия», 1964. 344 с.

Лукашов В. Н. Классификация орудий промышленного рыболовства. Калининградское книжное издательство, 1968. 42 с.

Малюкина Г. А. Слух некоторых черноморских рыб в связи с экологией и особенностями строения их слухового аппарата. — «Журнал общей биологии», 1960, т. 21, вып. 3, с. 198—205.

Малюкина Г. А. и Юркевич Г. В. О функциональных особенностях периферического аппарата обонятельной системы рыб. — В кн.: Поведение и рецепции рыб. М., «Наука», 1967, с. 114—121.

Мантейфель Б. П. Изучение поведения стайных рыб в целях усовершенствования техники их лова. — «Труды совещания по вопросам поведения и разведки рыб», 1955, с. 108—117.

Мантейфель Б. П., Протасов В. Р. Роль физики в изучении поведения рыб. — «Вопросы ихтиологии», 1963, т. 3, вып. 3, с. 433—440.

Мантейфель Б. П. и Радаков Д. В. Об изучении адаптивного значения стайного поведения рыб. — «Успехи современной биологии», 1960, т. 50, вып. 3 (6), с. 362—370.

Майзелис М. Р. Некоторые дискуссионные вопросы исследования и применения рыбозащитных устройств. — В кн.: Поведение рыб в зоне гидротехнических сооружений. М., «Наука», 1967, с. 137—155.

Мельников В. Н. Видимость сетных орудий лова в воде в связи с их уловистостью. — «Труды ВНИРО», 1962, т. 47, с. 68—113.

Мельников В. Н. Определение расстояния, с которого рыба обнаруживает источник подводного освещения. — В кн.: Научно-техническая информация ВНИРО, 1966, № 4, с. 91—96.

Мельников В. Н. Об эффективности действия света на глаза рыб. — «Вопросы ихтиологии», 1967, т. 7, вып. 1, с. 140—155.

Милсум Дж. Анализ биологических систем управления. М., «Мир», 1968. 501 с.

Никонов И. В. Лов рыбы на свет. М., «Рыбное хозяйство», 1963. 166 с.

Никонов И. В. Непрерывные способы лова рыбы. М., «Пищевая промышленность», 1968. 103 с.

Нусенбаум Л. М., Фалеева Т. И. Исследование поведения рыб в электрическом поле. — «Труды Государственного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства», 1961, т. 52, вып. 1, с. 92—93.

Праздникова Н. В. Особенности различения зрительных образов рыбами. — В кн.: Поведение и рецепции рыб. М., «Наука», 1967, с. 36—38.

Пресман А. С. Электромагнитные поля и живая природа. М., «Наука», 1968. 287 с.

Протасов В. Р. Биоакустика рыб. М., «Наука», 1965. 207 с.

Протасов В. Р. Зрение и ближняя ориентация рыб. М., «Наука», 1968. 206 с.

Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М., Физматгиз, 1962. 1679 с.

Радаков Д. В. Об особенностях оборонительного поведения стайных рыб. — «Труды ИМЖ им. А. Н. Северцова», 1961, вып. 39, с. 47—71.

Радаков Д. В. Об основах экологической теории стайного поведения. — В кн.: Поведение и рецепции рыб. М., «Наука», 1967, с. 17—19.

Урсул А. Л. Природа информации. М. «Изд-во политической литературы», 1968. 287 с.

Флеров Б. А. Обоимание рыб. — «Вопросы ихтиологии», 1962, вып. 3, с. 517—529.

Хайлов К. М. Упорядоченность биологических систем. — «Успехи современной биологии», 1966, т. 61, вып. 2, с. 198—218.

Шентяков В. А. Пресноводный электротраловый лов рыбы с применением переменного тока. М., «Пищевая промышленность», 1964. 82 с.

Beamish, T. W. H. Reaction of fish to otter trawls. Fish. Canada, N 5, 1966.

Breder, C. M. Studies on social groupings in fishes. Bull. Amer. Mus. Natur. Hist., V. 117, pt. 6, 1959.

Chapman, C. J. The importance of mechanical stimuli in fish behaviour especially to trawls. Second World Fishing Gear Congress, 1963.

Denzer, H. W. Die Elektrofischerei. Handbuch der Binnenfischerei Mitteleuropas. Ergänzungsband zu Bd. 5, 1956.

Dijkgraaf, S. The function and significance of the lateral line organs. Biol. Rev., v. 38, 1962.

Frings, H. Animals communication. „Amer. J. Psychiatry“, v. 118, N 10, 1962.

Göz, H. Über den Artund Individualgeruch bei Fischen. Zeitschn. vergl. Physiol., Bd. 29, 1941.

Halsband E. Die Beziehung zwischen Intensität und Zeitdauer des Reizes bei der elektrischen Durchströmung von Fischen. Arch. Fischerelwissenschaft, 7, N 1, 1956.

Hasler, A. The sense organs, olfactory and gustatory senses of fishes. Physiol. of Fishes, v. 2, 1957.

Jacobson, H. Information and the human ear, JASA, 23, N 4, 1951.

Kainz, E. Die „Sprache“, der Tiere. Tatsachen. Problemschau—Theorie Ferdinand Enke verlag. Stuttgart, 1961.

Koyama, T. Fishing jigs in Japan with special reference to an artificial bait made of latex sponge rubber. Second World Fishing Congress, 1963.

Kupfmüller, K. Information Schwerarbeit durch den Menschen, NTZ, N 2, 1959.

Labass, J. A. Etude des reflexes conditionnés naturels provoqués par l'aspect de la nourriture chez les Saumoneaux. Union Internat. Sci. Biol., 1959.

- Lenoble, J. Angular distribution of submarine daylight in deep water. *Nature*. V. 49, 1956.
- Morrow, J. Schooling behavior in fish. *Quarterly Rev. Bio.* V. 23, N 1, 1948.
- Quastler, H. Studies of human channel capacity. *Inform. Theory London, Symp.*, 1956.
- Rashevsky, N. Life, information theory and topology. *Bull. Math. Biophysics* v. 17, N 33, 1955.
- Schmitt, O. H. Signals assimilable by living organisms, *Bionic. Symp.*, 1963.
- Shober H. Grundlegende Bemerkungen zur Anwendbarkeit der informationstheorie auf die Optix Wiss Hochschule Elektrotechn. Ilmenau, N 3—4, 1957.
- Steward, J. L. Fundamental law for discrimination and recognition in animal sensory system. *IEEE Intern. Conv. Rec.*—pt. 9, 1963.
- Tavolga, W. & Wodinsky, I. Auditory capacities in fishes. Pure tone thresholds in nine species of marine teleosts. *Bull. Amer. Mus. Natur. Hist.*, 126, Art. 2, 179, 1963.
- Tester, A. Summary of experiments on the response of tuna to stimuli. *Second World Fishing Congress*, 1963.
- Trucco, E. On the information content of graphs. Compound symbols, Different states for each point. *Bull. Math. Bioph.* v. 18, N 3, 1956.

SUMMARY

Some problems of control over the behaviour of fish based on the energetical and information influence of contact stimulants and physical fields on fish are considered. The main methods of control over commercial species, types of control systems and characteristics of the principle elements in the systems are presented.

The main notions of the information theory being used, the methods of evaluation of a degree of uncertainty for the field of feelings and, thus, the behaviour of fish in it, are discussed. The method of assessing the amount of information in a signal and loss of information in case of noise is shown. The characteristics of the main information indices of commercial species are described.