

Министерство высшего и среднего специального образования  
Р С Ф С Р

Ленинградский государственный технический университет

На правах рукописи

УДК 627:624.04

Кандидат технических наук

С Т О Ц Е Н К О

Алексей Александрович

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ  
МОРСКИХ ПЛАНТАЖИЙ

05.23.07 - гидротехническое  
и мелководное  
строительство

05.23.17 - строительная механика

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Ленинград  
1990

Подписано в печать 11.11.90. Формат 60x84/16. Бумага писчая  
Печать офсетная. Тираж 100 экз. Заказ 461. Бесплатно  
Фотосетевная лаборатория ЦНИИ. Владивосток, Ленинская, 53

Работа выполнена в Дальневосточном ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте им. В. В. Куйбышева.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук  
Шхинек К. Н.

Доктор технических наук  
Перельмутер А. В.

Доктор технических наук  
Розанов Н. С.

Ведущее предприятие:

ДВВИМУ им. адм. Г. И. Невельского.

Защита состоится *12 июля* 1991 г. в 10 часов на специализированном совете Д. 064.38.19 при Ленинградском государственном техническом университете, г. Ленинград, ул. Политехнической

С. Д.  
Библиотеке

ической

Про  
отзыв в  
ул. Поди

Ваш  
град,

Авт

г.

Уче  
специали

В. Ф.

#### ОЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и значение работы. Рассматриваемые в работе сооружения родились и интенсивно используются в последние десятилетия в связи с активной потребностью развития производящего хозяйства в море - маркультуры. Применение специальных гидротехнических сооружений морских плантаций (гидробиотехнических сооружений - ГБТС) знаменует качественный скачок в плантационном направлении маркультуры. Разрушения ГБТС, эксплуатируемых на откром побережье, приносят огромные материальные и моральные потери и в значительной степени тормозят развитие одного из перспективных направлений производящего хозяйства. В мировой практике основой создания ГБТС является эмпирический путь. В представляемой работе впервые решен комплекс проблем инженерной теории ГБТС, направленной на построение основ проектирования прочных, устойчивых и достаточно долговечных гидробиотехнических сооружений, имеющих важное народно-хозяйственное значение.

Работа велась в рамках планов важнейших исследований республики и страны.

В расчетном отношении ГБТС обладает рядом существенных особенностей. В связи с этим возникает потребность пересмотра традиционных сторон построения инженерной теории сооружений, постановки и решения новых практических задач.

Цель и задачи работы. Целью настоящей работы является решение взаимосвязанных проблем инженерной теории гидких и полугидких гидробиотехнических сооружений

и построение на ее базе основ расчетного проектирования. Построение теории включает постановку и решение проблем загрузки сооружений; определение внутренних усилий в тросах, тросовых системах и сетчатых полнотных в статической и динамической постановках; оценку долговечности ГЭС из полимерных канатов; разработку принципов конструирования.

Объем работы. Основная часть работы состоит: предисловие, терминология, введение, семь глав, в которых раскрывается сущность и решение поставленных проблем, записаны и списки использованных источников. Работа содержит 382 страницы машинописного текста, 147 иллюстраций, 45 таблиц, библиография - 188 наименований.

Методика исследования. При решении поставленных задач использовались экспериментальные методы (модельные и натурные) при определении нагрузок и обосновании основных расчетных предположений; теоретико-экспериментальные при учете свойств материалов и построения методики расчета долговечности; теоретические - при исследовании усилий в элементах сооружений от внешних воздействий (здесь использовались современные вычислительные средства).

Научная новизна. Разработана инженерная теория ГЭС и решены следующие научные задачи, полученные новые результаты:

- проведена классификация гидротехнических сооружений с точки зрения расчета их на прочность;
- выявлены особенности ГЭС, отличающие их от традиционных сооружений, поставлены проблемы инженерной теории с учетом этих особенностей;

- предложена методика загрузки гибких сооружений, включающая формирование квазистатического поля нагрузки;

- построен и опробован способ измерения гидродинамических характеристик живых объектов в естественных условиях;

- получена и предлагается к использованию удельно-весовая характеристика гидродинамического сопротивления для ряда конкретных живых объектов;

- предложен и исследован приближенный метод расчета существенно подвижных тросов, тросовых систем и сетчатых полнотных с учетом жестких включений и ограничений по перемещениям в статической и динамической постановке;

- исследована динамика гибких вращающихся элементов ГЭС, на основе результатов исследований выделится область теней в поле нагрузки;

- разработана программная комплекс по расчету гибких ГЭС, реализующие предлагаемый метод;

- предложен и реализован инженерный подход и методика оценки долговечности с учетом конкретных условий эксплуатации сооружений, обоснованы сроки службы и оптимальные размеры сооружений;

- разработаны основные принципы расчета и конструирования якорных систем и систем подурожья-всплывания;

- разработаны нормативные материалы по проектированию ГЭС.

Практическая ценность и результаты работы. Результаты исследований и разработок на их основе рекомендации и предложения по проек-

тированы ГВЭС используются на производственных плантациях Дальневосточного, Азово-Черноморского и Балково-Балтийского бассейнов СССР, в частности, Приморским производственным объединением рыбной промышленности "Триумфальпрод", Очаковским ипидино-устричным рыбоконсервным комбинатом, Всесоюзным научно-исследовательским институтом морского рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО), Мурманским зоологическим институтом АН СССР, рыбохозяйским колхозом "Балта" Латвийской ССР, Дальневосточным филиалом научно-производственного объединения прирыболовства.

Внедрены сооружения водорослевых плантаций с экономическим эффектом 195 тыс. рублей в год при достигнутом уровне производства 65 т (пересчет 1985 года с учетом срока службы сооружений) по казды экономический эффект 1160 тыс. рублей). В 1985 году внедрены предложения по безрамной системе крепления садков в колхозе "Балта" с экономическим эффектом 50 тыс. рублей. Расчетный экономический эффект от внедрения предложений на промыслах, предусматривающу технику-экономическим обоснованием Министерства рыбного хозяйства СССР развития марикультур в Приморье составил около 5 млн. рублей.

Основные результаты изложены в нормативных материалах по проектированию гидротехнических сооружений, которые внедрены в 1985 году в Дальневосточном филиале научно-производственного объединения прирыболовства и в 1988 году во ВНИРО.

Д о с т о в е р н о с т ь полученных результатов проверена многолетней эксплуатацией внедренных сооружений, а

также путем проведения специальных натурных и модельных экспериментов. Точность, сходимость, устойчивость методов исследования усилий в статической и динамической постановке доказывается аналитически или математическими экспериментальными.

А п р о б а ц и я р а б о т н. Результаты работы докладывались на первом (г. Керчь, 1976 г.), втором, третьем и четвертом (г. Владивосток, 1978, 1980, 1982 гг.) и пятом (г. Рига, 1984 г.) Всесоюзных о д н и х по марикультуре; на Всесоюзном совещании по пространным конструкциям (г. Киев, 1977 г.); на всесоюзных школах-семинарах по методу конечных элементов (г. Рига, 1981 г.; г. Киев, 1983 г.); на итоговом всесоюзном совещании по важнейшим работам в области гидротехники в единичной пятитетке (г. Куйбышев, 1980 г.); на ежегодных региональных производственно-технических совещаниях по марикультуре ( Валентин, 1976, 1979, 1985, 1987 гг.; Посьет, 1977, 1984 гг.; Каменка, 1978, 1980 гг.; Анна, 1981, 1988 гг.; Владивосток, 1990 г.), на научно-технических конференциях Дальневосточного политехнического института, Дальневосточного технологического института рыбной промышленности, Ленинградского политехнического института, Киевского инженерно-строительного института, на кафедре военного хозяйства и морских портов Московского инженерно-строительного института (1987, 1988, 1990 гг.).

П у б л и к а ц и и. По проведенным исследованиям опубликовано: монография, 26 работ, получено 4 авторских свидетельства.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Восстановление, пополнение, улучшение качества естественных запасов морских организмов, обеспечение людей и животных пищей, промышленности сырьем, сельского хозяйства удобренными и другие важные задачи призвано решать культурное морелеие.

На наш взгляд, к настоящему времени по характеру и специфике использования технических средств в культивировании в море сложились три основных направления, имеющих выходы в аквакультуре (мелиоративное, заводское и плантационное).

Интенсивное развитие в марикультуре получило плантационное направление, как и на суше показавшее неоспоримые преимущества в развитии производящего хозяйства. Качественный скачок в методах плантационного культивирования и его результатах связан с использованием для оснащения плантаций специальных гидротехнических сооружений, которые названы нами гидротехническими (ГТС). Эти сооружения позволили создать оптимальные условия развития культур с увеличением урожайности в десятки и сотни раз, а также поставить культивирование в море на промышленную основу.

Зарубежный и отечественный опыт показал, что господствовавший до недавнего времени эмпирический путь создания сооружений, построенный главным образом на инженерной интуиции, трудоемок, требует значительных затрат времени и материальных ресурсов. Попытки применения расчетов в проектировании, но для частных ГТС, имеются в работах П.Х. Милна (Англия), К. Нособуро (Япония), Р. Фрезера (ШВА).

В настоящей работе предлагается общая инженерная теория специальных гидротехнических сооружений — база расчетного проектирования широкого круга ГТС. Расчетный путь показал существенные преимущества в строительстве, машиностроении и других отраслях.

В теории ГТС мы включили объективно сложившуюся, относительно замкнутую совокупность проблем.

1. Проблемы расчета и конструкции сооружений гидротехнических сооружений. В связи со своим назначением ГТС должны содержать элементы, выполняющие конкретные функции:

— выростные элементы, предназначенные для содержания культивируемых объектов в процессе роста их и развития;

— несущий каркас, служащий для крепления к нему выростных элементов (верхнее строение) и удержания их в районе плантации и в заданном горизонте (система удержания);

— систему вертикального удержания, содержащую плавучести, грузы и другие устройства, позволяющие помешать верхнее строение в необходимом для выращивания горизонте;

— систему горизонтального удержания, включающую якорные устройства, служащие для сохранения сооружения в пределах допустимых перемещений на плантациях.

Конструктивные особенности ГТС главным образом определяются видом культивируемых объектов, а также материальной и производственной базой хозяйства.

Простейшие П-образные одиночные элементы, например, используются для выращивания водорослей (рис. 1), выростные

П - образный элемент водорослевых и мидийных плантаций

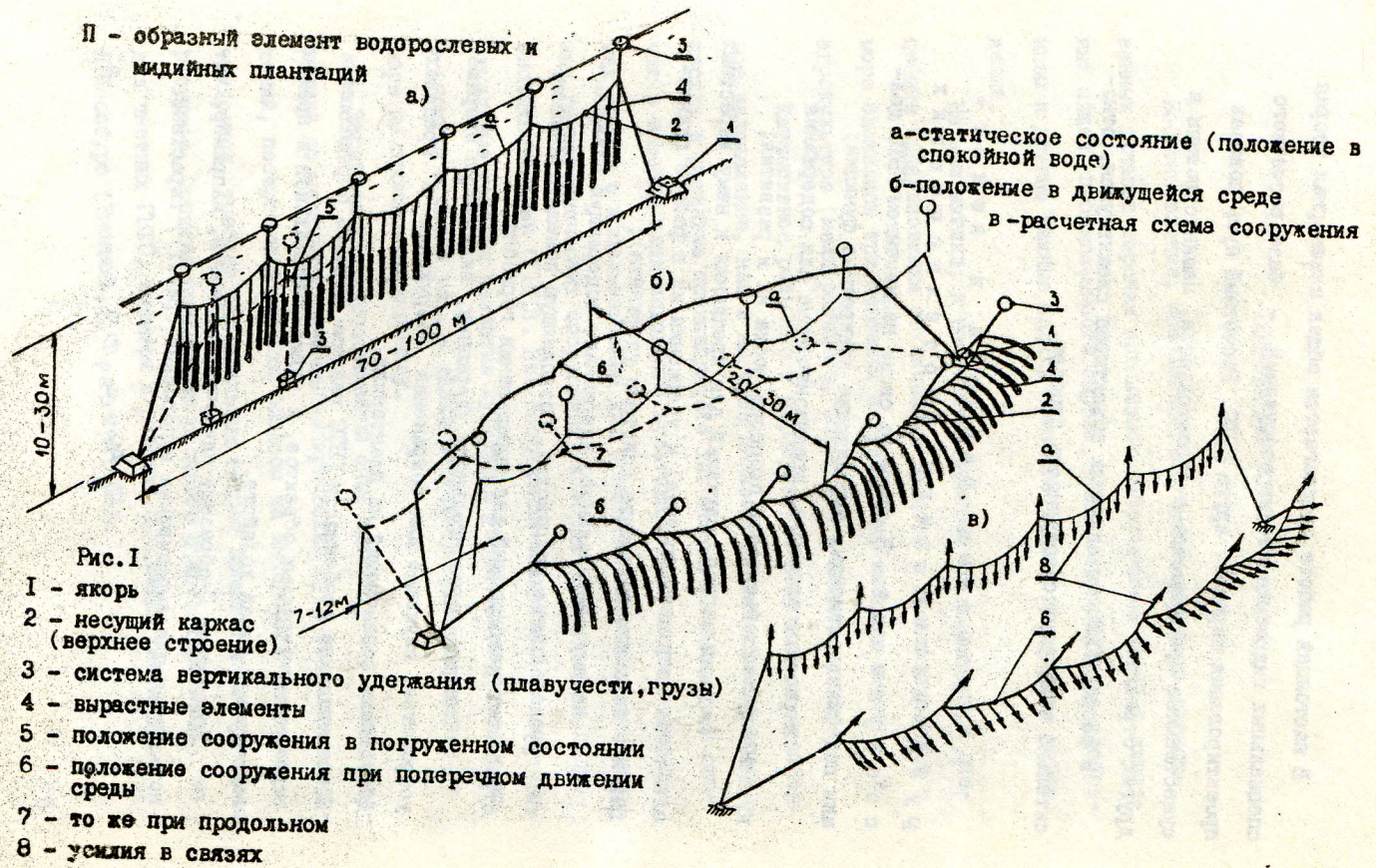


Рис. I

- 1 - якорь
- 2 - несущий каркас (верхнее строение)
- 3 - система вертикального удержания (плавучести, грузы)
- 4 - выростные элементы
- 5 - положение сооружения в погруженном состоянии
- 6 - положение сооружения при поперечном движении среды
- 7 - то же при продольном
- 8 - усилки в связях

а-статическое состояние (положение в спокойной воде)  
 б-положение в движущейся среде  
 в-расчетная схема сооружения

10

элементы в таком сооружении могут перемещаться по горизонту. При воздействии сил тяжести и выталкивающих сил усилия в элементах сооружения малы. Во время штормов при движении среды, в которой находится сооружение, эти усилия возрастают в десятки и сотни раз. Сооружение перемещается на расстоянии, соизмеримые с размерами его самого и размерами внешних воздействий. Именно при таком воздействии и разрушаются ГВТС. Известны разрушения рыбных садков в США, Японии, ГДР, СССР, ограждений в Японии, сооружений водорослевых и мидийных плантаций в СССР, КНР, НРБ.

Существенными отличиями гидротехнических сооружений от других искусственных объектов, создаваемых человеком, являются следующие.

Во-первых, растения и животные, выращиваемые с их помощью, обуславливают среду, в которой работают сооружения.

Во-вторых, назначение определяет относительно низкую капитальность ГВТС. Сроки службы расматриваемых сооружений соизмеримы с циклами развития организмов, для выращивания которых они предназначены, и определяются несколькими годами в пределах одного-двух десятилетий.

В-третьих, организмы обуславливают основные нагрузки на сооружения при внешних воздействиях (волнении, течениях, ветре и др.). Способы ухода и обслуживания плантаций при культивировании определяют технологические нагрузки.

В-четвертых, назначение определяет условия работы сооружений в агрессивной по отношению к традиционным материалам среде, что является причиной широкого применения в конструкциях гидротехнических сооружений изделий, выполненных на основе полимеров.

В-пятых, условия жизни и успешного развития культуры не регламентируют строгое сохранение заданной формы и отграничения по перемещению, а наоборот, существует потребность в больших перемещениях, так как при этом уменьшается поступление питательных веществ к организмам. Поэтому отпадают твердые требования по жесткости, что обуславливает использование сооружений из гибких нитей (тросов) и значительное перемещение точек сооружения, сопряженные с размерами самих сооружений. В-шестых, основным воздействием, вызывающим нарушение функционального назначения сооружения и целостность его элементов (т.е. разрушение), является волновое (особенно в открытых частях моря).

Волновые воздействия обуславливают динамический характер работы сооружений, а соизмеримость параметров волнового режима и размеров сооружений являются причиной их пространственной работы.

Основной вклад в расчетные усилия в элементах гидробиотехнических сооружений вносят кратковременные нагрузки (усилия от волн составляют по величине около 95 % суммарных усилий), а не постоянные и длительно действующие как в традиционных строительных конструкциях.

Ввиду специфичности рассматриваемого класса гидротехнических сооружений часто не представляется возможным приспособить громадный опыт проектирования и расчетные методики к потребностям ГВТС. Необходимо дополнение этого опыта и методов, изменения их, а порой и создания новых принципов и методов.

Так при определении внутренних усилий и перемещений требуется учитывать большие перемещения гибких сооружений, про-

странственную работу, ограничения по перемещениям и др. Решение такой существенно нелинейной задачи не может быть построено на традиционных упрощениях. Поэтому потребовалось разработать новый метод, который базируется на численной дискретизации. Из-за существенной подвижности ГВТС решить задачу внешних сил в традиционной постановке - сначала определить нагрузку, а затем усилия и перемещения - невозможно, ибо нагрузка зависит от положения сооружения, а само положение зависит от нагрузки. Задачи внешних и внутренних сил неразделимы. Ввиду этого проблеме внешних сил мы сузили до построения поля нагрузки, а проблеме внутренних сил расширили, включив в нее и определение нагрузки, соответствующей положению сооружения в среде.

Гибкие ГВТС выполняются из полимерных канатов. Полимеры способны накапливать повреждения под нагрузкой. Так как ГВТС работают в естественных природно-климатических условиях, нагрузка и усилия в элементах зависят от статистических характеристик среды. Таким образом, проблема оценки прочности (а с учетом необратимых повреждений - долговечности) гидробиотехнических сооружений неразрывно связана с изучением внешней среды (проблема среды и воздействий) и проблемами внешних и внутренних сил.

С выше перечисленными проблемами связана и проблема конструирования.

Таким образом, построение инженерной теории ГВТС включает решение относительно замкнутого комплекса из пяти взаимосвязанных проблем (среды и воздействий, внешних сил, внутренних усилий, оценки прочности, конструирования). В теории жестких сооружений эти проблемы с самого начала строго разделяются.

2. Формирование поля нагрузки на гидротехнические соору-жения. Из всех типов воздействий основной вклад в нагрузку вносит волновое. Ввиду того, что положение габарита сооружения в среде не определено, мы предлагаем сначала сформулировать поле нагрузки. Под полем нагрузки мы понимаем некоторое силовое поле в каждой точке которого известна сила (направление ее и величина), которую нужно приложить к сооружению, если оно окажется в этой точке. В работе принимается основное допущение для формирования этого поля - гидродинамические сооружения не влияют на кинематику волнового движения. Это допущение известно и применяется для сквозных гидротехнических сооружений. Для гибких ГВТС оно справедливо в большей степени, чем для жестких.

В практические определения нагрузки мы используем теорию Капто-Морисона, которая предполагает наличие двух составляющих нагрузки, обусловленных скоростным и инерционным сопротивлением объекта.

Так как основным объектом наших исследований является несущий каркас (главным образом его прочность обеспечивает углетканое культивирование), то нагрузкой на него мы считаем усилия в связях с выростными элементами и элементами системы вертикального удержания (усилия в непосредственных связях каркаса со средой незначительны).

На ряде специально поставленных экспериментов с выростными элементами (свободными и имеющими неподвижную точку крепления) показано преобладающее в сопротивлении

скоростной составляющей и то, что вектор нагрузки совпадает с вектором скорости.

Принятые допущения дают возможность определить поле нагрузки по пространственному полю скорости в волне. В работе кинематика движения жидкости определяется в детерминированной постановке по известной теории волн малой амплитуды.

Поле нагрузки зависит также от конструктивных особенностей самих сооружений, выростных элементов и параметров культивируемых организмов. Гидродинамические характеристики донных, мелководных и прикрупляющихся объектов не исследовались.

Изменение гидродинамического сопротивления живых объектов должно производиться именно в той среде, где только и возможно их существование (имеется необходимая питательная среда, солленость, температура, экологическое сообщество и др.), ибо перенос их в лабораторию или другую среду нарушает их гидродинамическое сопротивление.

В работе предлагается и исследуется способ измерения гидродинамического сопротивления в натурных условиях, основанный на принципе работы машины Агнуда. Объект движется в воде вертикально под действием движущей силы, создаваемой подъемной силой поплавка (по ней судят о силе сопротивления), а скорость вычисляется по времени прохождения известного расстояния от старта до финиша.

Предлагаемым способом исследованы сопротивления отдельных слоев водорослей, пучков из них, целых выростных элементов, отдельных садков малого объема для выращивания морского гробешка, а также гидранты с мидиями и устрицами. В результате выявлена закономерность, определяющая зависимость



гидродинамического сопротивления от массы исследуемых объектов. Для прикрепляющихся объектов и организмов, выражаемых в садках малого объема, эта зависимость выражается формулой (аналог формулы Лапко-Морисона для живых объектов)

$$R = k_0 \cdot G \cdot U^2 \cdot \sigma \quad (1)$$

$R$  - сопротивление объекта массой  $G$ , движущегося со скоростью  $U$ ;  $k_0$  - коэффициент, зависящий от объекта, вида судна и садков, он для исследованных организмов изменяется от 0,2 до 0,8  $c^2/m^2$ . На рисунках 2 и 3 показаны зависимости удельно-весовой характеристики ( $\frac{R}{G \cdot G}$ ) от скорости для коллекторов с мидиями и устрицами. Пунктирная линия ограничивает максимальные значения характеристики сопротивления (коэффициент перегрузки равен 1,2).

В соответствии с (1) поле нагрузки определяется также распределением в пространстве и во времени масс выращиваемых объектов.

3. Построение приближенного метода расчета существенно подвижных тросовых систем в поле статической нагрузки. Ввиду большой подвижности решим проблему расчета гибких ГВС при упрощающих гипотезах, применяемых для вантовых систем, подвесных дорог, линий электропередач, буксировочных канатов и других подобных сооружений, невозможно.

Для расчета существенно подвижных тросов разработан приближенный способ, позволяющий смешанным методом расчи-

Удельно-весовое сопротивление устриц на коллекторах из раковин морского гребешка

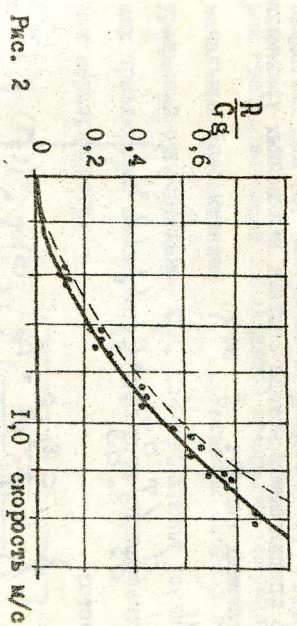


Рис. 2

Удельно-весовое сопротивление мидий на взрывочном коллекторе с вкладышами

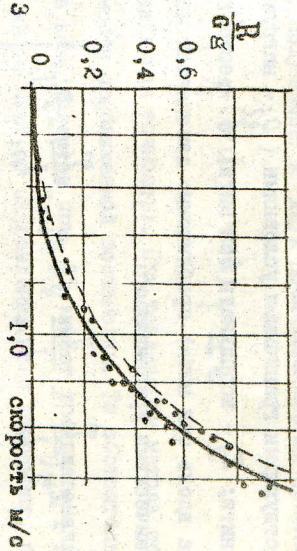


Рис. 3

Зависимость усилия в одиночном элементе от высоты волны

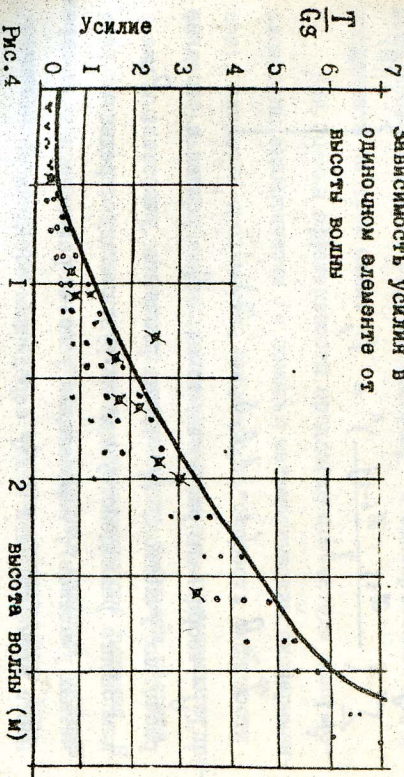


Рис. 4

•• - расчетные    x - экспериментальные    --- - наблюдаемая

тывать нить на произвольную пространственную нагрузку при больших перемещениях точек сооружения (соизмеримых с координатами). В предлагаемом методе система нелинейных уравнений (для нерастяжимых нитей):

равновесия:

$$\frac{d}{ds} \left( T \frac{dx_j}{ds} \right) = q_j, \quad (j=1,2,3),$$

неразрывности:

$$\sum_{j=1}^3 \left( \frac{dx_j}{ds} \right)^2 = 1, \quad (2)$$

условие

$$\text{Перемещения: } T \geq 0$$

о соответствующих граничным условиям ( $q_j$  - нагрузка;  $T$  - усилия в нити;  $x_j$  - координаты оси нити;  $s$  - естественная координата вдоль оси нити) приближенно заменяется нелинейными алгебраическими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} x_{i+1} j \frac{T_i}{b_i} - x_{ij} \left( \frac{T_i}{b_i} + \frac{T_{i+1}}{b_{i+1}} \right) + x_{i+1} j \frac{T_{i+1}}{b_{i+1}} = P_{ij}, \\ \sum_{j=1}^3 \left( \frac{x_{ij} - x_{i+1} j}{b_i} \right)^2 = 1, \\ T_i \geq 0, \quad (i=1,2,3,\dots,n) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

( $x_{ij}$  - координаты расчетных точек;  $T_i$  - усилия в середине расчетных участков;  $b_i$  - длина расчетных участков;  $P_{ij}$  - компоненты равнодействующей нагрузки между серединами расчетных участков), выражающими условия равновесия и неразрывности элемента нити между серединами соседних расчетных участков.

При реализации метода на современных вычислительных средствах для (3) построена итерационная процедура, в которой последовательно выполняются следующие операции. Задаются начальными приближениями  $T^{(0)}$ . Решается система линейных уравнений относительно  $x_{ij}$ . Для вычисления усилий последующих приближений используется уравнение эквивалентное уравнению неразрывности.

$$T_i^{(k+1)} = T_i^{(k)} \sqrt{\sum_{j=1}^3 \left( \frac{x_{ij} - x_{i+1} j}{b_i} \right)^2}. \quad (4)$$

Конеч итерационного процесса фиксируется по малой разнице усилий, полученных в двух последовательных приближениях:

$$\left| T_i^{(k+1)} - T_i^{(k)} \right| \leq \epsilon \quad (5)$$

( $\epsilon$  - заданная точность). При реализации метода используются особенности приближенной постановки. То обстоятельство, что матрица коэффициентов при  $x_{ij}$  имеет трехдиагональную структуру и не зависит от направления осей координат, позволило использовать для ее решения прогонку и одновременно получать координаты по трем осям.

Для оценки эффективности предлагаемого метода были исследованы аналитически (с помощью математических экспериментов): скорость сходимости, зависимость скорости сходимости от начального приближения, близость решений, полученного приближенным методом, и точного, зависимость точности расчета от количества расчетных участков, единственность решения. В общем виде вычислен определитель и обратная матрица системы уравнений при заданных усилиях, получены итерационные фор-

Мудры переходя от одного шага итерации к другому, рассмотрены задачи, имеющие точное решение, когда усилие не более, чем на одном участке равно нулю. Иными словами единственность решения обеспечивается в том случае, когда скачки или нулевым является только один участок при закреплении двух концов нити. Если же один из концов нити не закреплен, то скачки участков не должно быть. Если на двух или более участках наблюдаются усилии, равные нулю, это значит, что к нити приложена самоуправляющаяся система сил, и нить может занимать бесконечное множество положений.

Практически при любом ненулевом положительном однозначном начальном приближении итерационный процесс сходится. Скорость сходимости зависит от отношения расстояния между точками закрепления нити к ее длине (чем больше это отношение, тем скорость меньше) и от величины начального усилия. Скорость сходимости достаточно велика: требуется 10-15 итераций для достижения приемлемой точности. Количество итераций растет непропорционально числу участков и стремится к некоторой постоянной величине. Но с уменьшением задаваемой погрешности число итераций резко возрастает.

Величина смещения и усилии с увеличением количества расчетных участков приближаются к точному решению. При малой заданной точности и относительно большом количестве участков значения усилии и перемещений практически совпадают с точными.

Учет растяжимости нитей не приводит к существенной корректуры процедуры расчета, если с величинной приведенных усилии ( $EF_2$  - жесткость нити на участке)

$$\delta_2 = \frac{T_2}{1 + T_2 / (EF_2)} \quad (6)$$

проводить те же операции, что и с  $T_2$  в случае неразтяжимой нити. Рассматривается также расчет нити, имеющей заданные координаты вдоль одной или нескольких осей. Построена процедура этого расчета, основанная на предлагаемом методе.

При расчете пространственных тросовых систем естественным образом применен суперэлементный подход. Условием связи суперэлементов - одиночных нитей с соответствующими свойствами - служат уравнения равновесия узлов. При заданных значениях усилии в нитях задача становится линейной. Элементы матрицы жесткости глобальной системы уравнений инвариантны относительно систем координат. Окончание итерационной процедуры производится при достижении заданной разности усилии двух последовательных приближений.

Исследования процедуры показали те же закономерности, что и для отдельной нити. Дополнительно исследована зависимость усилии от жесткости нити. Усилии в неразтяжимой нити или тросовой системе на 5-10 % больше, чем в растяжимой, но в неразтяжимой нити усилии линейно зависят от интенсивности нагрузки (при неизменной ее форме).

На ряде примеров из практики проектирования показано использование метода и соответствующие результаты экспериментов при расчете одиночных нитей (на рис. 4 приведена зависимость усилии в П-образном элементе от высоты волны), тросовых рам садков фирмы "Бриджстоун" (Япония) (рис. 5) и рам для выращивающих морского треска (рис. 5).

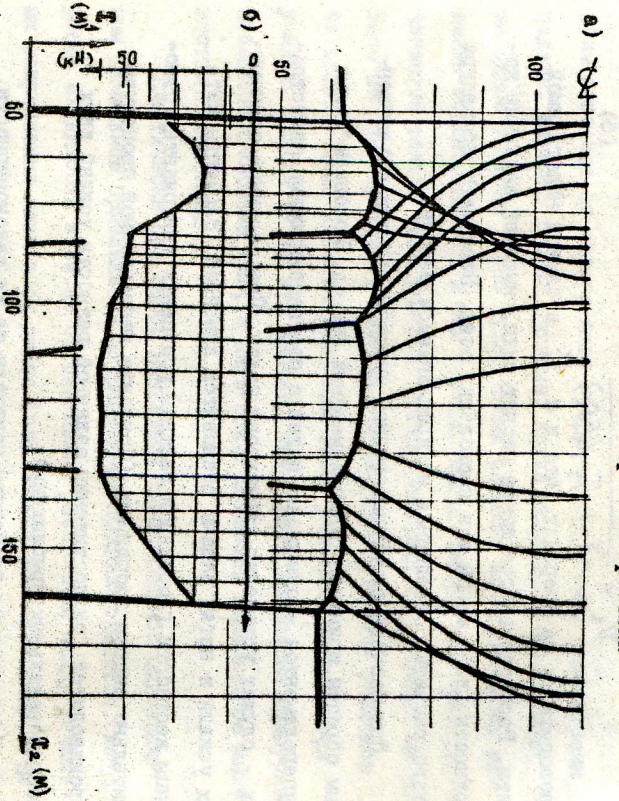


Рис. 5  
а - перемещение в плане б - усилия в нитках несущей рамы

Расчетные садки "Бриджстоун" с системой крепления ДВПИ

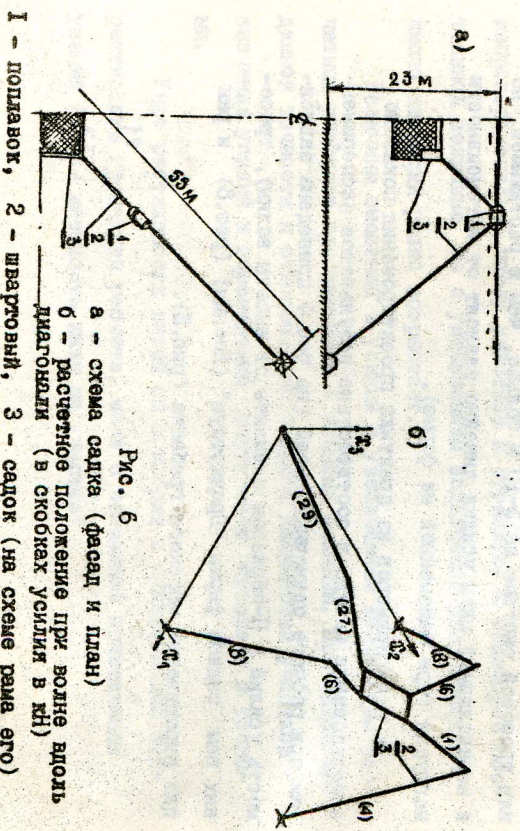


Рис. 6  
а - схема садка (фасад и план)  
б - расчетное положение при волне вдоль диагонали (в скобках усилия в кН)  
в - садок (на схеме рама его)

4. Построение и анализ приоб-  
лиженного метода расчета гиб-  
ких полотнищ. Сетные полотнища часто используются  
в качестве несущих конструкций садков, ограждений загонов,  
волверов, нересивилец. Расчетная схема сетчатых полотнищ пост-  
роена на следующих предположениях. Пренебрегая сетчатой струк-  
турой полотнища, считаем, что расположение материала в нем  
непрерывно как по поверхности оболочки, так и по толщине. Тол-  
щина полотна мала по сравнению с его размерами. Полотнище сос-  
тавлено из непрерывного семейства нитей в двух произвольных  
неортогональных направлениях. Семейства нитей соединяются сви-  
зми исключившими проскальзывание одного семейства относительно  
другого.

При такой расчетной схеме полотнище в неортогональных  
координатах описывается нелинейными уравнениями, которые при  
использовании метода расщепления разделяются на две системы  
уравнений, описывающих непрерывные семейства нитей в двух на-  
правлениях:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{ds_2} (T_v \frac{dx_j^{(v)}}{ds_2}) &= q_{2j}, \\ \sum_{j=1}^3 (\frac{d}{ds_2} x_j^{(2)})^2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

( $v=1,2$ ;  $j=1,2,3$ ), где  $T_v$  - усилия в нитках  $v$ -того направ-  
ления;  $x_j^{(v)}$  - координаты осей нитей  $v$ -того семейства;  $S_2$  -  
естественная координата вдоль средней поверхности полотни-  
ща в  $v$ -том направлении.

Реакции взаимосвязи  $q_{*j}$  находятся из условия "сшива-  
ния"

$$\left. \begin{aligned} q_{1j} + q_{2j} &= Q_j, \\ q_j^{(1)} &= x_j^{(2)}, \quad (j=1,2,3). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$



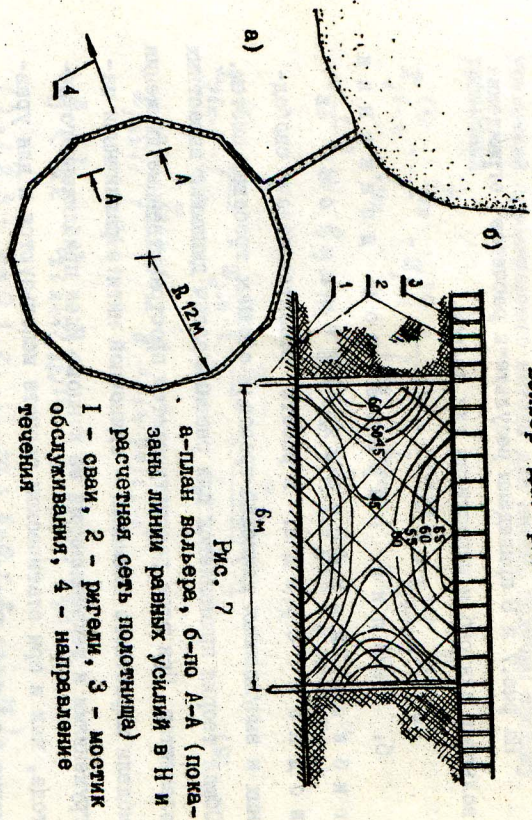


Рис. 7  
 а-план волвера, б-по А-А (показаны линии равных усилий в Н и расчетная сеть подотпуща)  
 1 - овал, 2 - ригели, 3 - мостик обслуживания, 4 - направление течения

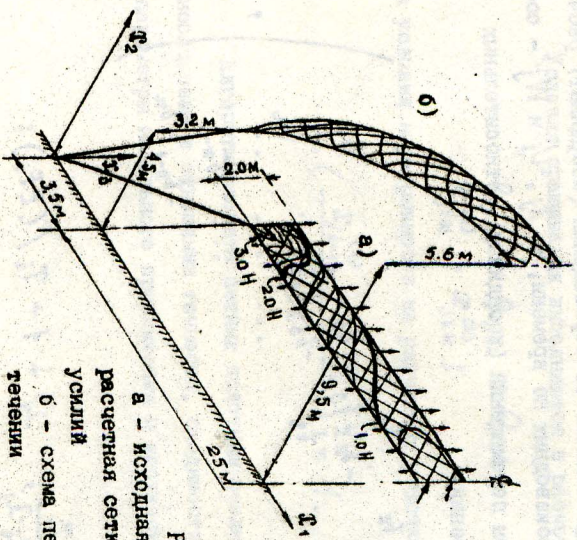


Рис. 8  
 а - исходная геометрия, расчетная сетка и линии равных усилий  
 б - схема перемещений при тчении

$$B = \Gamma C_{wi} \sqrt{\sum_{j=1}^3 (\dot{x}_{ij} - u_{ij})^2} ; \quad M = \Gamma C_{wi} ;$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n),$$

$$X_j = \begin{pmatrix} \dot{x}_{1j} \\ \dot{x}_{2j} \\ \dot{x}_{3j} \\ \dots \\ \dot{x}_{nj} \end{pmatrix}, \quad U_j = \begin{pmatrix} u_{1j} - u_{1j} \\ u_{2j} - u_{2j} \\ u_{3j} - u_{3j} \\ \dots \\ u_{nj} - u_{nj} \end{pmatrix}, \quad W_j = \begin{pmatrix} \ddot{x}_{1j} - w_{1j} \\ \ddot{x}_{2j} - w_{2j} \\ \ddot{x}_{3j} - w_{3j} \\ \dots \\ \ddot{x}_{nj} - w_{nj} \end{pmatrix}$$

( $C_{wi}$ ,  $C_{wi}$  - коэффициенты скоростного и инерционного сопротивления;  $B$  и  $M$  - диагональные матрицы;  $K_{ij}$ ,  $W_{ij}$  - соответственно скорости и ускорения среды; точками обозначены производные по времени:  $\dot{x}_{ij} = \frac{\partial x_{ij}}{\partial t}$ ,  $\ddot{x}_{ij} = \frac{\partial^2 x_{ij}}{\partial t^2}$ ). Решение уравнений (12) построено на явной схеме Рунге-Кутты пятого порядка для системы дифференциальных уравнений второго порядка.

Проверка соответствия теоретической модели реальной картине движения выростных элементов показала хорошее совпадение качественных и количественных оценок усилий в связях выростного элемента (рис. 9). Рассмотрены движения систем с конечным количеством степеней свободы при действии волнения. Как видно из решения (рис. 11), при волнении поворачивается гентения и вращению корня выростного элемента относительно точки крепления его к несущему каркасу. Оно иллюстрирует кинематику закручивания гибких выростных элементов, объясняет хаотичность "намотки" на несущие каналы.

Проанализировано явление резонанса при движении выростного элемента в воде. Из решения можно установить, что с

уменьшением влияния на сопротивление ускорения опасность резонанса уменьшается (рис. 9, 10), а при отсутствии этого сопротивления его вообще нет. Уменьшение скоростного сопротивления ведет к большей опасности резонанса.

Решение динамических задач послужило основой для назначения коэффициентов динамичности, с их помощью вносятся коррективы в методику загрузки и конструирования. При конструировании рекомендуется распределять нагрузку вдоль несущего каната, исключить непосредственное крепление поплавков и сапков одной нитью, предусматривать увеличение массы или лобового (скоростного) сопротивления стабилизирующего груза на выростном элементе (особенно для растений и животных, обрешивая масса которых соизмерима с плотностью воды).

Рассмотрен также вопрос о формировании поля вязкостатической нагрузки с учетом относительного движения выростного элемента и среда.

Рассмотрены величина и продолжительность импульсов усилий в связях выростных элементов с несущим каркасом (рис. 12) и установлены тем самым тени в поле нагрузки.

6. Разработка инженерного подхода к оценке долговременной прочности гидротехнических сооружений и. Проблема оценки прочности в большинстве конструкций из полимерных канатов решалась путем сравнения действующих и допускаемых усилий. При таком подходе необратимая потеря прочности не учитывается. Мы применяем общую кинематическую теорию прочности к расчету рассматриваемых сооружений.

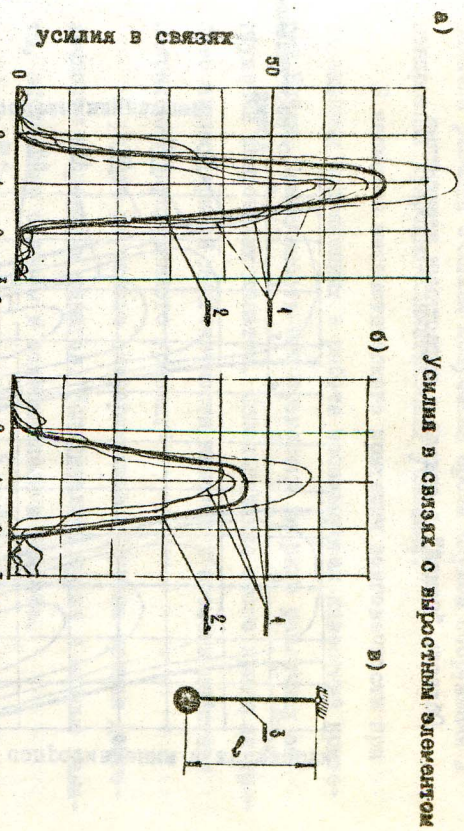


Рис. 9  
 а, б - длина связи  $L=2m$ , дм; в - расчетная схема  
 1 - реализации в эксперимент, 2 - расчет, 3 - связь

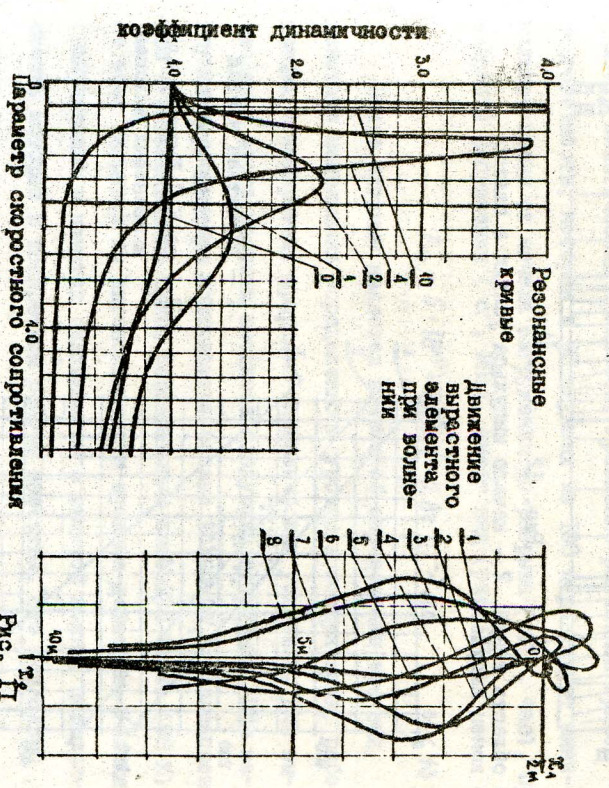


Рис. 10  
 Цифры - параметры инерционного сопротивления (цифры - параметры инерционного сопротивления)

Рис. 11  
 Цифры - последовательные моменты времени

Область "теней" в связях с выросшими элементами

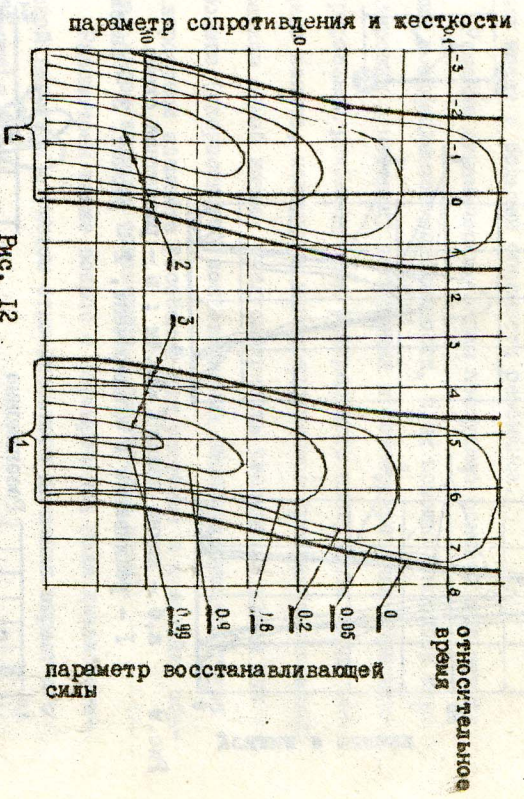


Рис. 12

1 - область теней, 2 - начало импульса усилии в связи, 3 - конец импульса

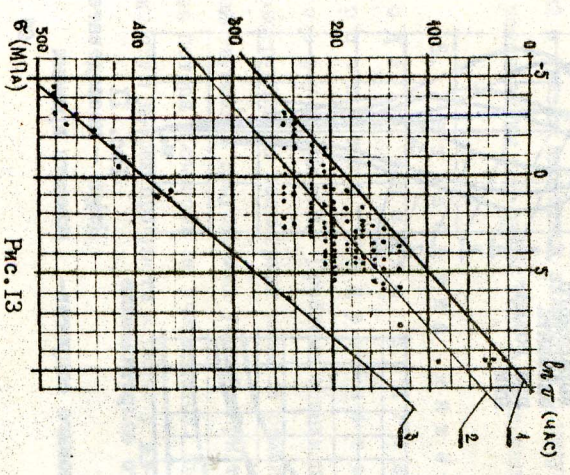


Рис. 13

Кривая долговечности капроновых канатов

1 - расчетная кривая  
2 - средняя кривая  
3 - по Е.С. Журкову для капроновых волокон

Задачей расчета считается получение срока службы сооружений в конкретных природно-климатических условиях.

В качестве математического критерия долговечности при переменных напряжениях в работе используется известный критерий Вейли. Применимость его проверена на ряде различных нагружений капроновых канатов. Использование этого критерия требует знания кривой долговечности канатов и времени действия напряжения определенного уровня.

В работе на основе экспериментов получена кривая долговечности капроновых канатов. Испытывались сухие и мокрые канаты, облученные солнцем и содержащиеся в тени.

Длительная прочность капроновых канатов в процессе ползучести при постоянном напряжении подчиняется известной зависимости кинематических процессов. Уравнение расчетной кривой долговечности, которая в 98 случаях из 100 гарантирует минимальное время от начала нагружения до разрыва ( $t_{zp}$ , час), при заданном напряжении ( $\sigma$ , МПа), имеет вид (рис. 13)

$$t_{zp} = 6 \cdot 10^4 \cdot \sigma^p \quad (-5,8 \cdot 10^{-2} \sigma) \quad (13)$$

Более сложным является вопрос об определении времени действия напряжения определенного уровня в сооружениях, работающих в конкретных природно-климатических условиях. Для выяснения этого времени вводятся следующие допущения. При нагружении сооружения учитываются только волновые, гравитационные и выветривающие силы, составляющие основную часть (98%) от всех нагрузок по интенсивности и времени действия. Усилия (напряжения) в канатах связываются с высотой волны, повторяемость которой в конкретном районе известна. Это позволяет



подсчитать время действия напряжения соответствующего этой высоте. В качестве минимального расчетного промежутка времени принимается один месяц - в этот промежуток относительно устойчивыми являются характеристики повторяемости природных факторов (в том числе и волн). Величина биомассы в пределах месяца принимается постоянной и равной максимальному ее значению (в среднем изменение биомассы водорослей за месяц составляет около 5 % от товарной).

Проедатура расчета долговечности построена следующим образом. Сооружение (нерастяжимая нить с соответствующими закрепленими) рассчитывается на нагрузку от единичной биомассы при всех возможных сочетаниях параметров волнения, соответствующих заданной высоте. Из всех расчетов выбираются максимальные усилия, соответствующие этой высоте, независимо от направления волнения, положения гребня и расчетной точки. Затем по ежемесячной продуктивности и повторяемости высот волн 3 % обеспеченности в системе подсчитываются усилия и время их действия. И, наконец, в соответствии с критерием Бейли оценки долговечности находится коэффициент износа за один цикл выращивания организмов. Срок службы сооружения - величина, обратная коэффициенту износа.

Проведена оценка долговечности одиночных элементов, эксплуатируемых в одном из районов Приморского края. Результаты подсчетов сроков службы и относительной стоимости канатов (стоимость несущих элементов эксплуатируемых в настоящее время сооружений принята равной единице) показана на рисунке 14. Очевидна эффективность предлагаемого способа оценки долговечности. Полученные сроки службы сооружений имеют высокую

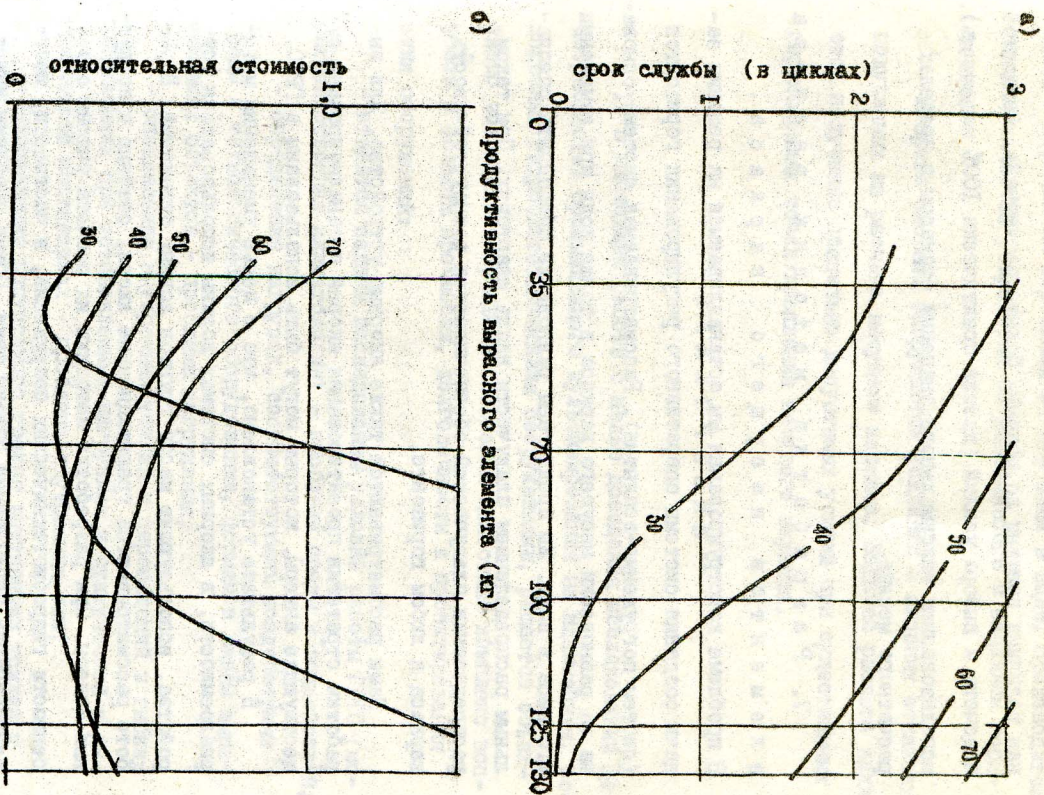


Рис. 14 (цифры - окружность канатов по ГОСТ 10293-77)

- оптимизация конструкций, проектирование несущих элементов, систем удержания (якорных и подерживающих систем), систем погружения-всплытия и другие - проблема конструирования.

Решенные вопросы направлены на изучение условий эксплуатации и построение основ проектирования, работавших в водной среде, специальных сооружений (область гидротехнических сооружений), на разработку методов расчета расматриваемых сооружений на прочность, устойчивость и долговечность (область строительной механики).

2. В работе на основе анализа существующих сооружений, тенденций их развития, специально поставленных и проведенных испытаний и анализа разрушений, выявлена особенность гидротехнических сооружений и поставлены проблемы, решение которых должно обеспечивать научно обоснованную постановку расчетного проектирования ГЭС в конкретных условиях их эксплуатации.

3. В работе показано, что ввиду новизны и специфичности рассматриваемого подкласса гидротехнических сооружений не представляется возможным полностью приспособить огромный опыт проектирования объектов гидротехнического строительства и существующие методики к нуждам расчета ГЭС, в частности, к изучению условий их эксплуатации, расчету существенно подвизких гибких сооружений, оценке долговечности, принципам конструирования. Поэтому потребовалось дополнение этого опыта и методики, изменение и переработка их, создание новых методов и принципов.

4. Установлена необходимость развития нового направления при изучении условий эксплуатации ГЭС - морехозяйственной климатологии. Сформулированы основные задачи этого направления. Выделены те из них, которые необходимы для получения данных о воздействиях на гидротехнические сооружения.

5. В настоящей работе предлагается методика затруживания сооружений на основе формирования поля нагрузки. Экспериментально показано преимущественное значение скоростной составляющей нагрузки для гибких выростных элементов.

Разработан способ измерения гидродинамического сопротивления живых объектов в натурных условиях. Этот способ исследован теоретически и экспериментально. С его помощью получены гидродинамические характеристики отдельных живых объектов, субстратов и выростных элементов с морскими организмами, включая садки малого объема. При этом выявлена удельно-весовая характеристика сопротивлений выростных элементов и их деталей, позволяющая проектировать сооружения на заданную урожайность. Поле нагрузки определяется кинематикой движения среды и массой организмов.

6. Предлагается приближенный метод расчета существенно подвизких тросовых систем при пространственной работе под действием произвольной статической нагрузки. Для сложных тросовых систем метод построен на суперэлементном подходе к расчету геометрически нелинейных конструкций. Теоретические и экспериментальные исследования оходимости, устойчивости, точности вычислений показали высокую эффективность предлагаемого метода. Этот метод в сочетании с методом расчленения используется для расчета сетчатых конструкций.



1. Арский Г. В., Пронкин В. И., Стоценко А. А. О некоторых вопросах проблемы прочности морских сооружений маркикультуры и путей ее решения: Научно-технические проблемы маркикультуры. - Владивосток: Ш Вsesоюзное совещание, 1980, с. 16-18.
2. Белоконов М. А., Стоценко А. А. Графический способ определения давления в узлахх соединенных гибких канатов // Прочность и устойчивость инженерных конструкций: Междузв. сб. / Алтайск. политехн. ин-т.-Барнаул, 1989. - С. 86-92.
3. Бултров А. К., Корвникова Т. Н., Стоценко А. А. Исследование свайных анкеров гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 1990. № 7.-С. 29-32.
4. Давлетшин В. Х., Стоценко А. А. Измерение усилий в элементах установок для выращивания морского гребешка в натурных условиях: Гидравлика и гидротехника. - Владивосток: тр. ДВПИ, 1975, т. 109, с. 55-60.
5. Давлетшин В. Х., Стоценко А. А. Комбинированный двухмассовый системы в жидкости: Гидравлика и гидротехника. - Владивосток: тр. ДВПИ, 1976, т. 109, с. 60-66.
6. Давлетшин В. Х., Стоценко А. А. Измерение усилий в элементах установки для выращивания морского гребешка в натурных условиях: Материалы Всесоюзного совещания по морской аквакультуре. -М.: ВНИРО, 1976, с. 104-106.
7. Доценко С. И., Стоценко А. А. Определение срока службы сооружений из синтетических тросов: прочность и устойчивость инженерных конструкций. -Барнаул: Межузловский сборник, 1981, вып. 3, с. 38-52.

8. Доценко С. И., Стоценко А. А. Кривая долговечности гап-роновых канатов: Прочность и устойчивость инженерных конструкций. -Барнаул: Межузловский сборник, 1985, вып. 5, с. 87-93.
9. Доценко С. И., Стоценко А. А. Оценка долговечности гидротехнических сооружений из полимерных канатов // Трещино-стойкость материалов и элементов конструкций: Ш Всесоюзный симпозиум по механике разрушения (г. Житомир, 30 окт.-1 ноября 1990 г.). -Киев: ИПП АН УССР, 1990. -ч. III, с. 38.
10. Диденко Г. В., Зарубова А. М., Стоценко А. А. Природно-климатические исследования для проектирования морских хоз-завств: Технические средства маркикультуры. -М.: 1986, с. 11-15.
11. Мальков Н. М., Стоценко А. А. Динамика вырастных элементов гидротехнических сооружений // Прочность и устойчивость инженерных конструкций: Междузв. сб. / Алтайский политехнический институт. -Барнаул, 1987. -С. 64-67.
12. Корвникова Т. Н., Стоценко А. А. Расчет пространственных тросовых систем: Нелинейные задачи строительной механики и оптимизация конструкций. -Киев: НУСИ, 1978, с. 115-118.
13. Корвникова Т. Н., Стоценко А. А. Грунтовыи анкер: авт. св. СССР № 1308709. -М., 1987. - 4 с. (Изобретения в СССР и за рубежом, № 1).
14. Корвникова Т. Н., Стоценко А. А. Определение предельной нагрузки для полуметрических связей // Прочность и устойчивость инженерных конструкций: Междузв. сб. / Алтайск. политехнический ин-т. -Барнаул, 1989. - с. 92-98.
15. Пронкин В. И., Стоценко А. А. Устройство для измерения усилий в гибких нитях: авт. св. СССР № 892244. -М., 1981.

16. Пронкин Б.И., Стопенко А.А. Устройство для дистанционного размещения под водой и подъема исследуемого объекта. Положительное решение государственной научно-технической экспертизы изобретений на заявку № 4015903/31-13 (01.01.86). - М., 1987. - 8 с.
17. Пронкин Б.И., Стопенко А.А. Нагрузки на гибкие гидротехнические сооружения // Прочность и устойчивость инженерных конструкций: Межвуз. сб. / Алтайский политехнический институт. - Барнаул, 1987. - С. 59-64.
18. Стопенко А.А. О сроках проведения испытаний натуральных установок для разведения марикультур: Долговечность строительной конструкции и материалов в условиях Дальнего Востока. - Владивосток: ДВГУ, 1977, вып. 1, с. 133-141.
19. Стопенко А.А. О решении волновых задач методом расчленения: Метод конечных элементов и строительная механика. - Л.: ЛПИ, 1976, № 394, с. 98-103.
20. Стопенко А.А. Приближенный расчет существенно подвижных тросовых систем: Прочность и устойчивость инженерных конструкций. - Барнаул: Межвузовский сборник, 1979, вып. 2, с. 82-96.
21. Стопенко А.А. Разработка методики расчета и конструирования морских гидротехнических сооружений: Ил о научно-техническом достижении. - Владивосток: Приморский ЦНТИ, 1980, вып. 130-82. - 4 с.
22. Стопенко А.А. Расчет существенно подвижных тросовых систем: Ил о научно-техническом достижении. - Владивосток: Приморский ЦНТИ, 1981, вып. № 07-81. - 4 с.

42

23. Стопенко А.А. Сооружения водорослевых планкций, эксплуатируемых в условиях открытого моря: Ил о научно-техническом достижении. - Владивосток: Приморский ЦНТИ, 1982, вып. 130-82. - 4 с.
24. Стопенко А.А. Основы проектирования гидротехнических сооружений в условиях Тихоокеанской шельфовой зоны СССР: научно-технические проблемы марикультуры. - Владивосток: ДУ Всесоюзное свещение, 1983, с. 109-111.
25. Стопенко А.А. и др. Временные рекомендации по выращиванию мидий в рыболовецких колхозах Крымской области. - М.: ВНИРО, 1984. - 32 с.
26. Стопенко А.А. Гидротехнические сооружения. - Владивосток: ДВГУ, 1984. - 136 с.
27. Стопенко А.А. Устройство для выращивания морских организмов: авт. св. СССР № 1123608. М., 1984. - 4 с.
28. Стопенко А.А. Разработка основ проектирования гидротехнических сооружений в условиях Тихоокеанской шельфовой зоны СССР: Проспекты завершающих НИР и ОКР ДВНТИ. - Владивосток, 1985, с. 72-74.
29. Стопенко А.А. Вопросы проектирования гидротехнических сооружений: Технические средства марикультуры. - М.: ВНИРО, 1986, с. 4-11.
30. Стопенко А.А. Динамика подвижных тросовых систем / ДВНТИ. - М., 1986. - С. 15-27. - Деп. в ЦНИИТЭИРХ (Библиографический указатель ВНИИТИ, депонированные научные работы, № 5 (175) М., 1986, с. 135, № 738 - Рх.).
31. Стопенко А.А. Морехозяйственная климатология / ДВНТИ. - М., 1986. - С. 11-15. - Деп. в ЦНИИТЭИРХ (Библиографический указатель ВНИИТИ, депонированные работы, № 5 (175), к., 1986, с. 135, № 738 - Рх.).