

УДК 626/627

DOI: 10.31774/2222-1816-2019-2-165-184

**А. И. Тищенко**

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,  
Российская Федерация

## **РАСЧЕТ ПЛИТ КРЕПЛЕНИЯ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ МЕЛИОРАТИВНОЙ СЕТИ С ЦЕЛЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ**

Целью исследований являлся расчет плит крепления в нижнем бьефе гидротехнических сооружений мелиоративной сети для увеличения их эксплуатационной надежности. На всем протяжении времени существования человека и выращивания им сельскохозяйственной продукции человеком применялся полив сельхозкультур с помощью оросительных систем (начиная с простейших и до настоящего времени с армированием их гидротехническими сооружениями различного назначения). Опыт эксплуатации мелиоративных систем в различных странах мира (в т. ч. и в России) показал, что вопросы надежности в какой-то степени отражались в отчетах по оросительным системам и в научных публикациях. Конкретное применение для мелиоративных сооружений (в виде теории надежности) они нашли в последние десятилетия прошлого века. Элементы теории надежности нашли отражение в работах российских и зарубежных ученых. В этих работах события делятся на «вероятные» и «маловероятные». Такое деление перестало удовлетворять и проектировщиков, и разработчиков, которым на современном этапе необходимы количественные методы исследования надежности. Гидротехнические сооружения на деривационных системах применяются такие же, как и на оросительных системах равнинной местности. Отличие заключается в том, что деривационные системы возводятся в предгорных и горных районах Российской Федерации, где рельеф местности имеет резкие переломы. Материалами для достижения поставленной цели послужили теоретические зависимости в научных и учебных литературных источниках с их преобразованием с помощью математического аппарата. В методическом отношении для определения надежной прочности крепления водоводов оросительной сети железобетонными плитами руководствовались рекомендациями сводов правил, справочными данными и методическими рекомендациями. Новизна данных исследований состоит в методике расчета, учитывающей динамические нагрузки с добавлением дополнительного кинетического давления. Кинетическое давление существенно влияет на устойчивость плит крепления нижнего бьефа гидротехнического сооружения при пропуске через него эксплуатационных расходов воды.

Ключевые слова: деривационные гидромелиоративные системы, гидротехнические сооружения, надежность конструктивных элементов, вероятность безотказной работы.

**A. I. Tishchenko**

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,  
Russian Federation

## **CALCULATION OF FASTENING PLATES IN TAILWATER POOL OF LAND RECLAMATION HYDROTECHNICAL STRUCTURES FOR INCREASING THEIR OPERATIONAL RELIABILITY**

The purpose of the research was to calculate the fastening plates in the tailwater pools of reclamation hydraulic structures to increase their operational reliability. Throughout the period of human existence and agricultural crops cultivation, irrigation of agricultural crops with irrigation systems was used (starting with the simplest and up to the present time reinforcing them with hydraulic structures for various purposes). The operating experience of reclamation systems in various countries of the world (including Russia) showed that reliability issues were reflected to some extent in irrigation systems reports and scientific publications. They found specific application for land reclamation facilities (in the form of a reliability theory) in the last decades of the last century. Elements of the theory of reliability are reflected in Russian and foreign scientists papers where events are divided into “probable” and “unlikely”. Such division has ceased to satisfy both designers and developers, who need quantitative methods for studying reliability in modern times. The used hydraulic structures on the diversion systems are the same as on the irrigation systems of the flat terrain. The difference is that the diversion systems are built in the piedmont and mountainous regions of the Russian Federation, where the terrain has sharp fractures. The material for achieving this goal were theoretical dependencies in scientific and educational literature with their transformation using the mathematical apparatus. In a methodological sense, to determine the reliable fixing strength of the irrigation water pipelines with reinforced concrete plates, the recommendations of codes of practice, reference data and methodological recommendations were used. The novelty of these studies lies in the method of calculation, taking into account the dynamic loads with the addition of additional kinetic pressure. Kinetic pressure significantly affects the stability of the fixing plates of the downstream hydraulic structure when the operating water discharge pass through it.

Key words: diversion hydroreclamation systems, hydraulic structures, reliability of structural elements, non-failure operating probability.

**Введение.** Проблема надежности гидротехнических сооружений существует с давних времен. На протяжении всего времени существования человека и выращивания им сельскохозяйственной продукции человеком применялся полив сельхозкультур с помощью оросительных систем (начиная с простейших и до настоящего времени с армированием их гидротехническими сооружениями различного назначения).

Цель настоящих исследований – расчет плит крепления в нижнем бьефе гидротехнических сооружений мелиоративной сети для увеличения их эксплуатационной надежности.

Опыт эксплуатации мелиоративных систем в различных странах мира (в т. ч. и в России) показал, что вопросы надежности в какой-то степени отражались в отчетах по оросительным системам и в научных публикациях. Конкретное применение для мелиоративных сооружений (в виде теории надежности) они нашли в последние десятилетия прошлого века. Элементы

теории надежности нашли отражение в работах Ц. Е. Мирцхулавы [1, 2], В. С. Алтунина [3], Б. Д. Кауфмана [4, 5], И. А. Долгушева [6], Ю. М. Косиченко [7, 8], С. М. Васильева [9], В. Н. Щедрина [10] и многих других [11–19].

В этих работах события делятся на «вероятные» и «маловероятные». Такое деление перестало удовлетворять и проектировщиков, и разработчиков, которым на современном этапе необходимы количественные методы исследования надежности. Гидротехнические сооружения на деривационных системах применяются такие же, как и на оросительных системах равнинной местности. Отличие заключается в том, что деривационные системы возводятся в предгорных и горных районах Российской Федерации, где рельеф местности имеет резкие переломы.

Проектирование деривационных оросительных систем требует повышенной ответственности проектировщиков в выполнении задач, поставленных перед ними. Допущенные ошибки и недостаточно обоснованные решения создают необоснованные экономические расходы.

**Материалы и методы.** Материалами для достижения поставленной цели послужили теоретические зависимости из научных и учебных литературных источников с их преобразованием с помощью математического аппарата. В методическом отношении для определения надежной прочности крепления водоводов оросительной сети железобетонными плитами руководствовались рекомендациями сводов правил, справочными данными и методическими рекомендациями.

Новизна данных исследований состоит в методике расчета, учитывающей динамические нагрузки с добавлением дополнительного кинетического давления. Кинетическое давление существенно влияет на устойчивость плит крепления в нижнем бьефе гидротехнического сооружения при пропуске через него эксплуатационных расходов воды.

В теории надежности к основным терминам и понятиям относятся:

изделие (объект), система, элемент, отказ, исправность и некоторые другие.

Основными объектами на деривационных мелиоративных системах, как и на всех оросительных системах, являются водопроводящие каналы и гидротехнические сооружения на них. Нарушение целостности налаженной и надежной работы мелиоративной системы зависит от выхода из строя даже одного незначительного объекта – гидротехнического сооружения. Выход из строя одного сооружения может парализовать работу части системы, а в частности, нарушить поливной режим одного или нескольких хозяйств. Последствием этого является уменьшение урожая сельскохозяйственных культур и снижение экономического эффекта от полива.

**Надежность** системы или объекта характеризует их свойство сохранять свою работоспособность. Вероятность и среднее время безотказной работы, коэффициент готовности и другие характеристики относятся к количественным показателям надежности. Вероятность безотказной работы объекта в течение некоторого времени  $t$ , т. е.  $P(t)$ , называют **надежностью**, а вероятность  $R(t) = 1 - P(t)$  – **ненадежностью**.

Надежность имеет точный смысл, так как можно ее вычислить, оценить, измерить, предсказать и обеспечить необходимую надежность гидромелиоративного объекта. Срок работы сооружения зависит от правильного функционирования некоторых его элементов: подвижных частей, герметизации уплотнений и стыковых соединений, наличия запасных частей на базе или на складе, регулярного проведения ремонтных работ, соблюдения режима эксплуатации и др. В этом смысле надежность играет исключительно важную роль [4, 12, 15, 18].

Все отказы элементов, сооружений, каналов, приводящие к временной остановке работы гидромелиоративной системы в целом или отдельных ее участков, можно подразделить на четыре основные группы [1–3, 15, 18]:

- отказы по вине проектировщиков;

- повреждения, которые возникают из-за дефектов, допущенных при строительстве;

- аварии и поломки (внезапные отказы) в процессе эксплуатации;

- отказы по причине старения (усталость материала, климатические условия и др.) или постепенные отказы.

Эти четыре независимые группы повреждений, каждая из которых имеет свои специфические особенности, определяют вид кривой распределения вероятностного времени исправной работы объекта.

Сущность этого вопроса можно пояснить следующими примерами:

- интенсивность отказов по вине проектных и строительных организаций имеет вид функции, убывающей в зависимости от времени;

- появление внезапных отказов возможно на протяжении всего периода эксплуатации, и интенсивность их почти не зависит от времени, т. е. является величиной постоянной;

- постепенные отказы, возникающие по причине старения материала конструкции, оказывают влияние на надежность с определенного момента.

Чтобы обеспечить надежную работу гидротехнических сооружений на продолжительный период времени, следует вести учет и анализ данных наблюдений о работе и состоянии эксплуатируемых объектов. На основании этих данных можно выявить объекты или элементы с высокими интенсивностями отказов и учесть их в новых разработках.

В период учета отказов необходимо отмечать следующее:

- дату получения информации;

- время выхода из строя узла или элемента и его пуска;

- функциональные особенности объекта и качество выполнения этих функций;

- характерные признаки отказа и его продолжительность;

- меры по устранению причин отказа и др.

По всем этим данным составляются дефектные ведомости в таблич-

ной форме, производится систематизация сведений по определенным группам и признакам, строятся диаграммы и составляются вариационные ряды [4, 15–18].

Оценка надежности гидромелиоративных систем в целом или их элементов, а также отдельных объектов сводится к нахождению вероятностей отказов (как технических, так и экологических) и корреляционных связей между ними. Экологический и технический отказы имеют тесную связь между собой, и при этом экологический отказ является прямым следствием технического отказа [15, 18].

Например, в период орошения сельскохозяйственных культур зачастую происходит забивка трубчатых гидротехнических сооружений плавником (скошенной с откосов канала сорной растительностью), что влечет за собой перелив воды через дамбы канала верхнего бьефа и затопление прилегающих территорий. Чем дольше будет длиться отказ сооружения, тем большая территория прилегающих земель будет затоплена, а в конечном счете заболочена.

В этом случае надежность  $P(t)$ , ч, будет иметь вид:

$$P(t) = 1 - R_{\max}(t),$$

где  $R_{\max}(t)$  – максимальная ненадежность, ч.

Чтобы оценить максимальную ненадежность  $R_{\max}(t)$ , необходимо определить вероятности технического  $R_T(t)$ , ч, и экологического  $R_Э(t)$ , ч, отказов.

Вероятность (риск) технического отказа гидромелиоративной системы в любой момент времени определяется функциональной зависимостью от вероятностей технических отказов отдельных элементов, входящих в данную систему [15, 18]:

$$R_T(t) = \Phi[r_{Ti}(t)].$$

Структурные функции  $\Phi$  (аналитические зависимости для описания

связей между элементами системы по их надежности) можно получить с помощью структурного анализа, теории графов, методов максимума правдоподобия, метода наименьших квадратов и математической логики [4, 10, 13, 18]. Чтобы определить вероятности отказов элементов  $r_{Ti}$ , следует знать плотности распределения эксплуатационных ситуаций и установленных предельных состояний, при достижении которых наступает отказ.

Вероятность экологического отказа  $R_э(t)$  определяется по тем же правилам, что и для технического отказа. Только необходимо предварительно определить, какой именно элемент системы может вызвать экологический отказ.

Расчетами надежности можно предотвратить наступление у конструкции или элемента предельного состояния. Предельное состояние или отказ наступает в том случае, когда внутренние напряжения в элементе достигают предельных значений и элемент становится непригодным к нормальной эксплуатации.

На основании положений свода правил СП 41.13330.2012 [20] предусмотрены методы расчета гидротехнических сооружений, конструкций и элементов на силовые воздействия по двум предельным состояниям, а именно:

- по потере несущей способности или непригодности к эксплуатации;
- по непригодности к нормальной эксплуатации.

Согласно этому своду правил расчет по прочности бетонных и железобетонных элементов по предельным усилиям производится из условия, что усилие от внешних нагрузок и воздействий  $F$  (кН, кН·м) в рассматриваемом сечении не должно превышать предельного усилия  $F_{ult}$  (кН, кН·м), которое может быть воспринято элементом в этом сечении, т. е.:

$$F \leq F_{ult}. \quad (1)$$

Если руководствоваться этой формулой, надежность гидротехниче-

ских сооружений мелиоративных систем определяется следующими зависимостями:

- при действии изгибающих моментов:

$$\gamma_{lc}\gamma_n M \leq \gamma_c \gamma_b R_{bt} W_t; \quad (2)$$

- при действии сжимающих и растягивающих усилий вдоль продольной оси элемента:

$$\gamma_{lc}\gamma_n N \leq \gamma_c \gamma_s R_s A_s, \quad (3)$$

где  $\gamma_{lc}$  – коэффициент по сочетанию нагрузок, при основном сочетании нагрузок  $\gamma_{lc} = 1$ ;

$\gamma_n$  – коэффициент надежности по назначению, для сооружений III класса ответственности  $\gamma_n = 1,15$ ;

$M$  – изгибающий момент, кН·м;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы сооружения, принимаемый по строительным нормам и правилам на проектирование отдельных видов гидротехнических сооружений,  $\gamma_c = 0,7 \dots 1,2$ ;

$\gamma_b$  – коэффициент условий работы бетона, для основного сочетания нагрузок и воздействий  $\gamma_b = 0,9$  [20];

$R_{bt}$  – расчетное сопротивление бетона на растяжение, для класса бетона В20  $R_{bt} = 0,9$  МПа;

$W_t$  – момент сопротивления для растянутой грани сечения, определяемый в предположении упругой работы бетона;

$N$  – продольное усилие в железобетонном элементе, кН;

$\gamma_s$  – коэффициент надежности по арматуре, для предельных состояний первой группы принимается  $\gamma_s = 1,15$ ;

$R_s$  – расчетное сопротивление арматуры, для предельных состояний первой группы, для класса арматуры А240  $R_s = 210$  МПа;

$A_s$  – площадь сечения арматуры (см<sup>2</sup>), определяется по формуле:



$$A_s = \pi d^2 / 4,$$

где  $\pi$  – математическая константа, которая выражает отношение длины окружности к ее диаметру;

$d$  – диаметр стержневой арматуры, см.

Левая часть зависимостей (1)–(3) представляет собой расчетное предельное значение усилия в элементе с учетом коэффициентов надежности по сочетанию нагрузок  $\gamma_{lc}$  и назначению  $\gamma_n$ , а правая часть выражает несущую способность сечения с учетом коэффициента условий работы сооружения  $\gamma_c$ , коэффициента условий работы бетона  $\gamma_b$  и коэффициента надежности по арматуре  $\gamma_s$ .

Расчет элементов гидротехнических сооружений по предельным состояниям второй группы (по образованию, раскрытию и закрытию трещин, а также по деформациям) аналогичен расчету их по формуле (1). Так, например, при расчете элементов по образованию трещин должно соблюдаться условие:

$$a_{cr} \leq \gamma_c \Delta_{cr}, \quad (4)$$

где  $a_{cr}$  – расчетная ширина раскрытия трещин, мм;

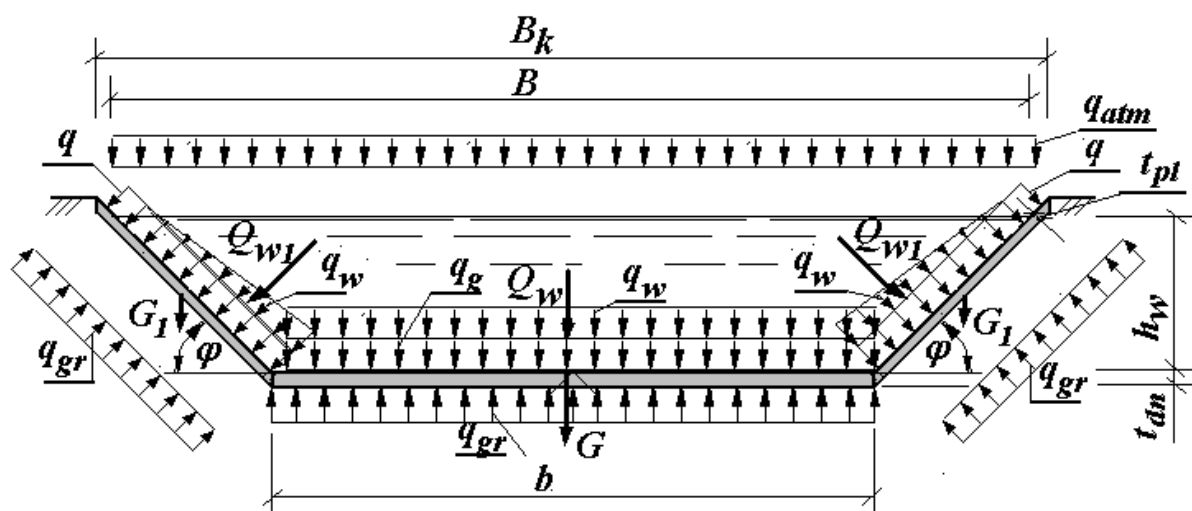
$\Delta_{cr}$  – допускаемая ширина раскрытия трещин, мм.

Анализируя выражения (1)–(4), можно отметить, что метод расчета элементов гидротехнических сооружений по предельным состояниям является детерминированным. В то же время учитываются и статистические распределения механических характеристик материалов и нагрузок. В связи с этим данный метод условно является полувероятностным, что позволяет работникам проектных организаций гарантировать надежность, безопасность и эксплуатационную пригодность конструктивных элементов с вероятностью, близкой к 100-процентной.

**Результаты и обсуждение.** С целью подтверждения практической значимости зависимостей (2)–(4) для обеспечения надежности железобе-

тонного крепления земляного русла канала мелиоративной сети определим надежность жесткого крепления в нижнем бьефе сооружения на Большом Ставропольском канале, используя данные материалов натурных исследований, выполненных нами [15] на ряде сетевых сооружений мелиоративных систем.

Наиболее сложный эксплуатационный случай характеризуется таким состоянием жесткого крепления сечения мелиоративного канала и сочетанием нагрузок, при которых усилия в монолитном креплении дна достигают максимальных значений. Для расчета выделяем полосу крепления канала шириной 1 м в поперечном направлении (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Расчетная схема нагрузок на крепление канала**

На рисунке 1 приведены следующие обозначения:

$b$  – ширина канала по дну,  $b = 20,6$  м;

$B$  – ширина канала между урезами воды,  $B = 40,6$  м;

$B_k$  – ширина канала по верху (между гребнями дамб),  $B_k = 45$  м;

$t_{dn}$  – толщина крепления дна,  $t_{dn} = 0,30$  м;

$t_{pl}$  – толщина плит крепления,  $t_{pl} = 0,15$  м;

$h_w$  – глубина воды в канале,  $h_w = 5,0$  м;

$q_{atm}$  – атмосферное давление,  $q_{atm} = 98,1 \text{ кН/м}^2 = 0,0981 \text{ МПа}$  [21, 22];

$q_w$  – интенсивность давления воды на рассматриваемый элемент, кН/м;

$q_g$  – распределенная нагрузка (интенсивность давления) от собственного веса рассматриваемого элемента, кН/м;

$q_{gr}$  – интенсивность противодействия грунта основания, кН/м;

$Q_w$  – объемное давление воды на дно, кН;

$Q_{w1}$  – объемное давление воды на откосное крепление, кН;

$G$  – собственный вес крепления дна, кН;

$G_1$  – собственный вес крепления откоса, кН.

На рисунке 2 представлена схема сосредоточенных усилий, действующих на крепление дна канала.

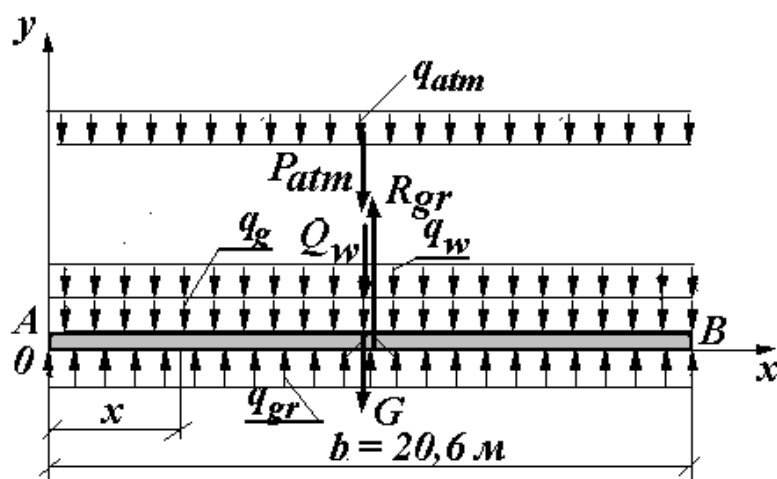


Рисунок 2 – Схема к расчету нагрузок на крепление дна

Методика расчета объемной задачи заключается в следующем.

1 Определяем числовые значения сосредоточенных сил.

1.1 Атмосферное давление на поверхность воды  $P_{atm}$ , кН:

$$P_{atm} = q_{atm} b a \gamma_{f2} = 98,1 \cdot 20,6 \cdot 1,0 \cdot 1,2 = 2425,0 \text{ кН},$$

где  $a$  – ширина полосы крепления,  $a = 1$  пог. м = 100 см;

$\gamma_{f2}$  – коэффициент надежности для полезной нагрузки,  $\gamma_{f2} = 1,2$ .

1.2 Вес объемного отсека воды:

$$Q_w = \gamma_w h_w b a \gamma_{fw} = 10 \cdot 5 \cdot 20,6 \cdot 1 \cdot 1 = 1030 \text{ кН},$$

где  $\gamma_w$  – удельный вес воды,  $\gamma_w = 10$  кН/м<sup>3</sup>;

$\gamma_{fw}$  – коэффициент надежности по нагрузке, для воды  $\gamma_{fw} = 1$ .

1.3 Вес жесткого покрытия дна канала:

$$G = \gamma_b t_{dn} b \alpha \gamma_{f1} = 25 \cdot 0,30 \cdot 20,6 \cdot 1 \cdot 1,1 = 170 \text{ кН},$$

где  $\gamma_b$  – удельный вес железобетона,  $\gamma_b = 25 \text{ кН/м}^3$ ;

$\gamma_{f1}$  – коэффициент надежности для постоянной нагрузки,  $\gamma_{f1} = 1,1$ .

2 Определяем расчетную и нормативную равномерно распределенную нагрузку (кН/м) на дно канала:

$$q = (P_{atm} + Q_w + G) / b = (2425 + 1030 + 170) / 20,6 = 175,97 \text{ кН/м}, \quad (5)$$

$$q^n = (P_{atm} + Q_w + G) / b \gamma_f = (2425 + 1030 + 170) / 20,6 \cdot 1,13 = 154,35 \text{ кН/м},$$

где  $\gamma_f$  – среднее значение коэффициента надежности по нагрузке,  $\gamma_f = 1,13$ .

3 Определяем ординату расчетного реактивного давления (реакцию противодействия грунта основания  $R_{gr}$ , кН) по рекомендации И. А. Сивулиди [23]:

$$R_{gr} = (\gamma_{gr} - \gamma_w) b a t_f \gamma_{f3} / (1 + p) = (26,6 - 10) 20,6 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,9 / (1 + 0,7) = 90,52 \text{ кН},$$

где  $\gamma_{gr}$  – удельный вес грунта основания, для песка средней плотности

$$\gamma_{gr} = 26,6 \text{ кН/м}^3;$$

$t_f$  – толщина фильтрационного слоя,  $t_f = 0,5 \text{ м}$ ;

$\gamma_{f3}$  – коэффициент надежности для грунта основания,  $\gamma_{f3} = 0,9$ ;

$p$  – пористость, для песка средней плотности  $p = 0,7$ .

Полученные сосредоточенные усилия справедливы в случае статической нагрузки, когда слой воды неподвижен. В реальных условиях дно канала выполняется с определенным продольным уклоном и поток движется по руслу с некоторой скоростью  $v$ , в связи с чем изменяется усилие  $Q_w$ . К этому усилию добавляется кинетическое давление  $Q_{wk}$ , которое по рекомендациям А. И. Богомолова, К. А. Михайлова, П. Г. Киселева [21, 22] определяется по формуле:

$$Q_{wk} = \omega v^2 \gamma_w / g = 82,4 \cdot 2,18^2 \cdot 10 / 9,81 = 399,18 \text{ кН},$$

где  $Q_{wk}$  – дополнительное давление воды при ее движении со средней скоростью потока в живом сечении, кН;

$\omega$  – площадь живого сечения потока,  $\omega = 82,4 \text{ м}^2$ ;

$v$  – средняя скорость в живом сечении потока,  $v = 2,18 \text{ м/с}$ ;

$g$  – ускорение сил тяжести,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

В результате получим следующее значение расчетной и нормативной равномерно распределенной нагрузки на дно поперечного сечения канала:

$$q = (P_{atm} + Q_w + Q_{wk} + G) / b = (2425 + 1030 + 399,18 + 170) / 20,6 = 195,4 \text{ кН/м}, \quad (6)$$

$$q^n = q / \gamma_f = 195,4 / 1,13 = 172,9 \text{ кН/м}. \quad (7)$$

4 Находим показатель гибкости железобетонной полосы  $\alpha$  на упругом основании [23]:

$$\alpha = \pi E_{gr} b a^3 / (E_b I),$$

где  $\pi$  – математическая константа, которая выражает отношение длины окружности к ее диаметру,  $\pi = 3,14$ ;

$E_{gr}$  – модуль деформации грунта основания,  $E_{gr} = 9,36 \text{ Н/мм}^2$ ;

$E_b$  – модуль упругости железобетона,  $E_b = 27,5 \cdot 10^3 \text{ Н/мм}^2$ ;

$I$  – момент инерции сечения полосы крепления,  $I = b t_{dn}^3 / 12, \text{ см}^4$ ;

$t_{dn}$  – толщина крепления дна (см. рисунок 1), м:

$$I = a t_{dn}^3 / 12 = 100 \cdot 30^3 / 12 = 225000 \text{ см}^4.$$

Подставив значения в формулу (7), получим:

$$\alpha = \pi E_{gr} b a^3 / (E_b I) = 3,14 \cdot 9,36 \cdot 2060 \cdot 100^3 / 27500 \cdot 225000 = 9,78.$$

5 Определяем максимальное давление  $p_{\max}^n$  (МПа) на грунт под концами балки (рисунок 2), применив рекомендации И. А. Симвулиди [23]:

$$p_{\max}^n = \frac{23816 - 29\alpha}{13440 + 29\alpha} q^n = \frac{23816 - 29 \cdot 9,78}{13440 + 29 \cdot 9,78} 172,9 = 296,5 \text{ МПа.}$$

6 Для вычисления максимального момента  $M_{\max}$  (кН·м) в середине пролета определяем параметр  $a_2$  по формуле [23]:

$$a_2 = \frac{15564 q}{13440 + 29\alpha} = \frac{15567 \cdot 195,4}{13440 + 29 \cdot 9,78} = 221,6 \text{ кН/м,}$$

$$M_{\max} = 0,021a_2b^2 = 0,021 \cdot 221,6 \cdot 20,6^2 = 1974,8 \text{ кН·м.}$$

7 Ординаты поперечных сил вычисляем по формуле того же автора:

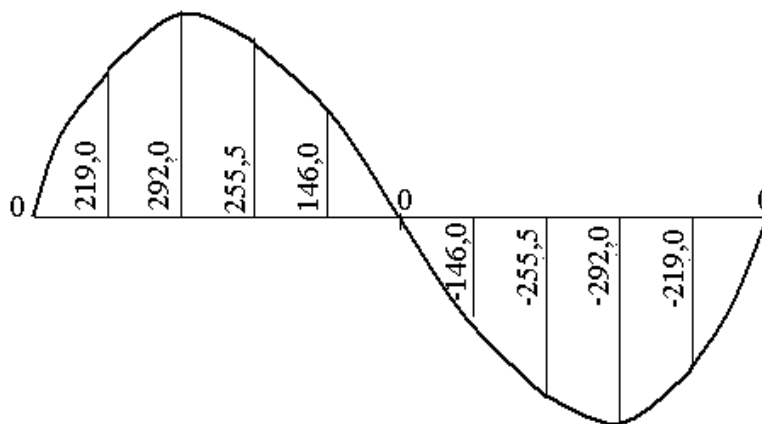
$$Q_x = \frac{2a_2x}{3b^2} (x - b)(2x - b),$$

где  $x$  – расстояние от постоянного начала до рассматриваемого сечения, м.

Значениями  $x$  задаемся через  $0,1b$ . По построенной эпюре поперечных сил находим  $Q_{\max}$  (кН). Расчеты своим в таблицу 1, по данным которой строим эпюру поперечных сил (рисунок 3).

**Таблица 1 – Значения поперечных сил для построения эпюры  $Q$**

$x, \text{ м}$	0	2,06	4,12	6,18	8,24	10,3	12,36	14,42	16,48	18,54	20,6
$Q, \text{ кН}$	0	219,0	292,0	255,5	146,0	0,0	-146,0	-255,5	-292,0	-219,0	0,0



**Рисунок 3 – Эпюра поперечных сил**

8 Максимальное значение поперечной силы  $Q_{\max} = 292$  кН. По максимальному моменту в середине пролета,  $M_{\max} = 1974,8$  кН·м, определяем площадь сечения продольной арматуры  $A_s$  (см<sup>2</sup>) по формуле [20]:

$$A_s = R_b a x / R_s = 11,5 \cdot 100 \cdot 3,29 / 210 = 18,02 \text{ см}^2,$$

где  $R_b$  – расчетное сопротивление бетона, для класса В20  $R_b = 11,5$  МПа;

$x$  – величина сжатой зоны бетона (см), определяется по формуле:

$$x = h_0 - \sqrt{h_0^2 - \frac{M_{\max}}{0,5R_b b}} = 27 - \sqrt{27^2 - \frac{197480}{0,5 \cdot 11,5 \cdot 2060}} = 3,29 \text{ см};$$

$h_0$  – рабочая (полезная) высота поперечного сечения расчетной полосы дна,  $h_0 = t_{dn} - a = 30 - 3 = 27$  см;

$a$  – защитный слой бетона,  $a = 3 \dots 5$  см;

$R_s$  – расчетное сопротивление рабочей арматуры, для класса арматуры А240  $R_s = 210$  МПа.

По найденной площади  $A_s = 18,02 \text{ см}^2$  принимаем (на 1 пог. м) 9Ø16 А240 ( $A_s = 18,10 \text{ см}^2$ ) с шагом 70 мм.

9 Проводим расчет по прочности для изгибаемого элемента на действие поперечных сил при соблюдении следующего условия:

$$Q_{\max} = 292 \text{ кН} \leq \varphi_{b1} R_b a h_0 = 0,3 \cdot 11,5 \cdot 100 \cdot 27 = 931,5 \text{ кН}, \quad (8)$$

где  $\varphi_{b1}$  – коэффициент, принимаемый по СП [20] равным 0,3.

Данное условие выполняется.

10 Производим расчет изгибаемого железобетонного элемента дна канала на действие поперечных сил по наклонному сечению с соблюдением условия:

$$Q_{\max} = 292 \text{ кН} \leq Q_b + Q_{sw} = \frac{\varphi_{b2} R_{bt} a h_0^2}{C} + \varphi_{sw} q_{sw} C, \quad (9)$$

где  $Q_b$  – поперечная сила, воспринимаемая бетоном в наклонном сечении, кН;

$Q_{sw}$  – поперечная сила, воспринимаемая поперечной арматурой в наклонном сечении, кН;

$\varphi_{b2}$  – коэффициент, принимаемый равным 1,5;

$C$  – длина проекции наклонного сечения на продольную ось элемента, принимается не менее  $1,0 h_0$  и не более  $2,0 h_0$ , см [20];

$\varphi_{sw}$  – коэффициент, принимаемый равным 0,75;

$q_{sw}$  – усилие в поперечной арматуре на единицу длины элемента, кН/см<sup>2</sup>:

$$q_{sw} = \frac{Q_{\max}^2}{8R_{bt}ah_0^2} = \frac{292^2}{8 \cdot 0,09 \cdot 100 \cdot 27^2} = 1,624 \text{ кН/см}^2.$$

Подставив в зависимость (9) числовые значения, найдем:

$$Q_{\max} = 292 \text{ кН} \leq \frac{1,5 \cdot 0,09 \cdot 100 \cdot 27^2}{1,5 \cdot 27} + 0,75 \cdot 1,624 \cdot 1,5 \cdot 27 = 292,33 \text{ кН}.$$

Условие выполняется. Поперечную арматуру принимаем конструктивно [20], диаметром 6 мм с шагом 150 мм.

Так как условия (8) и (9) выполняются, то проверку по раскрытию трещин не делаем.

### **Выводы**

1 Нагрузки, приведенные на рисунках 1 и 2, учитывают влияние атмосферного давления, которое в литературных источниках по надежности гидротехнических сооружений во внимание не принималось. В связи с этим нами получена теоретическая зависимость (5) для определения расчетной интенсивности равномерно распределенной нагрузки с учетом атмосферного давления на дно поперечного сечения канала.

2 Новизна данных исследований состоит в методике расчета, учитывающей динамические нагрузки с добавлением дополнительного кинетического давления, входящего в зависимость (6). Кинетическое давление существенно влияет на устойчивость плит крепления нижнего бьефа гидротехнического сооружения при пропуске через него эксплуатационных расходов воды.

### **Список использованных источников**

1 Мирцхулава, Ц. Е. Надежность гидромелиоративных сооружений / Ц. Е. Мирцхулава. – М.: Колос, 1974. – 280 с.

2 Мирцхулава, Ц. Е. О критериях надежности при проектировании гидромелиоративных сооружений / Ц. Е. Мирцхулава // Доклады ВАСХНИЛ. – 1972. – № 2. – С. 39–41.



3 Алтунин, В. С. Особенности взвесенесущего потока в канале и расчет надежности / В. С. Алтунин, Т. А. Алиев // Гидротехническое строительство. – 1989. – № 7. – С. 11–16.

4 Кауфман, Б. Д. Оценка надежности гидротехнических сооружений при динамических воздействиях в условиях неполноты исходной информации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.07 / Кауфман Борис Давидович. – СПб., 2015. – 36 с.

5 Кауфман, Б. Д. К оценке надежности сооружения и системы «сооружение – основание» в рамках динамической теории сейсмостойкости / Б. Д. Кауфман, А. Е. Скворцова // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 12. – С. 44–50.

6 Долгушев, И. А. Повышение эксплуатационной надежности оросительных каналов / И. А. Долгушев. – М.: Колос, 1975. – 136 с.

7 Косиченко, Ю. М. Вопросы безопасности и эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / Ю. М. Косиченко // Природообустройство. – 2008. – № 3. – С. 67–71.

8 Косиченко, Ю. М. Высоконадежные конструкции противотриационных покрытий каналов и водоемов, критерии их эффективности и надежности / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 8. – С. 18–25.

9 Васильев, С. М. Повышение устойчивости и эффективности использования агроландшафтов аридной зоны в условиях постоянного и циклического орошения / С. М. Васильев. – Ростов н/Д.: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки», 2006. – 364 с.

10 Щедрин, В. Н. Орошение сегодня: проблемы и перспективы / В. Н. Щедрин. – М.: ЦНТИ «Мелиоводинформ», 2004. – 255 с.

11 Мамбетов, Э. М. О надежности гидротехнических сооружений / Э. М. Мамбетов // Вестник КГУСТА. – Бишкек, 2011. – Т. 2, № 2. – С. 151–157.

12 Hirsch, W. M. Cannibalization in multicomponent systems and the theory of reliability / W. M. Hirsch, M. Meisner, C. H. Boll // Naval Res. Logist. – 1968. – Vol. 15, № 1. – P. 331–360.

13 Mirtshoulava, Ts. E. Investigation and forecast of sediment motion from, position of reliability and probability theories / Ts. E. Mirtshoulava // Proc. 15th JANR Congress. – Istanbul, 1973. – Vol. 2. – P. 231–238.

14 Евдокимов, С. В. Оценка надежности гидротехнических сооружений / С. В. Евдокимов, Т. В. Дормидонтова // Гидротехническое строительство. Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2012. – № 1. – С. 64–68.

15 Тищенко, А. И. Сетевые гидротехнические сооружения: монография / А. И. Тищенко. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2008. – 247 с.

16 Тищенко, А. И. Проблема продления жизненных ресурсов сетевых гидротехнических сооружений / А. И. Тищенко // Интеграция науки и образования – стратегия устойчивого развития водно-мелиоративного комплекса страны: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию выпуска первого мелиоратора России. – Новочеркасск: Лик, 2013. – С. 163–166.

17 Тищенко, А. И. Обеспечение надежной работы сбросных гидротехнических сооружений / А. И. Тищенко // Техносферная безопасность, надежность, качество, энергоснабжение: материалы 14-й Междунар. науч.-практ. конф. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2012. – Вып. 14, т. 3. – С. 156–161.

18 Созаев, А. А. Обоснование параметров эксплуатационной надежности облицованных каналов в условиях предгорной зоны: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07 / Созаев Ахмед Абдулкеримович. – Новочеркасск, 2008. – 24 с.

19 Юрченко, И. Ф. Планово-предупредительные мероприятия повышения надежности мелиоративных объектов / И. Ф. Юрченко // Природообустройство. – 2017. – № 1. – С. 73–77.

20 Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87: СП 41.13330.2012: утв. М-вом регион. развития Рос. Федерации 29.12.11: введ. в действие с 01.01.13. – М.: Минрегион России, 2015. – 68 с.

21 Богомолов, А. И. Гидравлика / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. – Изд. 2-е. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.

22 Киселев, П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.

23 Симвулиди, И. А. Расчет инженерных конструкций на упругом основании: учеб. пособие для строит. спец. вузов / И. А. Симвулиди. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 576 с.

## References

1 Mirtskhulava Ts.E., 1974. *Nadezhnost' gidromeliorativnykh sooruzheniy* [Reliability of Land Reclamation Structures]. Moscow, Kolos Publ., 280 p. (In Russian).

2 Mirtskhulava Ts.E., 1972. *O kriteriyakh nadezhnosti pri proektirovanii gidromeliorativnykh sooruzheniy* [On reliability criteria for the design of hydromelioration facilities]. *Doklady VASKHNIL* [Reports of the Academy of Agricultural Sciences], no. 2, pp. 39-41. (In Russian).

3 Altunin V.S., Aliev T.A., 1989. *Osobennosti vzvesenesushchego potoka v kanale i raschet nadezhnosti* [Features of a suspended flow in canal and calculation of reliability]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Journal of Hydraulic Engineering], no. 7, pp. 11-16. (In Russian).

4 Kaufman B.D., 2015. *Otsenka nadezhnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy pri dinamicheskikh vozdeystviyakh v usloviyakh nepolnoty iskhodnoy informatsii. Avtoreferat diss. d-ra tekhn. nauk* [Evaluation of the reliability of hydraulic structures under dynamic effects in the context of incompleteness of the initial information. Abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 36 p. (In Russian).

5 Kaufman B.D., Skvortsova A.E., 2014. *K otsenke nadezhnosti sooruzheniya i sistemy «sooruzhenie – osnovanie» v ramkakh dinamicheskoy teorii seysmostoykosti* [Assessment of reliability of the structure and the “structure – base” system within the framework of the dynamic theory of seismic resistance]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Journal of Hydraulic Engineering], no. 12, pp. 44-50. (In Russian).

6 Dolgushev I.A., 1975. *Povyshenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti orositel'nykh kanalov* [Improving the Operational Reliability of Irrigation Canals]. Moscow, Kolos Publ., 136 p. (In Russian).

7 Kosichenko Yu.M., 2008. *Voprosy bezopasnosti i ekspluatatsionnoy nadezhnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy meliorativnogo naznacheniya* [Issues of safety and operational reliability of hydrotechnical structures for land-reclamation purposes]. *Prirodobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 3, pp. 67-71. (In Russian).

8 Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2014. *Vysokonadezhnye konstruksii protivofil'tratsionnykh pokrytiy kanalov i vodoemov, kriterii ikh effektivnosti i nadezhnosti* [Highly-Reliable Structures of Membranes for Channels and Reservoirs, their Efficiency and Reliability Criteria]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Journal of Hydraulic Engineering], no. 8, pp. 18-25. (In Russian).

9 Vasil'ev S.M., 2006. *Povyshenie ustoychivosti i effektivnosti ispol'zovaniya agrolandshaftov aridnoy zony v usloviyakh postoyannogo i tsiklicheskogo orosheniya* [Increasing the sustainability and efficiency of using agrolandscapes of the arid zone under conditions of constant and cyclic irrigation]. Rostov n/D., “Bull. universities. Northern-Caucasus Region. Tech. Sciences” Publ., 364 p. (In Russian).

10 Shchedrin V.N., 2004. *Oroshenie segodnya: problemy i perspektivy* [Irrigation Today: Issues and Prospects]. Moscow, TSNTI Meliovodinform Publ., 255 p. (In Russian).

11 Mambetov E.M., 2011. *O nadezhnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [On reliability of hydraulic structures]. *Vestnik KGUSTA* [Bull. KSUTA]. Bishkek, vol. 2, no. 2, pp. 151-157. (In Russian).

12 Hirsch W.M., Meisner M., Boll C.H., 1968. Cannibalization in multicomponent systems and the theory of reliability. *Naval Res. Logist*, vol. 15, no. 1, pp. 331-360. (In Russian).

13 Mirtshoulava Ts.E., 1973. Investigation and forecast of sediment motion from position of reliability and probability theories. *Proc. 15<sup>th</sup> JAHR Congress*. Istanbul, vol. 2, pp. 231-238. (In English).

14 Evdokimov S.V., Dormidontova T.V., 2012. *Otsenka nadezhnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Reliability estimation of hydraulic engineering constructions]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arkhitektura* [Hydraulic Engineering. Bull. SHASU. Urban Planning and Architecture], no. 1, pp. 64-68. (In Russian).

15 Tishchenko A.I., 2008. *Setevye gidrotekhnicheskie sooruzheniya: monografiya* [Network Hydraulic Structures: monograph]. Novocherkassk, YuRGU Publ., 247 p. (In Russian).

16 Tischenko A.I., 2013. *Problema prodleniya zhiznennykh resursov setevykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [The problem of extending the vital resources of network hydraulic structures]. *Integratsiya nauki i obrazovaniya – strategiya ustoychivogo razvitiya vodno-meliorativnogo kompleksa strany: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 100-letiyu vypuska pervogo melioratora Rossii* [Integration of Science and Education – a Strategy for the Sustainable Development of a Country's Reclamation Complex: Proceed. International scientific-practical conference, dedicated to the 100<sup>th</sup> anniversary of the first Russian irrigator graduation]. Novocherkassk, Lick Publ., pp. 163-166. (In Russian).

17 Tischenko A.I., 2012. *Obespechenie nadezhnoy raboty sbrosnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Ensuring reliable operation of waste hydraulic structures]. *Tekhnosfernaya bezopasnost', nadezhnost', kachestvo, energosnabzhenie: materialy 14-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf* [Technosphere Safety, Reliability, Quality, Power supply: Proceed. of the 14<sup>th</sup> Intern. scientific-practical conference]. Rostov n/D., RSSU Publ., vol. 14, iss. 3, pp. 156-161. (In Russian).

18 Sozaev A.A., 2008. *Obosnovanie parametrov ekspluatatsionnoy nadezhnosti obltsovannykh kanalov v usloviyakh predgornoy zony. Avtoreferat diss. d-ra tekhn. nauk* [Substantiation of Operational Reliability Parameters of Coating Canals under the Conditions of a Piedmont Zone. Abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Novocherkassk, 24 p. (In Russian).

19 Yurchenko I.F., 2017. *Planovo-predupreditel'nye meropriyatiya povysheniya nadezhnosti meliorativnykh ob'ektov* [Planned preventive measures to improve the reliability of land-reclamation facilities]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 1, pp. 73-77. (In Russian).

20 SP 41.13330.2012. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Aktualizirovannaya redakciya SniP 41.13330.2012* [Concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures]. Moscow, Ministry of Regional Development of Russia Publ., 2015, 68 p. (In Russian).

21 Bogomolov A. I., Mikhailov K.A., 1972. *Gidravlika* [Hydraulics]. ed. 2<sup>nd</sup>. Moscow, Stroiizdat Publ., 648 p. (In Russian).

22 Kiselev P.G., 1972. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam* [Handbook of Hydraulic Calculations]. Moscow, Energy Publ., 312 p. (In Russian).

23 Simvulidi I.A., 1987. *Raschet inzhenernykh konstruksiy na uprugom osnovanii: ucheb. posobie dlya stroit. spets. vuzov* [Calculation of engineering structures on an elastic foundation: Study guide for civil engineering. specialities of Universities]. 5<sup>th</sup> ed., rev. and add. Moscow, Higher School Publ. 576 p. (In Russian).

---

**Тищенко Александр Иванович**

Ученая степень: кандидат технических наук

Ученое звание: доцент

Должность: ведущий научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: [aleks.tishencko2016@mail.ru](mailto:aleks.tishencko2016@mail.ru)

**Tischenko Alexandr Ivanovich**

Degree: Candidate of Technical Sciences

Title: Associate Professor

Position: Leading Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: [aleks.tishencko2016@mail.ru](mailto:aleks.tishencko2016@mail.ru)