

УДК 626.843.92

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ СООРУЖЕНИЙ РИСОВЫХ СИСТЕМ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ

<sup>1</sup>Солодунов А.А., <sup>1</sup>Бандурин М.А., <sup>2</sup>Волосухин В.А.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»,  
Краснодар, e-mail: 2602555@mail.ru;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: ngma\_str\_meh@mail.ru

В данной статье представлены полученные результаты выполнения математического моделирования влияния дефектов сооружений рисовых систем за длительный период работы на их эксплуатационную надежность. В этом году исполняется девяносто лет первой рисовой системе – она была построена в 1929 г. на Кубани. В Краснодарском крае используются старые рисовые системы, поэтому необходимо научно обосновать затраты на их текущий и капитальный ремонт, поэтому был выполнен численный эксперимент различных дефектов сооружений рисовых систем. На основании полевых исследований выполнялось математическое моделирование для самых распространенных в ходе проведенного георадиолокационного зондирования обнаруженных дефектов, в виде поперечной трещины, пересекающей водоотводящее сооружение, а также разрушение бортов колодца. Были использованы геометрические параметры выявленных дефектов, а также их расположение на сооружении. Все расчеты были выполнены на вычислительном комплексе SCAD Office. В ходе выполненного математического моделирования получено, что водоотводящий трубопровод с колодцем имеет запас эксплуатационной надежности, который снижается за годы использования сооружения. Получены формулы для расчёта напряжений водоотводящего трубопровода с колодцем. Представленные предложения способствуют уточнению критериев эксплуатационной надежности сооружений рисовых систем. Предложенные формулы позволяют по данным проведенного технического анализа эксплуатационной надежности дать характеристику эксплуатационной надежности сооружений рисовых систем.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, численные методы, эпюры, эмпирические зависимости, сооружения рисовых систем

## MATHEMATICAL MODELING OF INFLUENCE OF DEFECTS OF STRUCTURES OF RICE SYSTEMS ON THEIR OPERATIONAL RELIABILITY

<sup>1</sup>Solodunov A.A., <sup>1</sup>Bandurin M.A., <sup>2</sup>Volosukhin V.A.

<sup>1</sup>Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, e-mail: 2602555@mail.ru;

<sup>2</sup>Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, e-mail: ngma\_str\_meh@mail.ru

This article presents the results of mathematical modeling of the effects of defects in the construction of rice systems over a long period of work on their operational reliability. This year marks the ninety years since the first rice system was built – in 1929 in the Kuban. In the Krasnodar Territory, old rice systems are used, therefore, it is necessary to scientifically substantiate the costs of maintenance and overhaul, and a numerical experiment was carried out on various defects in the construction of rice systems. Based on field studies, mathematical modeling was performed for the most common detected defects during the GPR sounding, in the form of a transverse crack crossing the drainage structure, as well as the destruction of the sides of the well. The geometric parameters of the identified defects were used, as well as their location on the structure. All calculations were performed on the SCAD Office computer complex. In the course of mathematical modeling, it was found that the drainage pipeline with a well has a margin of operational reliability, which has been declining over the years of use of the structure. Formulas for calculating the stresses of a drainage pipeline with a well are obtained. The presented proposals contribute to the refinement of the criteria for the operational reliability of rice systems. The proposed formulas allow, according to the technical analysis of operational reliability, to characterize the operational reliability of structures of rice systems.

**Keywords:** mathematical modeling, numerical methods, diagrams, empirical dependencies, constructions of rice systems

В этом году исполняется девяносто лет первой рисовой системе – она была построена в 1929 г. на Кубани [1]. В настоящее время в Краснодарском крае происходит стремительное возрождение рисовой отрасли, так, например, в 2015 г. площади, отведенные под возделывание риса, составляли более 170 тыс. га. В планах на 2020 г. – засеять 180,8 тыс. га, это почти на 10 тыс. больше, чем в прошлом году, один только Краснодарский край вы-

ращивает более 78 % рисовой крупы в России. В конце XIX в. в пойме реки Кубань было выполнено осушение плавней, именно здесь и решили начать первое возделывание риса [2].

В настоящее время, однако, состояние водного бассейна реки Кубань характеризуется высоким уровнем хозяйственного и комплексного освоения. Величина безвозвратного изъятия водных ресурсов в Нижней Кубани превышает предельно

допустимый лимит изъятия в 3,5 раза [3]. При этом на современном этапе безвозвратного изъятия не обеспечивается возмещение водных ресурсов, особенно в период маловодья. Также имеет место несоблюдение санитарно-экологических попусков на достаточном уровне. Таким образом, река Кубань практически не имеет свободных водных ресурсов в нижнем течении после Краснодарского водохранилища, для дальнейшего развития.

Все эти нерешенные проблемы указывают, что необходимо обосновать методы улучшения эксплуатационной надежности сооружений рисовых систем для дальнейшего их использования в водохозяйственном комплексе Юга России [4]. В Краснодарском крае и Республике Адыгея используются старые рисовые системы, поэтому необходимо научно обосновать затраты на их текущий и капитальный ремонт, поэтому возникла необходимость выполнения численного математического моделирования влияния различных, наиболее распространенных дефектов сооружений рисовых систем на их дальнейшую эксплуатационную надежность [5]. Для этого необходимо выполнить техническое обоснование плана проведения различных полевых исследований длительно эксплуатируемых сооружений рисовых систем неразрушающими приборами контроля на примере Нижней Кубани.

Реализация эксплуатационной надежности сооружений рисовых систем заключается в выполнении инженерно-технических и мелиоративных мероприятий [6] для устойчивого и эффективного водосбережения, рационального использования и развития водохозяйственного комплекса в целом [7].

Цель исследования заключается в выполнении математического моделирования влияния дефектов сооружений рисовых систем, выявленных на основании проведенного георадиолокационного зондирования, а также получения критериев характеристики эксплуатационной надежности.

#### **Материалы и методы исследования**

Были выполнены полевые исследования с помощью георадара ОКО-2, проведенные на сооружениях рисовых систем. Наиболее детально было обследовано водоотводящее сооружение в виде трубопровода, так как сооружение обнажено и доступно для осмотра и измерений. Однако часть сооружения, находящегося под водой, во время эксплуатации получила серьезные повреждения, разрушен трубопровод на всем протяжении от места их стыка до водоприемного

колодца. Разрушение бетонных колец привело к образованию поперечной трещины. Разрушение бетона произошло из-за того, что бетон в этом месте находится в наиболее неблагоприятных условиях и приводит к накоплению дефектов и разрушению бетона [8]. При очистке закрытых водоотводящих сооружений от заторов металлическими крючьями происходит нарушение стыковых соединений и внутренней поверхности трубопровода.

На основании полевых исследований выполнялось математическое моделирование для самых распространенных в ходе проведенного георадиолокационного зондирования обнаруженных дефектов, в виде поперечной трещины, пересекающей водоотводящее сооружение, а также разрушение бортов колодца [9]. Были использованы геометрические размеры выявленных дефектов, а также их расположение на сооружении, геометрические размеры поперечной трещины и разрушения борта. Все расчеты были выполнены на вычислительном комплексе SCAD Office, были построены твердотельные модели напряженно-деформированного состояния водоотводящего сооружения.

В постановке математического моделирования модели водоотводящего сооружения с колодцем без дефектов и повреждений преследовалась цель установления адекватности твердотельной модели напряженно-деформированного состояния при максимальном напоре воды с существующими натурными испытаниями [10] при различных граничных условиях (рис. 1).

Данные методы математического моделирования подчеркивают адекватность модели напряженно-деформированного состояния водоотводящего трубопровода с колодцем. Выполнен трехмерный анализ жесткости водоотводящего трубопровода с колодцем с учетом контактного опирания [11], эпюра суммарных перемещений представлена на рис. 2.

В ходе математического моделирования водоотводящего трубопровода с колодцем с поперечной трещиной, и потери устойчивости при опирании на грунтовое основание установлено, что происходит потеря устойчивости положения элементов непосредственно в эпицентре раскрытия трещины водоотводящего трубопровода.

Вертикальные напряжения увеличиваются по длине сооружения, а горизонтальные напряжения – перпендикулярно сооружению. В дальнейшем с увеличением длины трещины и ее раскрытия, происходит потеря устойчивости, как вокруг горизонтальной, так и вертикальной осей.

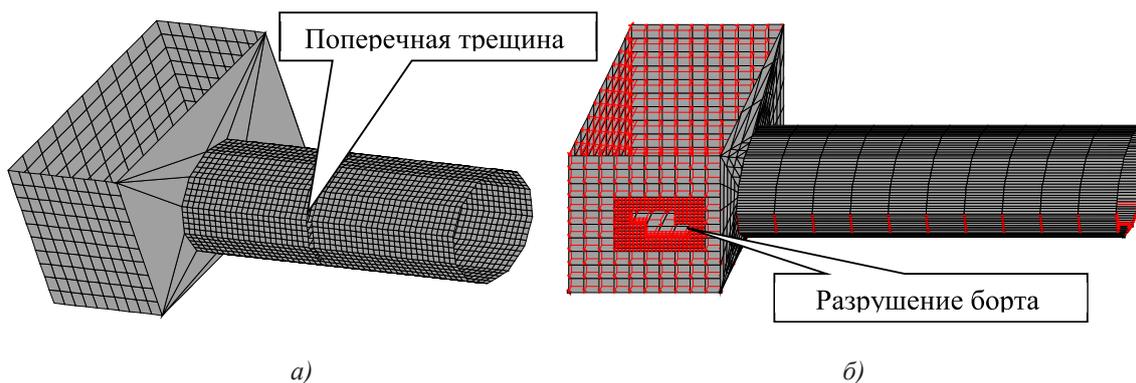


Рис. 1. Расчетная схема твердотельной модели водоотводящего трубопровода с колодцем: а) с поперечной трещиной; б) с разрушением бортов колодца

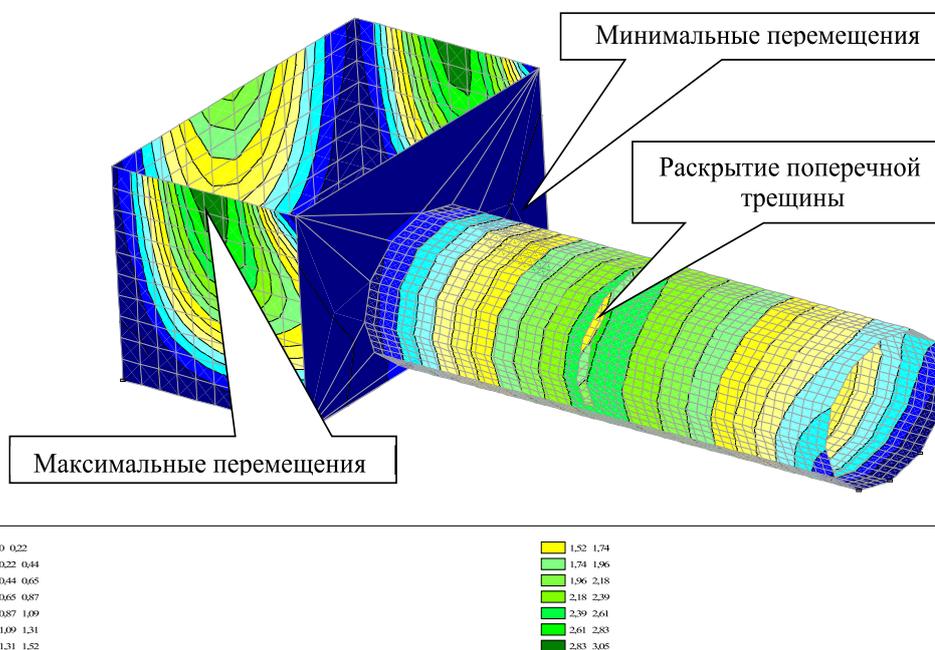


Рис. 2. Моделирование влияния дефекта в виде образования поперечной трещиной водоотводящего сооружения, эпюра суммарных перемещений

В местах стыка между кольцами выявлены пустоты под кольцом и слева от него, а герметизация стыковых соединений нарушилась [12], и вода просочилась в грунт основания трубопровода. При действии на бетон влажного грунта происходит окислительная реакция, в связи с чем на поверхности нижней части сооружения образуются каверны и углубления. При исследовании водоподводящего сооружения зафиксировано, что бетон вдоль обследуемого сооружения имеет пористую структуру, различный цвет [13].

Отмечено, что на поверхности бетона остается глубокий след, оставляемый зубилом, по сравнению с сооружениями, находящимися в эксплуатации менее 20 лет. На кольцах в начале и в конце обнаружено большое число трещин, которые обнажают арматуру на всем протяжении сооружения. Есть трещины, которые направлены параллельно нижней грани стенки, также повредившие боковые грани стенки колодца.

В ходе проведенного анализа выявлено, что вертикальные напряжения увеличиваются по оси трубопровода к колодцу [14],

а горизонтальные напряжения – перпендикулярно оси сооружения. Расчеты напряженно-деформированного состояния выполнялись на модели, рассматривающейся как тонкостенная оболочка, с учетом условия ее опирания. Были определены критические напряжения раскрытия поперечной трещины, пересекающей водоотводящее сооружение, определены предельные размеры ее раскрытия, позволяющие установить, что появление трещины опасно для эксплуатации сооружения [15].

Интенсивный порог опасности – длина раскрытия трещины более 1/3 диаметра трубопровода. Небольшое раскрытие трещины приведет к размыву грунтового основания, что является опасным выявленным дефектом для сооружения (рис. 3).

Вертикальные перемещения увеличиваются по вертикали вниз колодца, а горизонтальные перемещения – незначительны. На работоспособность водоотводящего трубопровода с колодцем значительное влияние оказывает разрушение бетона и оголение арматуры.

Сильно разрушен стык колец 1-го и 2-го сечения, идут продольные трещины с раскрытием до 15–20 мм, свидетельствующие о расслоении бетона, которое приводит к обнажению арматуры и к разрушению бетонного тела конструкции. Трещины в бетоне есть также на вертикальных гранях бортов колодца, наклонные, почти горизонтальные трещины рассекают полностью сечение колец 2-го отсека. Раскрытие тре-

щин достигает 0,5–1,8 мм, смещение краев трещин по горизонтали 0,7–1,1 мм, причем верхний край колодца, смещен относительно вертикальной оси на 22° [16].

В ходе выполнения математического моделирования влияния дефектов разрушения борта колодца водоотводящего сооружения, установлено, что потеря устойчивости опирания элементов происходит посередине водоотводящего трубопровода, работающего как балка на изгиб (рис. 4).

В местах образования разрушения дефектов бортовых элементов колодца перемещения незначительные и на работу всего сооружения не оказывают воздействия.

Бетон бортов и днища колодца находятся в состоянии полного водонасыщения, обследованные участки разорваны трещинами отрыва (ширина трещин 0,4; 0,9; 0,2 и 1,2 мм), одна – на южной стороне (5,2 мм). Во 2-м отсеке – три на северной стороне (шириной 0,2; 0,2 и 0,8 мм), две – на южной (шириной 1,4 и 1,2 мм). В 3-м отсеке сооружения семь трещин, расположение которых не удалось привязать к другим факторам [17]. В последующих отсеках обнаружены одна-две трещины в средней части.

На рис. 5 показана эпюра эквивалентных максимальных напряжений по горизонтали вдоль водоотводящего трубопровода с колодцем, напряжения находятся в предельно допустимых значениях. При увеличении нагрузки опасность может представлять соединение колодца с водоотводящим трубопроводом.

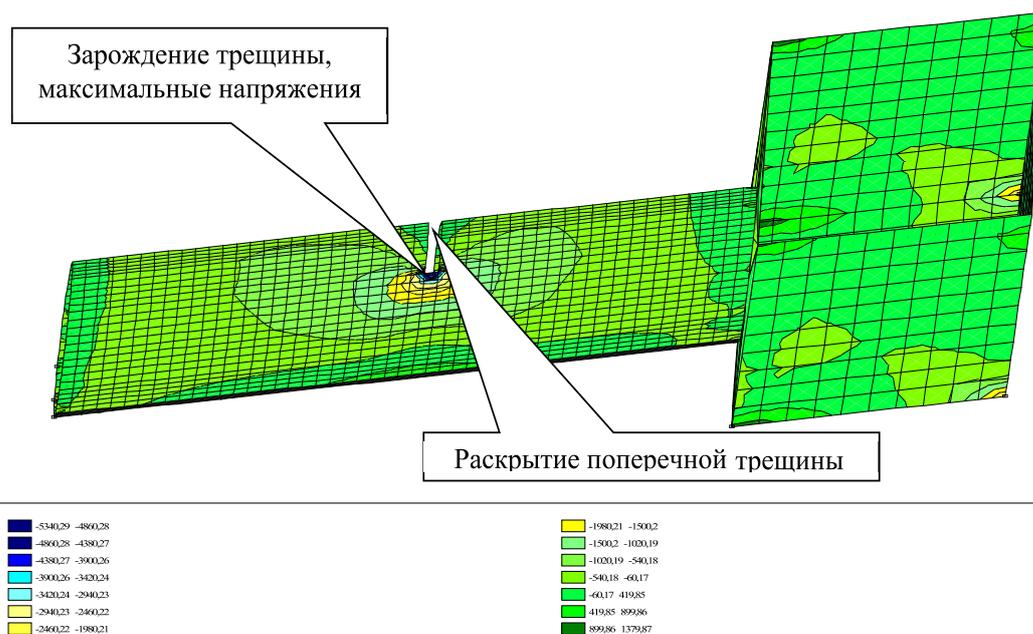


Рис. 3. Критические напряжения поперечной трещины, пересекающей водоотводящее сооружение

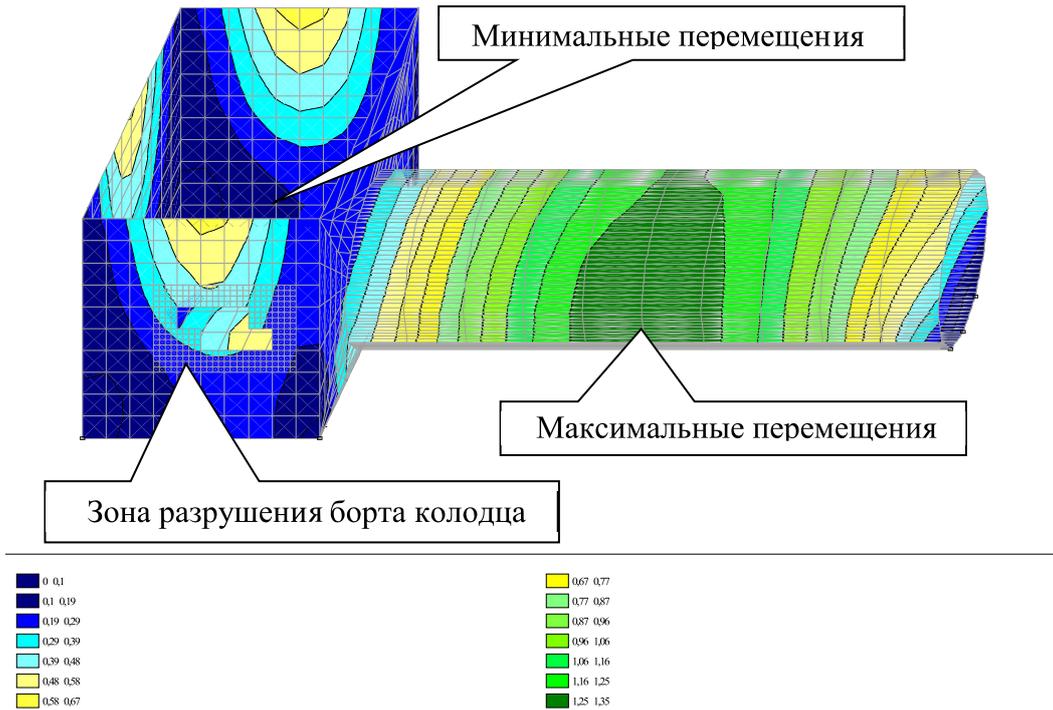


Рис. 4. Моделирование влияния дефекта в виде разрушения борта колодца водоотводящего сооружения, эпюра суммарных перемещений

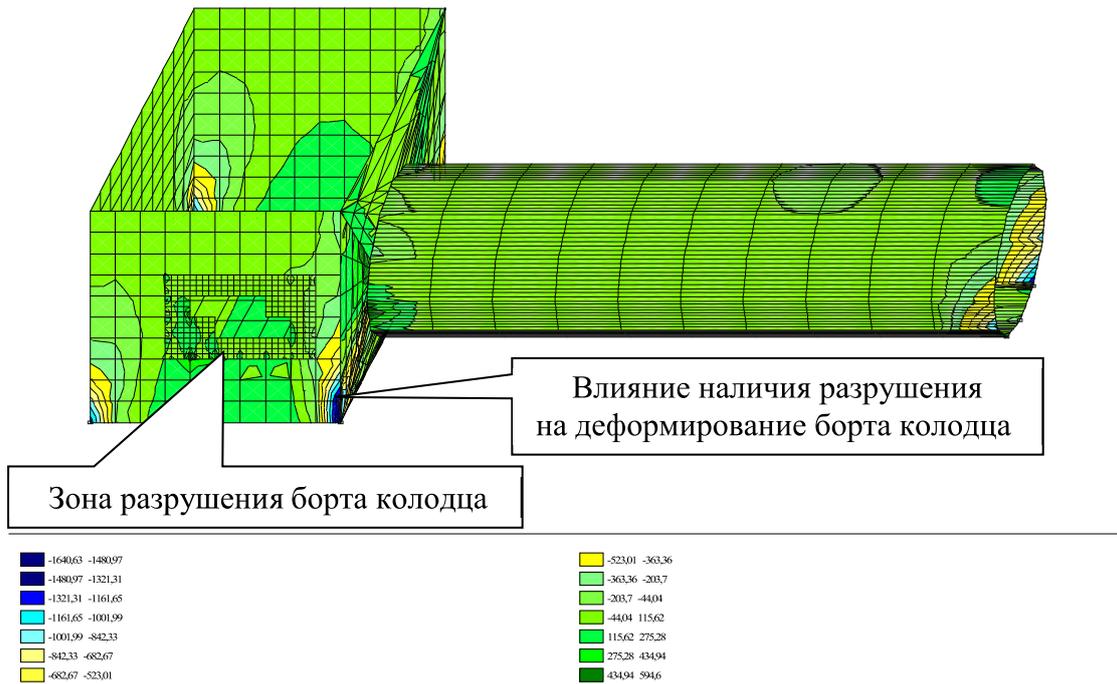


Рис. 5. Моделирование влияния дефекта в виде разрушения борта колодца водоотводящего сооружения, эпюра эквивалентных максимальных напряжений по горизонтали вдоль сооружения

Максимальные эквивалентные напряжения по горизонтали поперек водоотводящего трубопровода с колодцем показаны на рис. 6. Напряжения, так же как

и на рис. 5, находятся в предельно допустимых значениях, при увеличении нагрузки опасность может представлять соединение колодца с водоотводящим трубопроводом.

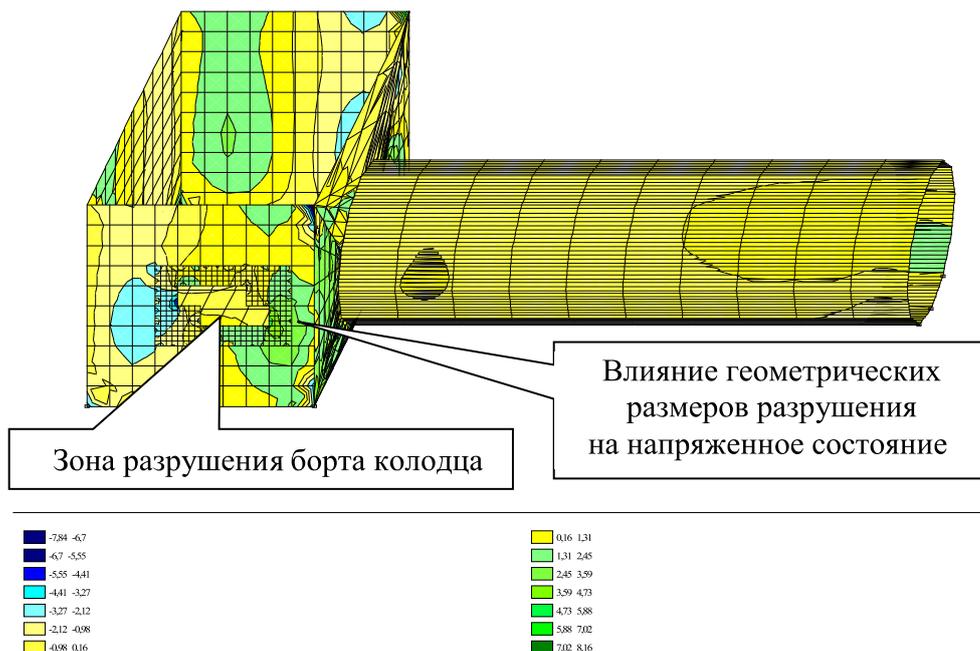


Рис. 6. Моделирование влияния дефекта в виде разрушения борта колодца водоотводящего сооружения, эпюра эквивалентных максимальных напряжений по горизонтали поперек сооружения

Все трещины пересекают полностью сечение сооружения: так, каждой трещине западного борта соответствует трещина восточного борта, расположенная напротив первой. Это явно указывает на присутствие трещины в бетоне дна, которая соединяет противоположные трещины в бортах колодца. Не везде соблюдаются толщины защитных слоев. При возведении сооружения был применен бетон класса В 50.

Расчет напряженно-деформированного состояния предполагал построение адекватной расчётной модели при различных эксплуатационных параметрах, были выделены зоны образования дефектов и повреждений на несущих элементах водоотводящего трубопровода с колодцем, которые могут содержать однотипные неисправности. Установлен интенсивный порог опасности эксплуатации сооружения, начиная с диаметра 75 мм образования пустот и разуплотнению железобетона.

Использование математического моделирования для оценки резерва дееспособности сооружений рисовых систем показало возможность повысить качество управляющих воздействий эксплуатационной надежности.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В ходе математического моделирования получено, что водоотводящий трубопровод с колодцем имеет запас эксплуатационной надежности, который снижается за годы использования сооружения.

По данным проведенного технического анализа эксплуатационной надежности определена и дана характеристика эксплуатационной надежности сооружений рисовых систем.

Выполнен численный эксперимент различных обнаруженных дефектов в виде поперечной трещины, пересекающей водоотводящее сооружение, а также с разрушением бортов колодца. Все теоретическое обоснование математической модели базируется на основе экспериментальных исследований.

Данные методы моделирования подчеркивают адекватность модели напряженно-деформированного состояния водоотводящего трубопровода с колодцем.

Получены результаты расчетов потери устойчивости и просадки водосброса в виде эпюр избыточных эквивалентных по горизонтали и вертикали и абсолютных перемещений. В процессе исследований полученные эпюры напряжений и перемещений, для последующего использования были переведены в эмпирические формулы, подобраны алгебраические выражения функции (1–7).

Выполнен трехмерный анализ жесткости водоотводящего трубопровода с колодцем с учетом контактного опирания. В ходе проведенного анализа выявлено, что вертикальные напряжения увеличиваются по оси трубопровода к колодцу, а горизонтальные напряжения перпендикулярно оси соору-

жения. Полученные данные при математическом моделировании неисправностей водоотводящего трубопровода с поперечной трещиной показаны на рис. 7.

Получены эмпирические зависимости для расчета напряжений водоотводящего трубопровода с поперечной трещиной: для элементов без трещины (1); с образованием трещины 25 % (2); с образованием трещины 50 % (3); с образованием трещины 75 % (4):

$$G_{VЭ} = 0,0001x^2 + 0,0131x + 3,3856; R^2 = 0,9743, (1)$$

$$G_{VЭ} = 0,0008x^2 + 0,0938x + 3,5947; R^2 = 0,9976, (2)$$

$$G_{VЭ} = 0,0014x^2 + 0,2122x + 2,5298; R^2 = 0,9848, (3)$$

$$G_{VЭ} = 0,0024x^2 + 0,2613x + 2,7079; R^2 = 0,9827. (4)$$

Полученные данные при математическом моделировании неисправностей водо-

отводящего трубопровода с разрушением бортов колодца показаны на рис. 8.

Получены эмпирические зависимости для расчета напряжений водоотводящего трубопровода с колодцем: для элементов без разрушения (5); с разрушением бортов колодца 30 % (6); с разрушением бортов колодца 60 % (7):

$$G_{VЭ} = 1,1939x^2 - 1,2353x + 3,8017; R^2 = 0,9374, (5)$$

$$G_{VЭ} = -23,035x^2 + 81,772x - 23,427; R^2 = 0,8454, (6)$$

$$G_{VЭ} = -32,42x^2 + 104,73x - 26,528; R^2 = 0,8246. (7)$$

Выполнены модельные исследования и предложено экспериментально-методическое обоснование, что полученные результаты данных расчетов соответствуют установленным в результате натурных исследований выводам и заключениям.

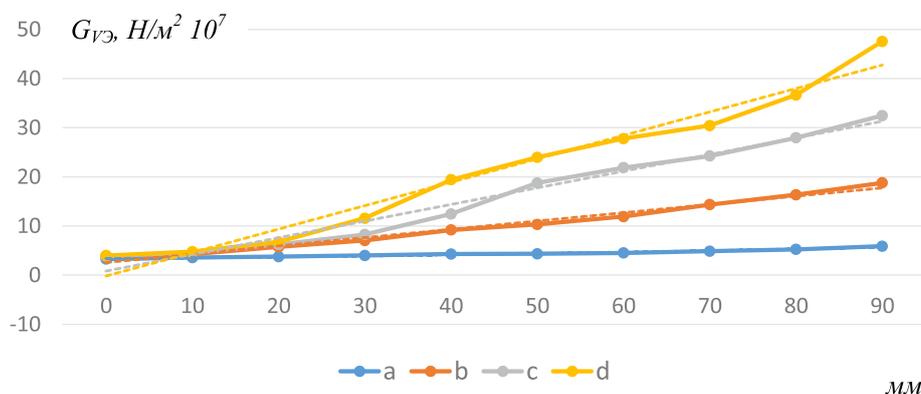


Рис. 7. График напряжений при математическом моделировании неисправностей водоотводящего трубопровода с поперечной трещиной: зона a – без трещины; b – с образованием трещины 25%; c – с образованием трещины 50%; d – с образованием трещины 75%

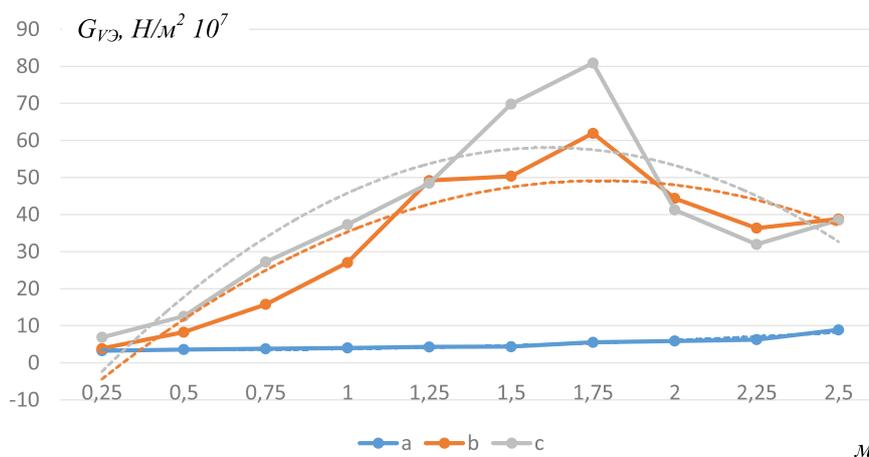


Рис. 8. График напряжений при математическом моделировании неисправностей водоотводящего трубопровода с разрушением бортов колодца: зона a – без разрушения; b – с разрушением бортов колодца 30%; c – с разрушением бортов колодца 60%

Выявленные дефекты сооружений рисовых систем, установленные несвоевременно и/или оставленные без внимания, приводят к негативной трансформации элементов, которая снижает их работоспособность, вплоть до полного прекращения функционирования сооружения. Этим обусловлена актуальность поиска и реализации эффективных подходов к оценке фактического состояния сооружения и прогнозирования остающегося резерва его работоспособности, обеспечивающих оптимальность оперативного, тактического и стратегического планирования мероприятий повышения надежности, безопасности и долговечности сооружений рисовых систем.

### Список литературы

1. Шумаков Б.А. Дмитрий Жлоба – строитель рисовых систем на Северном Кавказе // Мелиорация и водное хозяйство. 2007. № 3. С. 23–25.
2. Кирейчева Л.В., Юрченко И.Ф. Роль мелиорации земель в решении проблемы продовольственной безопасности России // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2015. № 2. С. 13–15.
3. Юрченко И.Ф., Носов А.К. О критериях и методах контроля безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного водохозяйственного комплекса // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2014. № 53. С. 158–165.
4. Волосухин Я.В., Бандурин М.А. Вопросы моделирования технического состояния водопроводящих каналов при проведении эксплуатационного мониторинга // Мониторинг. Наука и безопасность. 2012. № 1. С. 70–74.
5. Ольгаренко В.И., Ольгаренко Г.В., Ольгаренко И.В. Комплексная оценка технического уровня гидромелиоративных систем // Мелиорация и водное хозяйство. 2013. № 6. С. 8–11.
6. Бандурин М.А. Применение систем управления базами данных при эксплуатационном мониторинге водопроводящих сооружений // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 12–1. С. 24–28.
7. Балакай Г.Т., Юрченко И.Ф., Лентяева Е.А., Ялалова Г.Х. Безопасность бесхозяйных гидротехнических сооружений. Германия: LAP Lambert, 2016. 85 с.
8. Юрченко И.Ф. Компьютерная технология поддержки решения как фактор реформирования системы эксплуатации в мелиорации России // Природообустройство. 2008. № 1. С. 34–40.
9. Юрченко И.Ф. Планово-предупредительные мероприятия повышения надежности мелиоративных объектов // Природообустройство. 2017. № 1. С. 73–79.
10. Юрченко И.Ф. Методологические основы создания информационной системы управления водопользованием на орошении // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 1. С. 13–17.
11. Пчелкин В.И. Безопасность зданий и сооружений в зоне гидродинамических аварий на гидротехнических сооружениях // Технологии гражданской безопасности. 2004. № 2. С. 66–69.
12. Абдразаков Ф.К., Сметанин А.Ю. Проблемы управления мелиоративным под комплексом на региональном уровне // Аграрный научный журнал. 2011. № 3. С. 47–50.
13. Коженко Н.В., Дегтярев В.Г., Дегтярев Г.В., Табаев И.А. Комплексный метод обследования зданий и сооружений при совместной работе с вышками связи // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 89. С. 581–606.
14. Yurchenko I.F. Automatization of water distribution control for irrigation. International Journal of Advanced and Applied Sciences. 2017. № 4 (2). С. 72–77.
15. Пат. 2368730 РФ, МПК E02B 13/00. Способ проведения эксплуатационного мониторинга технического состояния лотковых каналов оросительных систем / М.А. Бандурин, В.А. Волосухин. № 2008100926/03; заявл. 09.01.2008; опубл. 27.09.2009, Бюл. № 27.
16. Yurchenko I.F. Information support system designed for technical operation planning of reclamative facilities. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2018. V. 96. № 5. P. 1253–1265.
17. Бандурин М.А., Юрченко И.Ф., Волосухин В.А., Ванжа В.В., Волосухин Я.В. Эколого-экономическая эффективность диагностики технического состояния водопроводящих сооружений оросительных систем // Экология и промышленность. 2018. Т. 22. № 7. С. 66–71.