



Temperature Regime of Rockfill Dam Concrete Face During the Filling of the Reservoir

Sainov, M.^{1*}; Nguyen, T.C.²;

¹ Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

² Le Quy Don Technical University, Hanoi, Viet Nam

* mp_sainov@mail.ru

Keywords:

Concrete faced rockfill dam, temperature regime, reservoir filling, thermo-stressed state, temperature gradient

Abstract:

Introduction. Recently the issue of study in thermo-stressed state of rockfill dam concrete faces has become urgent. This is related to the fact that stresses from thermal effects may be one of the reasons that cause crack formation in a concrete face. This paper investigates the character of a thermal effect to which the face is subject during the reservoir impoundment. **Materials and methods.** There was studied nonstationary temperature regime of a fragment of a dam structure with a concrete face at the contact with cold water. Two cases were considered: rapid reservoir impoundment and impoundment with water rise rate 1 m a day. The study was conducted by numerical modeling method with the aid of the commercial software system ANSYS and the authorial computer program. It was shown that in order to obtain adequate results, the finite-element model should be in great detail. **Results.** Analysis showed that after the reservoir impoundment the face temperature regime is installed a durably, about one month. At a rate of 1m/day reservoir water level rise the face temperature regime is formed during a longer time than at rapid reservoir impoundment. The face temperature regime varies more intensively during the first three days. During this time interval, the face is subject to a high temperature gradient. **Conclusion.** The face temperature regime at the reservoir water level variation, characterized by a high temperature gradient during several days, evidences about unfavorable thermal effect, because it results in the face bending deformations. At stress-strain state analyses of a concrete face, it is reasonable to consider the thermal effect characterized by the temperature variation not throughout the whole thickness of the face but only in the part nearest to the upstream face.

1 Introduction

На напряжённо-деформированное состояние бетонных конструкций и сооружений значительное влияние оказывают температурные воздействия. Нагрев или охлаждение бетонной конструкции вызывает дополнительные, температурные напряжения, которые в совокупности с напряжениями от силовых нагрузок, могут привести к потере прочности бетона и образованию трещин.

Учёт температурных напряжений является особенно важным при проектировании бетонных конструкций гидротехнических сооружений, т.к. образование трещин может привести к нарушению их герметичности и соответственно их функционального назначения. По этой причине в гидротехнической науке важное место отводится исследованиям температурного режима гидротехнических сооружений. Исследованиям температурного режима бетонных плотин посвящены многочисленные публикации [1-8].

В то же время слабо изученным остаётся вопрос о температурном режиме каменно-набросных плотин с бетонным экраном и его влиянии на напряжённо-деформированное состояние бетонного экрана. Между тем, каменно-набросные плотины с бетонным экраном являются одним из самых перспективных типов плотин [9, 10]. Расширение сферы их применения

сдерживается фактами образования трещин в бетонном экране ряда плотин [11]. Вопрос о выявлении причин образования трещин в бетонном экране является актуальным.

Поэтому в последнее время много внимания стало уделяться изучению влияния температурных воздействий на прочность бетонного экрана. Это связано, во-первых, с тем, что в Китае и России рассматриваются планы строительства каменно-набросных плотин с бетонным экраном в районах с холодным климатом (высоконапорные створы Gushui, Rumei, Maji, Сіhaxia в Китае, створы в Южной Якутии, Российская Федерация). А, во-вторых, с тем, что имеются случаи образования в бетонном экране трещин, появление которых связывают с влиянием температурного воздействия. Например, в бетонном экране плотины Xibeikou (Китай) трещины образовались в течение первой зимы после окончания строительства [12-15].

Колебания температур вызвали образование трещин в бетонном экране плотины Gongboxia в китайском Тибете [15-18]. В 2011 г., после нескольких лет эксплуатации, в экране этой плотины были зафиксированы 157 трещин. Они имели толщину 0,02-0,45 мм и глубину 11-25 см [18]. Все они располагались в зоне уровня воды.

Случай трещинообразования в бетонном экране плотины Gongboxia привлекло внимание к термонапряжённому состоянию таких конструкций. Работы китайских исследователей [15-21] посвящены термонапряжённому состоянию именно бетонного экрана Gongboxia. В работе [14] исследования посвящены проектируемой плотины Langyashan.

Эти исследования показывают, что основную опасность для трещиностойкости бетонного экрана представляет неравномерное распределение температур в бетонном экране. Оно приводит к деформациям изгиба экрана, которые могут повлечь за собой значительные растягивающие напряжения. Они могут превышать расчётное сопротивление бетона на растяжение. В работах [15,18] выявлено, что значительный температурный градиент возникает в бетонном экране в зоне уровня воды в водохранилище. В работе [16] было показано, что быстрое падение температуры воздуха, является важной причиной растрескивания бетонного экрана. Охлаждение экрана на 15°C может вызвать растягивающее напряжение в экране величиной 2,7 МПа, что выше прочности бетона на растяжение.

Однако в исследованиях [14-21] рассматривается случай, когда охлаждение экрана вызвано понижением температуры воздуха. Между тем, охлаждение экрана может также произойти в процессе наполнения или сработки водохранилища. При первоначальном наполнении водохранилища сразу на большом участке бетонного экрана может испытывать значительные изменения температур.

В работах [22,23] авторами было рассмотрено напояженно-деформированное состояние бетонного экрана для такого случая. Было выявлено, что равномерное (по толщине) охлаждение или нагрев экрана не представляет высокой опасности для напояженно-деформированного состояния экрана, т.к. возможные температурные напряжения в высокой степени компенсируются деформациями продольного укорачивания [22]. Напротив, неравномерное распределение температуры представляет опасность для прочности бетонного экрана, т.к. соответствующие ему деформации экрана изгиба вызывают растягивающие напряжения [23].

В этой связи представляется важным установить реальный характер распределения температуры в экране при наполнении водохранилища. В [24] Саиновым М.П. были представлены результаты расчёта, полученные с помощью авторской вычислительной программы, они требуют подтверждения и верификации.

Исследованиям условий формирования температурного режима бетонного экрана в процессе наполнения водохранилища и посвящена данная статья.

2 Materials and Methods

Исследования носили методический характер и проводились для фрагмента напорной части каменно-набросных плотин с бетонным экраном. Их задачей было не только изучить характер распределения температур в экране, но и определить правила численного моделирования температурного режима экрана, позволяющие получать адекватные, достоверные результаты.

В исследовании рассматривался фрагмент высотой 20 м и шириной 30 м, который включает в себя бетонный экран толщиной 1 м.

Рассматривался случай нагрева экрана за счёт тепла воды водохранилища. На напорной грани бетонного экрана и правой границе фрагмента задавались граничные условия первого рода, т.е. в виде известных значений температуры. На правой границе фрагмента, т.е. внутри тела

Sainov, M.; Nguyen, T.C.

Temperature Regime of Rockfill Dam Concrete Face During the Filling of the Reservoir;

2020; Construction of Unique Buildings and Structures; Volume 91 Article No 9106. doi: 10.18720/CUBS.91.6

плотины, температура принималась равной 0°C. На наклонной верховой грани экрана температура определялась в зависимости от положения уровня воды. Ниже уровня воды температура принималась равной 20°C, а выше – 0°C. Изменение температуры воды по глубине не учитывалось. В качестве граничных условий на верхней и нижней границах задавалось отсутствие температурного градиента.

В исследованиях рассматривался нестационарный температурный режим. Методика расчёта основана на решении дифференциального уравнения теплопроводности.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right).$$

Где T – температура;

τ – время;

c – удельная теплоёмкость материала, кДж/(кг · °C);

ρ – плотность материала, кг/м³;

λ – коэффициенты теплопроводности материала, Вт/(м · °C).

Решение дифференциального уравнения сводится к минимизации соответствующего функционала. Из условия минимума функционала получена система линейных алгебраических уравнений, удобная для реализации в методе конечных элементов:

$$[K_t]\{\Delta T\} + [C_t] \frac{1}{\Delta \tau} \{\Delta T\} = [K_t]\{T\}.$$

Здесь $[K_t]$ – матрица теплопроводности на рассматриваемом интервале времени;

$[C_t]$ – матрица теплоёмкости на рассматриваемом интервале времени;

$\Delta \tau$ – интервал времени;

$\{\Delta T\}$ – вектор изменения температур в степенях свободы за рассматриваемый интервал

времени;

$\{T\}$ – вектор температур в степенях свободы на предыдущий момент времени.

Последовательное решение для интервалов моментов времени указанной системы уравнений позволяет выполнять расчёты нестационарного температурного режима сооружений и конструкций. Данный алгоритм расчёта реализован в сертифицированном программном комплексе ANSYS, а также в авторской вычислительной программе, составленной к.т.н. Саиновым М.П.

В расчётах использовались теплофизические характеристики материалов, приведённые в [14]. Теплопроводность бетона принималась равной 2,50 Вт / (м·К), а каменной наброски – 1,47 Вт / (м·К). Удельная теплоёмкость бетона была принята равной 1,0 кДж / (кг·К), а каменной наброски – 0,88 кДж / (кг·К).

Исследования проводились в 2 этапа. На первом этапе решалась методическая задача об установлении правил численного моделирования температурного режима. На втором этапе проводились исследования двух случаев температурного воздействия:

Случай №1. Наполнение водохранилища произошло мгновенно, после чего, с течением времени, происходит постепенное проникновение тепла внутрь сооружения;

Случай №2. Подъём уровня водохранилища осуществляется со скоростью 1 м/сут, изменение температурного поля происходит не только за счёт движения тепла, но и за счёт изменения граничных условий.

При расчёте рассматривались ряд моментов времени, каждый из которых характеризуется своим температурным полем. Общая продолжительность рассмотренного интервала времени составляла не менее 60 суток.

Чётко проговорите методику и материалы исследования.

3 Results and Discussion

Решение методической задачи.

Для установления правил численного моделирования температурного режима бетонного экрана с помощью программы ANSYS был проведён ряд расчётов для случая №1 (мгновенное наполнение водохранилища). В данной публикации показаны результаты для двух моделей.

Модель №1 фрагмента состоит из 9600 конечных элементов. Она равномерная, все элементы имеют одинаковый размер – 0,25 м. Расчётный интервал времени был принят равным 1 сутки.

Модель №2 фрагмента состоит из 2720 конечных элементов. Однако в этой модели бетонного экрана был смоделирован более подробно – толщина конечных элементов в бетонном экране составляет 0,1 м. Расчётный интервал времени был принят равным 0,5 сутки.

Сравнение результатов расчётов для разных моделей выявило влияние качества конечно-элементной модели и величины расчётного интервала времени на результаты расчёта. Чем больше расчётный интервал времени и подробнее конечно-элементная модель, тем медленнее проникает тепло вглубь конструкции. В модели №1 скорость проникновения тепла примерно в 2 раза быстрее, чем в модели №2 (рис.1).

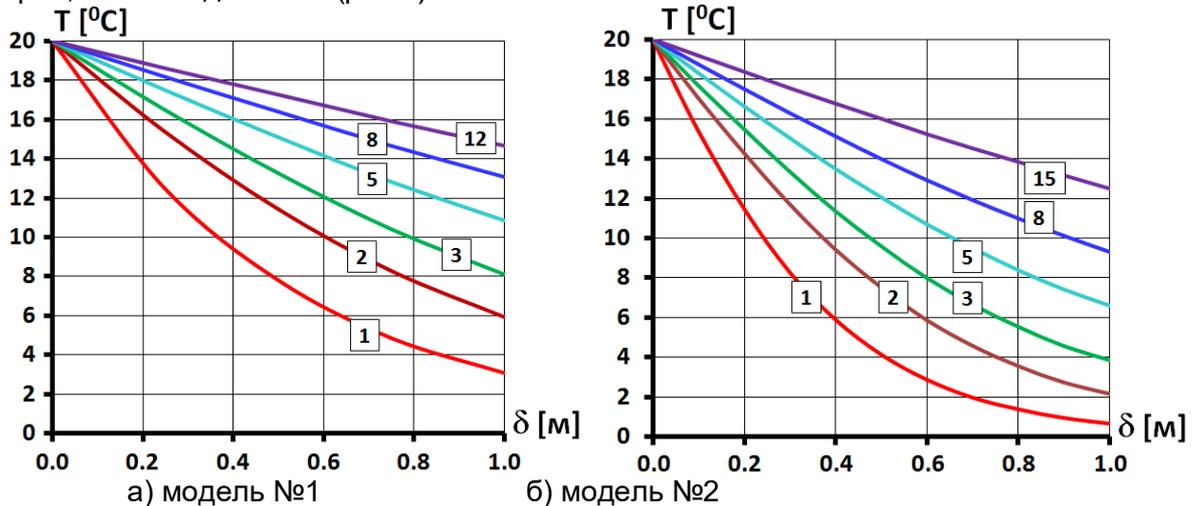


Рис.1 Изменение с течением времени температуры в сечении экрана толщиной $\delta=1$ м, расположенном на уровне воды.

Цифрами обозначено количество суток от момента достижения уровня воды

Fig.1 Time-dependent temperature variation in a $\delta=1$ m thick face section located at the water level. Figures designate the number of days from the moment of reaching the water level. Calculation with the aid of the ANSYS program

Было выявлено, что подробность конечно-элементной модели экрана имеет определяющее значение для качества получаемых результатов. Это связано с той погрешностью в продвижении фронта тепловой волны в начальный момент времени. Поэтому при решении задач о температурном режиме важно, чтобы вблизи напорной грани конечно-элементная модель должна быть довольно подробной. Рекомендуется, чтобы по толщине экрана были выделены не менее 5 элементов. Было выявлено, что уменьшение расчётного интервала времени менее, чем 0,5 суток, не вносит существенных корректив в результаты расчёта.

При расчётах по авторской вычислительной программе использовалась неравномерная конечно-элементная модель фрагмента [24]. Она насчитывает всего 400 конечных элементов, однако половина из них моделирует бетонный экран. В зоне уреза воды и вблизи напорной грани модель была сгущена. Минимальная толщина элементов составила 5 см.

Расчёты по двум вычислительным программам позволило провести анализ формирования температурного режима бетонного экрана.

Температурный режим при мгновенном наполнении водохранилища (случай №1).

Результаты расчёта температурного поля для случая №1 показаны на рис.2 и 3а. На рис.2 показано распределение температур в целом по фрагменту, а на рис.3а – в горизонтальном сечении экрана, расположенном посередине высоты рассматриваемого фрагмента.

Анализ показал, что при использовании довольно подробных конечно-элементных моделей результаты расчёта по двум использованным программам практически повторяют друг друга. Это говорит о достоверности полученных результатов.

На рис.2 и 3а хорошо видно, что процесс проникновения тепла занимает очень длительное время. Только через сутки изменения температуры достигнут нижней грани экрана (рис.3а). Чем глубже проникает тепло, тем больше замедляется этот процесс. На протяжении нескольких суток

бетонный экран будет испытывать значительный температурный градиент. Полностью температурный режим сооружения устанавливается примерно через год (рис.2).

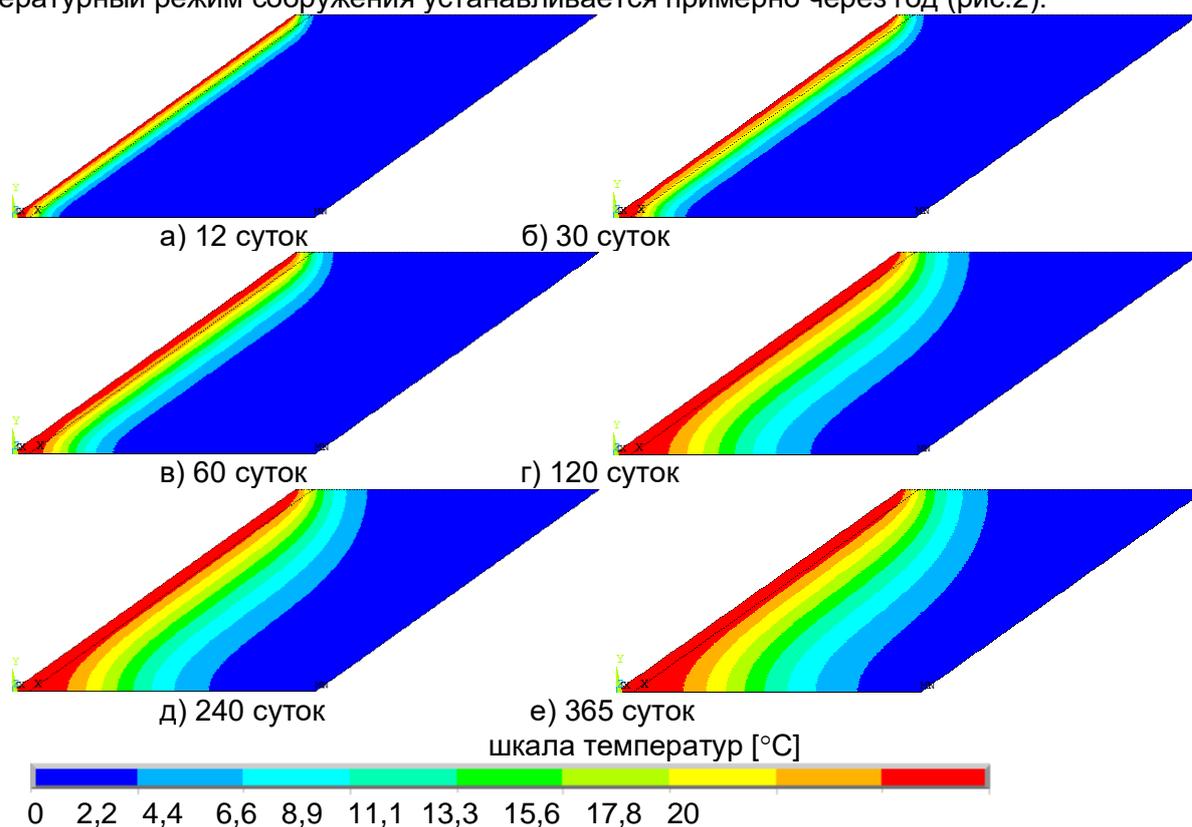


Рис.2. Изменение с течением времени температурного поля во фрагменте плотины (случай 1 – мгновенное наполнение водохранилища). Расчёт по программе ANSYS
Fig.2 Temperature field time-dependent variation in the dam fragment (case 1 – rapid reservoir impoundment). Calculation with the aid of the ANSYS program

Вывод о том, что распределение температур в бетонном экране является неравномерным в течение нескольких суток, косвенно подтверждается результатами натурных измерений температурного режима бетонного экрана в строительный период. В [25] указывается, что после бетонирования экран в следствие экзотермии цемента разогревается, но через несколько суток температурный режим экрана устанавливается.

Таким образом, при мгновенном наполнении водохранилища в течение нескольких суток бетонный экран будет испытывать неблагоприятный температурный режим, характеризующийся неравномерным распределением температуры по толщине экрана.

Однако в реальности наполнение водохранилища не может быть осуществлено мгновенно и ведётся с конечной скоростью. Поэтому был рассмотрен второй расчётный случай.

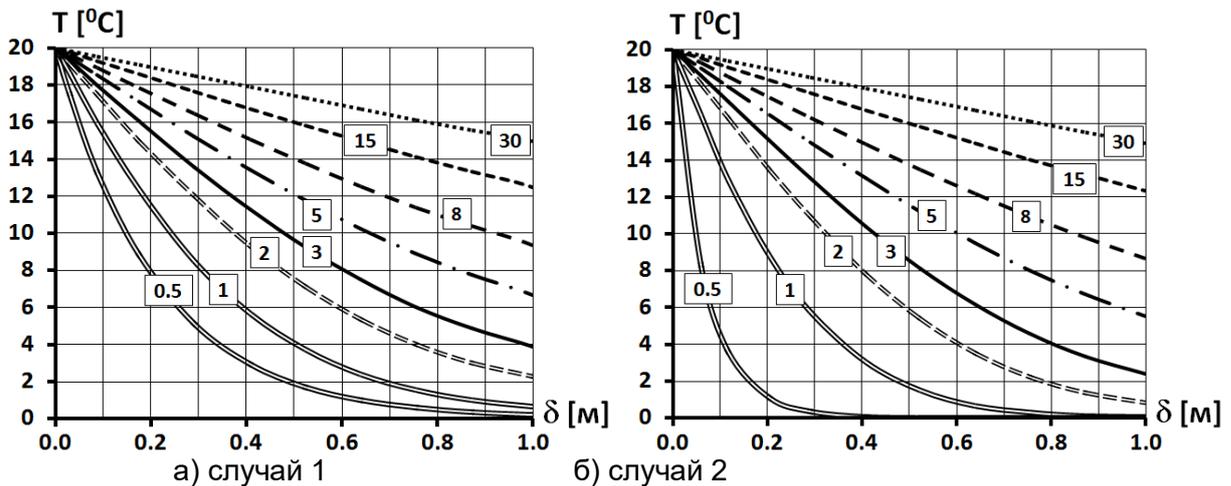


Рис.3 Изменение с течением времени температуры в сечении экрана толщиной $\delta=1$ м, расположенном на уровне воды.

Цифрами обозначено количество суток от момента достижения уровня воды

Fig.3 Time-dependent temperature variation in a $\delta=1$ m thick face section located at the water level.

Figures designate the number of days from the moment of reaching the water level (calculation by an authorial program)

Температурный режим при постепенном наполнении водохранилища (случай №2).

Был рассмотрен случай, когда наполнение водохранилища осуществляется со скоростью 1 м в сутки. Это довольно высокая скорость подъёма уровня водохранилища.

Данный расчёт проводился по авторской вычислительной программе. Результаты расчёта (рис.3б, 4) показали, что снижение скорости наполнения водохранилища несколько замедляет проникновение тепла внутрь сооружения. Однако отличия заметны только в начальный период времени, продолжительностью около 5 суток (рис.4). В дальнейшем, когда уровень водохранилища на 5 м превысит расчётное сечение, скорость проникновения тепла практически не зависит от скорости наполнения водохранилища.

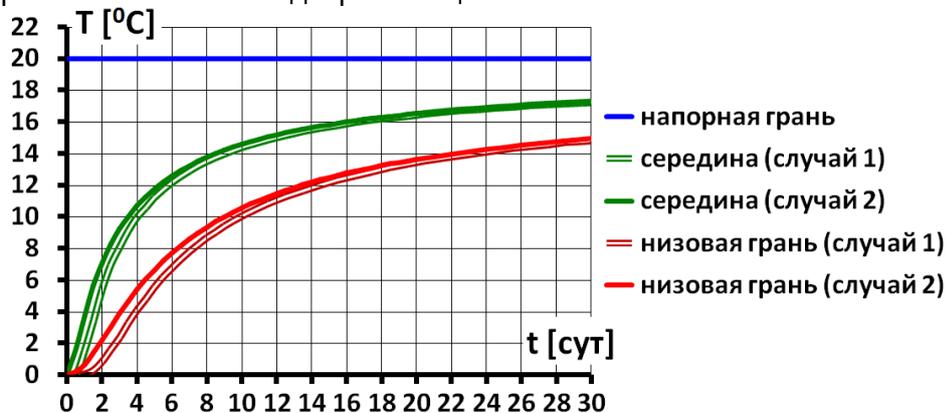


Рис.4 Изменение с течением времени температуры в характерных точках экрана (расчёт по авторской программе)

Fig.4 Time-dependent temperature variation in the face characteristic points (calculation by an authorial program)

Следует отметить, что в случае 2 неравномерность распределения температур по толщине экрана сохраняется дольше и больше, чем в случае 1. Тепло достигает низовой грани не через сутки (как в случае 1), а только через двое (рис.3б, 4). Через сутки температурный фронт проходит лишь 0,5 м, т.е. половину толщины экрана.

Таким образом, постепенное наполнение водохранилища с высокой скоростью создаёт ещё более неблагоприятный температурный режим экрана. Он характеризуется высоким температурным градиентом в верхней половине экрана. По прошествии 3 суток эпюра распределения температур становится близким к треугольной, а затем – трапецидальной. Температурный режим можно считать близким к стационарному примерно через 20 суток.

4 Conclusions

1. Наполнение водохранилища может вызвать значительное изменение температурного режима бетонного экрана каменно-набросной плотины, которое может оказывать неблагоприятное влияние на напряжённое состояние экрана. Неблагоприятное влияние температурного воздействия заключается в наличие высокого температурного градиента по толщине экрана, который вызовет деформации изгиба.

2. Для получения адекватных, достоверных результатов численного моделирования нестационарного температурного режима бетонного экрана необходимо использовать конечно-элементные модели с подробной (толщиной 5-10 см) дискретизацией зон неравномерного распределения температур.

3. Верификация авторской вычислительной программы по расчёту нестационарного температурного режима путём сравнения результатов решения тестовой задачи с результатами использования сертифицированной программы ANSYS, подтвердила возможность её использования.

4. Температурный режим работы бетонного экрана мало зависит от скорости наполнения водохранилища, он в основном определяется температурой воды и теплопроводностью бетона. При скорости подъёма уровня водохранилища, равной 1 м в сутки, температурный режим экрана более неблагоприятный, чем при мгновенном наполнении водохранилища.

5. Опасными для напряжённого состояния экрана являются первые трое суток после изменения уровня водохранилища, в течение которых устанавливается новый температурный режим экрана. В первые сутки тепло проникает примерно на 0,5 м, а через двое суток – на 1 м.

References

- Ginzburg S.M., Korsakova L.V., Pavlenko N.V. Raschetnye issledovaniya termonapryazhennogo sostoyaniya plotin iz ukatannogo betona Computational studies of the thermally stressed state of rolled concrete dams [Computational studies of the thermally stressed state of rolled concrete dams]. Izvestiya Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva [News of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneeva]. 2007. 248. Pp.86–93.
- Ginzburg S.M., Voznesenskaya N.V. Osobennosti temperaturnogo rezhima i NDS plotiny iz ukatannogo betona v stroitel'nyj period [Features of the temperature regime and stress-strain state of the dam made of rolled concrete during the construction period]. Izvestiya Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva [News of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneeva]. 2010. 260. Pp.20–28.
- Kuzmanovic, V., Savic, L., Mladenovic, N. Thermal-stress behaviour of RCC gravity dams. FME Transactions. 2015. 43(1). Pp. 30-34. DOI: 10.5937/fmet1501030K
- Benchara, A., Taleb, A. Thermal behavior of roller-compacted-concrete gravity dams. International Review of Civil Engineering. 2016. 7(3). Pp.63-67. DOI: 10.15866/irece.v7i3.9639
- Aniskin N.A., Чык N.СН. Termonapryazhennoe sostoyanie betonnoj plotiny iz ukatannogo betona v processe vozvedeniya vo V'etname [Thermal stress state of a concrete dam made of rolled concrete during construction in Vietnam]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil construction]. 2018. 1. Pp.57–61.
- Aniskin N.A., Shajtanov A.M. Ocenka temperaturnogo vozdejstviya na napryazhyonno-deformirovannoe sostoyanie betonnoj gravitacionnoj plotiny [Assessment of the temperature effect on the stress-strain state of a concrete gravity dam]. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic Engineering]. 2020. 1. Pp.43–49.
- Aniskin, N., Nguyen Trong, C. The thermal stress of roller-compacted concrete dams during construction. MATEC Web of Conferences. 2018. 196, 04059.
- Aniskin, N.A., Nguyen Trong, C. Mathematical model of temperature regime and thermal stress state of roller-compacted concrete gravity dam. Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1425(1), 012051.
- Ma, H., Chi, F. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams. Engineering. 2016. 2. Pp.332–339

10. Sainov, M., Yurieva, E. Structures of concrete faced rockfill dams in historical retrospective. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2018. 9(72). Pp.46-60. DOI: 10.18720/CUBS.72.3
11. Sainov, M, Zatonskikh, M. Structural cracks initiation in reinforced concrete faces of rockfill dams. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2018. 10(73). Pp.16-27. DOI: 10.18720/CUBS.73.2
12. Mai, J., Sun, L., Research on causes of fractures of concrete plates faced on Xibeikou rock-fill dam. *Journal Water Resource and Hydropower Engineering*. 1999. No.5. Pp.32–34
13. Qin X., Gu, C., Shao, C., Chen Y., Vallejo, L., Zhao, E. Safety evaluation with observational data and numerical analysis of Langyashan reinforced concrete face rockfill dam. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2020. DOI: 10.1007/s10064-020-01790-2
14. Wang, Z., Liu, S., Vallejo, L., Wang, L. Numerical analysis of the causes of face slab cracks in Gongboxia rockfill dam. *Engineering Geology*. 2014. No.181. Pp.224–232. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.07.019
15. Mai, J., Sun L. Research on Causes of Fractures of Concrete Plates Faced on Xibeikou Rock-fill Dam // *Water Resource and Hydropower Engineering*. 1999. 05
16. Zheng, D., Cheng, L., Xu, Y. Evaluate the impact of cold wave on face slab cracking using fuzzy finite element method. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013, 820267. DOI:10.1155/2013/820267
17. Yanlong, L., Shouyi, L., Yang, Y., Xing, T. Temperature stress and surface insulation measures of concrete face slabs during cold wave period. *International Journal of Civil Engineering. Transaction A: Civil Engineering*. 2015. 13. 4A. Pp.501-507. DOI: 10.22068/IJCE.13.4.501
18. Zheng, X., Zhao, E., Shao, C. Cause and Stability Analysis of Cracks in Concrete Slab of Rockfill Dam under High Temperature Difference Condition. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. 304. 052075. DOI:10.1088/1755-1315/304/5/052075
19. Wang, R., Wang, R., Chen, Y. Research on thermal stress of concrete slabs of rockfill dam under condition of cold wave attack. *Journal of Hydroelectric Engineering*. 2004. vol.23, no.6, pp.45–49. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.07.019
20. Wang, Z., Liu, S., Vallejo, L., Wang, L. Numerical analysis of the causes of face slab cracks in Gongboxia rockfill dam. *Engineering Geology*. 2014. 181. DOI:10.1016/j.enggeo.2014.07.019.
21. Yu, M., Wang, R., Temperature stress research on the face plate of the Gongboxia concrete-faced rock-fill dam // *Water Resource and Hydropower Engineering*. 2004. 35. Pp.54–58.
22. Sainov M.P. Vliyaniye izmeneniya temperatury na napryazhyonno-deformirovannoe sostoyaniye zhelezobetonogo ekrana kamenno-nabrosnoj plotiny [Impact of temperature change on the stress-strain state of the reinforced concrete face of a rockfill dam]. *Privolzhskij nauchnyj zhurnal [Volga River scientific journal]*. 2016. 4(40). Pp.79–85.
23. Sainov M.P., Kotov F.V., Volkov D.V. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye massivnogo negruntovogo dvuhslojnogo ekrana kamenno-nabrosnoj plotiny pri temperaturnom vozdejstvii [Stress-strain state of a massive non-soil two-layer screen of a rock fill dam under temperature exposure]. *Privolzhskij nauchnyj zhurnal [Volga River scientific journal]*. 2018. 2(46). Pp.84–90.
24. Sainov M.P. Temperaturnyj rezhim betonogo ekrana kamenno-nabrosnoj plotiny []. V sbornike: Vysshaya shkola: nauchnye issledovaniya sbornik nauchnyh statej po itogam rab Temperature range of the concrete face of the rockfill dam oty Mezhvuzovskogo nauchnogo kongressa [Higher school: scientific research collection of scientific articles on the results of the work of the Interuniversity scientific congress]. Moscow. 2020. Pp.140-145.
25. He, X., Wang, Z., He, Q. Cause analysis of face cracking of a CFRD during construction period in cold regions. *Advances in Science and Technology of Water Resources*. 2019. 39(3). Pp.68-74. DOI:10.3880/j.issn.10067647.2019.03.012