DOI 10.28983/asj.y2021i8pp82-86 УДК 627.8.06

АНАЛИЗ ОСНОВАНИЯ МЕЛИОРАТИВНОЙ ПЛОТИНЫ ПРИ РАБОТЕ В НАПОРНО-ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ

АБДРАЗАКОВ Фярид Кинжаевич, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

ДЕГТЯРЕВ Владимир Георгиевич, *Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина*

КОЖЕНКО Наталия Владимировна, *Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина*

Осуществлен расчет и выполнено численное моделирование основания гидромелиоративной плотины при ее эксплуатации в напорно-переменном режиме, при использовании программного комплекса MIDAS GTX NX, путем построения расчетной модели на основе реального инженерно-геологического состояния объекта, когда на основе расчетной модели определены горизонтальные напряжения (кН/м²) в зависимости от переменного уровня воды в верхнем и нижнем бьефах, получена математическая модель процесса от названных факторов и выявлена степень влияния каждого из них.

Введение. Дефицит пресной воды на Черноморском побережье и в Республике Крым в настоящее время выходит в существенно сдерживающий фактор развития названных регионов. Дефицит пресной воды оказывает негативное влияние на сельскохозяйственное и промышленное производство, на развитие городской инфраструктуры и туризма. В связи с такой ситуацией продолжаются поиски альтернативных источников. Как ни странно, вода в этих регионах есть и в достаточном количестве. Это подтверждается большими ежегодными затратами на противопаводковые мероприятия. Но с гор вода стекает быстро, в свете наличия на рельефе аллювиально-делювиальных грунтов с большим коэффициентом фильтрации. Например, на полуострове Крым среднегодовое количество осадков составляет 1000–1500 мм. Площадь водосбора может быть оценена в более чем 12300 км². Таким образом, даже по скромным подсчетам возможны к использованию объемы порядка 6,5 млрд м³ в год, при потребности порядка 2 млрд м³ в год. Но водохранилища надо выносить в горы, где они обеспечат лишь локальное воздействие на экосистемы что в большинстве своем положительно, однако глубокие ущелья однозначно обеспечат лишь малые площади затопленных земель и при этом наличие гор, способствует минимизации строительных затрат при возведении. На сегодня разработаны способы и средства, их реализующие, специально для аккумулирования стока атмосферных осадков в горных условиях [1–3]. Повсеместное внедрение указанных технологий позволит организовать к использованию вышеуказанные объемы пресной воды. Однако проектирование водохранилищ в горной местности наталкивается на ряд нерешенных вопросов одним из которых является вопрос перемещения основания плотины в зависимости от переменного уровня воды в верхнем и нижнем бьефах сооружения.

Целью работы является анализ горизонтальных напряжений в плотине, при работе в сложных инженерно-геологических условиях, взятого за исследуемую функцию отклика Y, при аргументах влияния – напорах в верхнем и нижнем бьефах X_1 и X_2 сооружения.

Методика исследований. Для анализа поведения объекта, был использован метод системного анализа, где за подсистемы брались грунтовое основание плотины, собственно плотина, напоры воды в верхнем и нижнем бьефах.

На рис. 1 представлен разрез по грунтовому основанию плотины, выполненный при инженерно-геологических изысканиях, где показано 5 инженерно-геологических элементов: 1 – насыпные грунты; 2 – почва глинистая; 3 – глины полутвердые, легкие; 4 – гравийный грунт с суглинистым заполнителем; 5 – суглинки полутвердые, гравелистые.

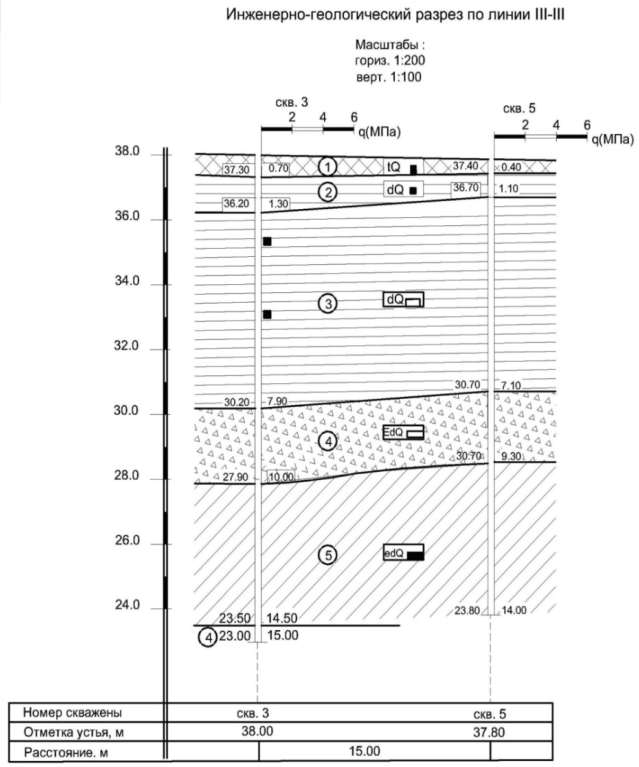

Рис. 1. Разрез по грунтовому основанию плотины

Реализация цели работы осуществлялась путем численного моделирования объекта в программном комплексе MIDAS GTX NX, конечно-элементная модель (МКЭ) которого представлена на рис. 2.

Результаты расчета модели позволили определить напряженно-деформированное состояние на объекте в зависимости от уровней воды в бьефах сооружений. Элемент расчета, приведен в табл. 1, для напоров в верхнем бьефе (X_1), соответственно изменяющегося от 1 до 9 м, и в нижнем бьефе (X_2) от 0,8 до 2,55 м. При этом горизонтальные напряжения, TOTAL S-XX, kN/m², взяты за функцию отклика.

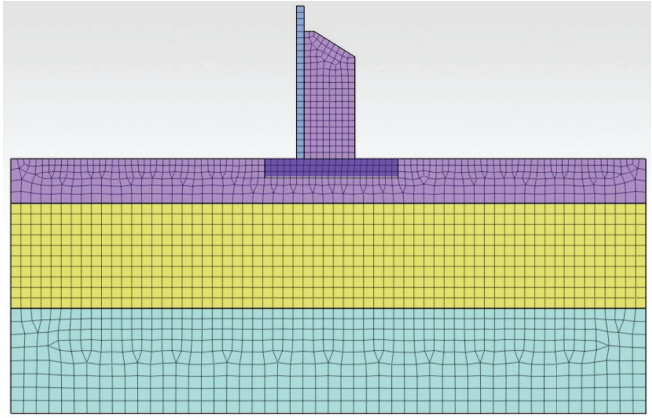

Рис. 2. Конечно-элементная модель объекта исследования

Таблица 1

Напряженно-деформированное состояние объекта при уровне воды в нижнем бьеф 1,55 м

Номер опыта	Уровень воды		Горизонтальное напряжение, TOTAL S-XX, кН/м²
	верхний бьеф X_1	нижний бьеф X_2	
1	1	1,55	–35,14
2	2	1,55	–36,62
3	3	1,55	–38,09
4	4	1,55	–39,56
5	5	1,55	–41,03
6	6	1,55	–42,48
7	7	1,55	–43,91
8	8	1,55	–45,28
9	9	1,55	–46,61

Визуализированные результаты расчета модели, а именно горизонтального напряжения в плотине, в зависимости от уровня воды в верхнем бьефе сооружения (X_1) изменяющегося от 1 до 9 м и при уровне воды в нижнем бьефе сооружения (X_2), соответственно равного 1,55 м, приведены на рис. 3.

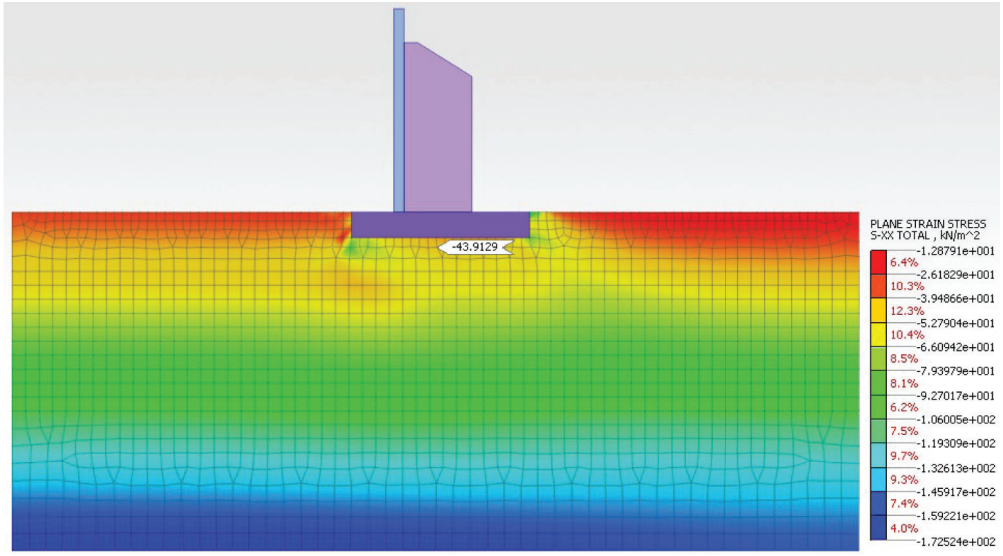

Рис. 3. Горизонтальное напряжение, TOTAL S-XX kN/m², при уровне воды в верхнем бьефе 7 м и нижнем 1,55 м

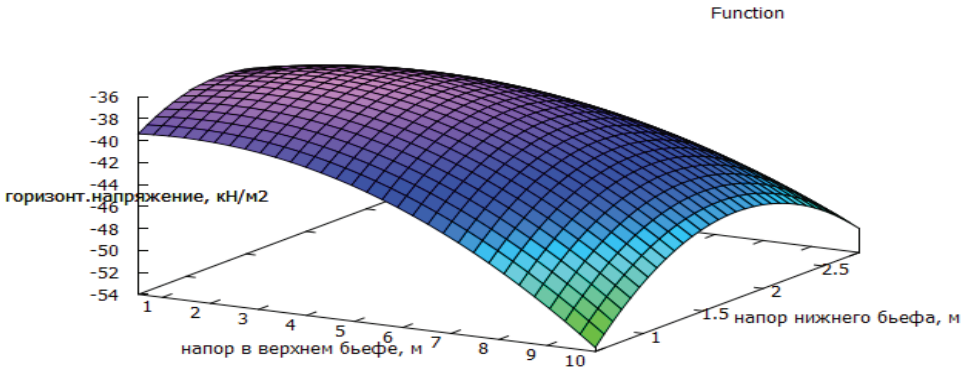

Рис. 5. Визуализированная математическая модель исследуемого горизонтального напряжения

Посредством имитационного моделирования исследовали работу плотины, а именно горизонтальное напряжение, TOTAL S-XX kN/m², от принятых к анализу факторов. Построены регрессионные уравнения в программном комплексе wxMaxima при итерационном шаге по аргументу уровень воды в верхнем бьефе – 1,0 м, а по уровню воды в нижнем бьефе – 0,25 м.

Опираясь на предыдущие исследования данного вопроса [2, 3] функциональную связь с аргументами наиболее рационально представить в виде полинома:

$$Z = a + bH + cP + dA + eH^2 + fP^2.$$

В программе wxMaxima данный файл записывается следующим образом: s: lsquares_estimates (M, [x, y, z], $z = a + b \times x + c \times y + d \times x \times y + e \times x^2 + f \times y^2$, [$a$, b, c, d, e, f]);

В результате расчета файла имеем следующие выражения, преобразованные в десятичные дроби с помощью файла float,: a = –45,8186, b = 0,20497, c = 13,5958, d = 0,5751, e = –0,1952, f = –5,4445.

Результатом представленных расчетов является математическая модель следующего вида:

$$Z(x, y) = -45{,}8186158 + 0{,}2049686x + 13{,}595783y + 0{,}575079xy - 0{,}195196x^2 - 5{,}44449y^2.$$

Для визуализации математической модели применили файл wx plot 3d, при следующих параметрах изменения аргументов: [x, 0.5, 10.0], [y, 0.6, 2.8]. Результат – функция Z (горизонтальное напряжение (кН / м²), рис. 5.

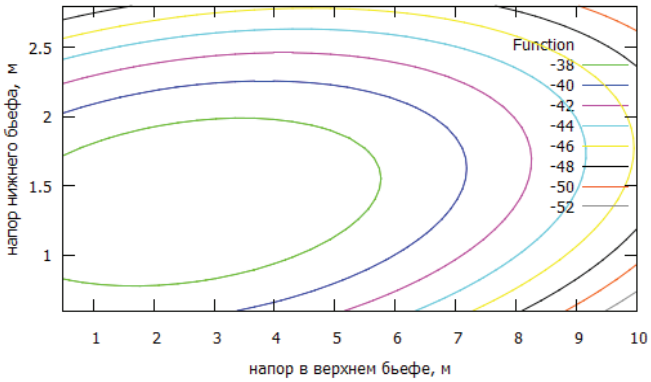

Рис. 6. Линии уровня по поверхности отклика

Дальнейшее исследование предполагает воспроизведение линий уровня по поверхности отклика, при тех же параметрах изменения аргументов [4–6]. Линии уровня, представлены на рис. 6.

Анализ линий уровня по поверхности отклика, позволяет констатировать, что в исследуемом диапазоне изменения аргументов, а именно напора в верхнем бьефе X_1 и напора со стороны нижнего бьефа X_2 горизонтальное напряжение в теле плотины изменяется от –38 до –52 кН/м², причем в исследуемом факторном пространстве принятых аргументов и функций отклика находятся экстремумы последних.

Исследование линий уровня предполагает анализ функций при установлении одного из аргументов на постоянном уровне [7–10]. Вначале рассмотрим влияние напора со стороны нижнего бьефа на горизонтальное напряжение в теле плотины, при постоянных напорах со стороны верхнего бьефа, что в программе обозначится следующими выражениями: $F(1.0, y)$; $F(5.0, y)$; $F(10.0, y)$. Для представленных постоянных из математической модели были получены нижеследующие уравнения, по которым построены сечения при постоянных расчетных напорах в верхнем бьефе, нашедших отражение на рис. 7:

$$F_1(x) = -5{,}44449x^2 + 14{,}170862x - 45{,}8088432;$$

$$F_2(x) = -5{,}44449x^2 + 16{,}471178x - 49{,}6736728;$$

$$F_3(x) = -5{,}44449x^2 + 19{,}346573x - 63{,}2885298.$$

Анализ уравнений и графиков функций позволяет сделать следующие выводы, что при постоянных значениях напора в верхнем бьефе, горизонтальные напряжения в теле плотины будет иметь экстремальные значения по минимуму. Причем можно наблюдать тренд, что при напоре в верхнем бьефе 1,0 м минимальное значение горизонтального напряжения S-XX равно 36,6 кН/м²; при напоре в верхнем бьефе 5,0 м минимальное значение горизонтального напряжения S-XX равно 37,2 кН/м²; при напоре в верхнем бьефе 10,0 м ми-

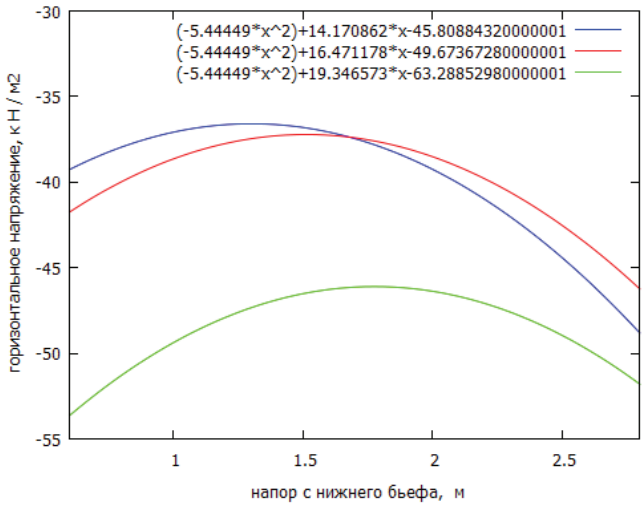

Рис. 7. Сечения по линиям уровня при постоянных значениях напора в верхнем бьефе, 1,0; 5,0 и 10,0 м

нимальное значение горизонтального напряжения S-XX равно 46,1 кН/м². Таким образом, с увеличением напора в верхнем бьефе плотины, во-первых, увеличивается горизонтальное напряжение, а во-вторых с увеличением напора в верхнем бьефе плотины и увеличении напора со стороны нижнего бьефа, экстремальное значение функции отклика наступает при все больших значениях напора со стороны нижнего бьефа.

Рассмотрим влияние напора со стороны верхнего бьефа на горизонтальное напряжение в теле плотины, при постоянных напорах со стороны нижнего бьефа, что в программе обозначится следующими выражениями: $F(x, 0.6)$; $F(x, 1.8)$; $F(x, 2.8)$. Для представленных постоянных из математической модели были получены нижеследующие уравнения, по которым построены сечения при постоянных расчетных напорах в нижнем бьефе, нашедших отражение на рис. 8:

$$F_1(x) = -0{,}195196x^2 + 0{,}550016x - 39{,}6211624;$$

$$F_2(x) = -0{,}195196x^2 + 1{,}2401108x - 38{,}986354;$$

$$F_3(x) = -0{,}195196x^2 + 1{,}8151898x - 50{,}435225.$$

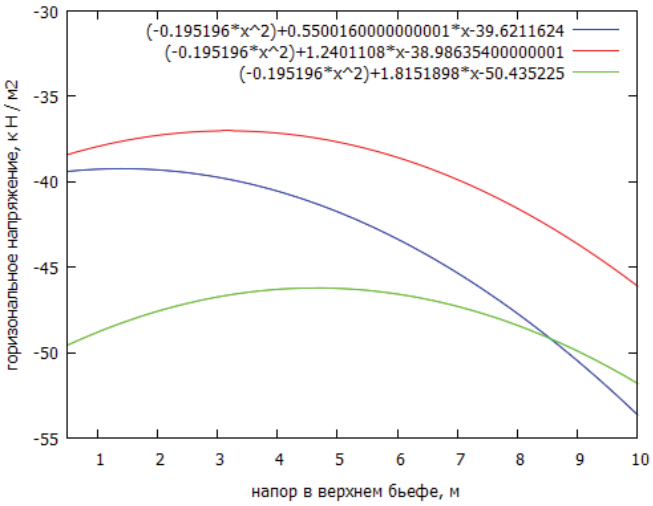

Рис. 8. Сечения по линиям уровня при постоянных значениях напора в нижнем бьефе, 0,6; 1,8 и 2,8 м

Анализ уравнений и графиков функций позволяют сделать следующие выводы, что при постоянных значениях напора в нижнем бьефе, горизонтальные напряжения в теле плотины будут иметь экстремальные значения по минимуму.

При напоре в нижнем бьефе 0,6 м минимальное значение горизонтального напряжения S-XX равно 39,2 кН/м²; при напоре в нижнем бьефе 1,8 м минимальное значение горизонтального напряжения S-XX равно 37,1 кН/м². Таким образом имеем, что при увеличении напора в нижнем бьефе с 0,6 м до 1,8 м значение горизонтального напряжения S-XX уменьшается на 2,1 кН/м². При напоре в нижнем бьефе 2,8 м минимальное значение горизонтального напряжения S-XX равно −46,2 кН/м².

Результаты исследований. С увеличением напора в нижнем бьефе плотины, во-первых, уменьшается горизонтальное напряжение, при увеличении напора в нижнем бьефе плотины в диапазоне первой половины изменения аргумента; во-вторых, при дальнейшем увеличением напора в нижнем бьефе плотины экстремальное значение функции отклика увеличивается.

При постоянном напоре в нижнем бьефе плотины равном 0,6 м и минимальном напоре со стороны верхнего бьефа равном 0,5 м имеем горизонтальное напряжение равное −39,4 кН/м², при максимальном напоре со стороны верхнего бьефа равном 10,0 м, имеем наибольшее горизонтальное напряжение равное −53,7 кН/м², причем это наибольшее значение функции при всех вариантах изменения аргументов.

Таким образом, в исследуемом диапазоне изменения напора в нижнем бьефе плотины от 0,6 до 2,8 м обнаружено его неоднозначное влияние на значения горизонтального напряжения S-XX. При наименьшем напоре со стороны нижнего бьефа в 0,6 м имеем, во всем диапазоне изменения напора в верхнем бьефе, значения горизонтальных напряжений S-XX больше, чем при напоре в нижнем бьефе, равном 1,8 м. В свою очередь именно при наименьшем напоре в нижнем бьефе наблюдаются наибольшие значения горизонтального напряжения S-XX, даже большие, чем при напоре в нижнем бьефе равном 2,8 м.

Заключение. Проведенные исследования позволяют констатировать, что для небольших водохранилищ, с высотой плотины порядка 10 м, формирующих, бассейны декадного регулирования, влияние увеличения напора верхнего бьефа однозначно обеспечивает увеличение горизонтальных напряжений в теле плотины. При этом увеличение напора верхнего бьефа до 5 м значимого влияния на горизонтальное напряжение в теле плотины не вносит, во всем диапазоне изменения напора со стороны нижнего бьефа от 0,5 до 2,8 м. Дальнейшее увеличение напора

верхнего бьефа до 10 м обеспечивает пропорциональное увеличение горизонтального напряжения в теле плотины в пределах до 10 %.

Постоянное значение подпора со стороны нижнего бьефа, находящееся в пределах от 1,5 до 1,8 м, уменьшает горизонтальные напряжения в теле плотины в пределах до 18 %.

Отсюда следует, что правильный выбор эксплуатационного режима напора на плотине и подпора на ней, может способствовать минимизации горизонтальных напряжений в теле плотины и тем самым улучшить эксплуатационную надежность сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дегтярев Г.В., Дацьо Д.А.* Особенности расчета плиты покрытия как несущего основания // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар. – 2016. – № 5 (62). – С. 157–165.

2. *Дегтярева О.Г.* Исследование жесткостных характеристик гравитационной и контрфорсной плотин посредством анализа собственных колебаний // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – №6 (63). – С. 169–177.

3. Моделирование в САЕ системе осадки плитного фундамента низконапорной плотины / О.Г. Дегтярева [и др.] // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – №1 (64). – С. 221–227.

4. *Degtyareva O.G., Vasiliev S.M.* The results of determining the structural elements' displacements when using various soil models and software // International conference on Construction and Architecture: Structural mechanics and construction theory, civil and industrial engineering (CATPID-2020). 2020. Vol. 913. 022051.

5. *Degtyareva O.G., Vasiliev S.M.* The base soil local sagging zones' influence assessment on the water retaining structure's operability // International conference on Construction and Architecture: Structural mechanics and construction theory, civil and industrial engineering (CATPID-2020). 2020. Vol. 913. 022055.

6. *Sekisov A.N., Degtyareva O.G., Samsonova N.V., Grigoryan M.N.* Development of the Methods Improving the Production Costs Formation // International conference on Construction and Architecture: theory and practice of industry development (CATPID-2018). Trans Tech Publications, Switzerland. – 2018. Vol. 931. P. 1210–1213.

7. *Takhumova O., Degtyareva O.G.* Cost-benefit analysis of the cast-in-place building framework vertical bearing structural members // International conference on Construction and Architecture: theory and practice of industry development (CATPID-2019). 2019. Vol. 698.

8. *Khashirova T.Yu., Ksenofontov A.S., Lamerdonov Z.G., Edgulova E.K., Nartokov H.S.* Information technologies at the choice of an optimum bank protection structures for highways in emergencies // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). 2018. P. 656–658.

9. *Abdrazakov F.K., Orlova S.S., Pankova T.A., Mirkina E.N., Fedyunina T.V.* The monitoring of condition of hydraulic structures // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2018. Vol. 10. No. 13. P. 1952–1958.

10. *Edgulova E.K., Khashirova T.Yu., Moskalenko L.A., Lamerdonov Z.G., Denisenko V.A.* Algorithm parallelizing for classifying the complex // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). 2018. P. 620–622.

Абдразаков Фярид Кинжаевич, *д-р техн. наук, проф. кафедры «Природообустройство, строительство и теплоэнергетика», Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова, Россия.*

410056, г. Саратов, ул. Советская, 60.

Тел.: (8452) 74-96-63.

Дегтярев Владимир Георгиевич, *канд. техн. наук, доцент кафедры «Гидравлика и сельскохозяйственное водоснабжение», Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Россия.*

Коженко Наталия Владимировна, *канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Строительное производство», Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Россия.*

350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13.

Тел.: 89673029808.

Ключевые слова: *гидромелиоративная плотина; напорно-переменный режим; программные комплексы; математическое моделирование и анализ.*

ANALYSIS OF THE BASE OF A RECLAMATION DAM WHEN OPERATING IN A PRESSURE VARIABLE MODE

Abdrazakov Fyarid Kinzhaevich, *Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair "Environmental Engineering, Construction and Heat Power Engineering", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, Russia.*

Degtyarev Vladimir Georgievich, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Hydraulics and Agricultural Water Supply", Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Russia.*

Kozhenko Natalya Vladimirovna, *Candidate of Technical Sciences, Senior Teacher of the chair "Construction production", Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Russia.*

Keywords: *hydromeliorative dam; pressure-variable mode; software systems; mathematical modeling and analysis.*

A calculation was carried out and a numerical modeling of the foundation of an hydromeliorative dam was carried out during its operation in a pressure-variable mode, using the MIDAS GTX NX software package, by building a computational model based on the real engineering-geological state of the object, when horizontal stresses (kN/m²) depending on the variable water level in the upstream and downstream, a mathematical model of the process is obtained from the named factors and the degree of influence of each of them is revealed.