Научная статья
УДК 626.01, 624.136, 624.138

ПРОВЕРКА НОРМАТИВНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ЯДРЕ КАМЕННО-ЗЕМЛЯНОЙ ПЛОТИНЫ

М.П. Саинов[1,2*], А.А. Болдин[2]

[1] Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия
* E-mail: SainovMP@mpei.ru

Аннотация. Процесс консолидации грунта в ядре Нурекской плотины по данным натурных измерений порового давления имеет сложный характер. На начальных этапах строительства происходил интенсивный рост порового давления, но затем наблюдалось его быстрое рассеивание и падение коэффициента порового давления. Результаты натурных измерений были сверены с результатами расчёта коэффициента порового давления по приближённой аналитической методике, рекомендуемой российским нормативным документом. Сравнение показало, что эта методика не может точно воспроизвести реальный характер изменения во времени коэффициента порового давления, но даёт приемлемые результаты при коэффициенте фильтрации $4 \cdot 10^{-8}$ см/с.

***Ключевые слова*:** *консолидация грунта; поровое давление; каменно-земляная плотина с ядром; фильтрация*.

Для цитирования: Саинов М.П., Болдин А.А. Проверка нормативной методики оценки порового давления в ядре каменно-земляной плотины // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2025. Т. 11. № 1. С. 55–65.

Original article

VERIFICATION OF THE REGULATORY METHOD FOR ESTIMATE PORE WATER PRESSURE IN THE EARTH CORE OF ROCKFILL DAM

M.P. Sainov[1,2*], A.A. Boldin[2]

[1] National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia
[2] Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia
* E-mail: SainovMP@mpei.ru

Abstract. According to the data of pore pressure field measurements, the process of soil consolidation in the core of Nurek dam bears a complicated character. At the initial stages of construction there was an intensive growth of pore water pressure, then its fast dissipation and drop of pore pressure coefficient took place. The results of field measurements were checked with the results of calculation of pore pressure coefficient by approximate analytical methodology recommended by the Russian norms. Comparison showed that this methodology cannot accurately simulate the real character of time dependent variation of pore pressure coefficient, but gives acceptable results at seepage coefficient $4 \cdot 10^{-8}$ cm/s.

Key words: *soil consolidation; pore water pressure;, earth core rockfil;, seepage.*

For citation: Sainov M.P., Boldin A.A. Verification of the regulatory method for estimate pore water pressure in the earth core of rockfill dam. *Journal of Science and Education of North-*

© Саинов М.П., Болдин А.А. 2025

West Russia. 2025. Vol.11, No.1, pp. 55–65.

Введение

В ядре каменно-земляной плотины, которое выполняется из глинистого грунта, в процессе строительства всегда возникает избыточное поровое давление. Оно может весьма высоким и представлять опасность для устойчивости сооружения [1]. Со временем за счёт оттока из грунта поровой воды происходит консолидация, уплотнение грунта. Консолидация сопровождается уменьшением избыточного порового давления и ростом порового давления от фильтрации через ядро.

Определение порового давления представляет собой сложную задачу, т.к. процесс консолидации – нестационарный и при расчёте требуется рассматривать множество моментов времени, на каждом из которых нужно моделировать процессы фильтрации воды и формирования напряжённо-деформированного состояния грунтового массива в их взаимосвязи. Для решения этой задачи применяют аналитические методы и методы численного моделирования [2–4].

В 1960-х годах А.А. Ничипорович и Т.И. Цыбульник на основе теории фильтрационной консолидации разработали аналитический метод расчёта порового давления в ядре каменно-земляной плотины [5]. Однако в этом методе сделаны определённые допущения, которые не всегда позволяют адекватно моделировать процесс консолидации грунта. Об этом свидетельствуют результаты анализа натурных измерений порового давления в ядре Нурекской плотины.

Нурекская плотина представляет собой сверхвысокую каменно-земляную плотину, максимальная строительная высота которой составляет 300 м. Ядро выполнено из супеси сафедобского месторождения, а упорные призмы – из гравийно-галечникового грунта.

Строительство плотины велось около 9 лет. В процессе строительства осуществлялся мониторинг порового давления в ядре. Его результаты опубликованы в [6, 7] и представлены на рис.1. Из рис.1 видно, что в первые 6 лет строительного периода наблюдался интенсивный рост порового давления, но в последние 3 года произошло интенсивное рассеивание избыточного порового давления. В эксплуатационный период консолидация замедлилась.

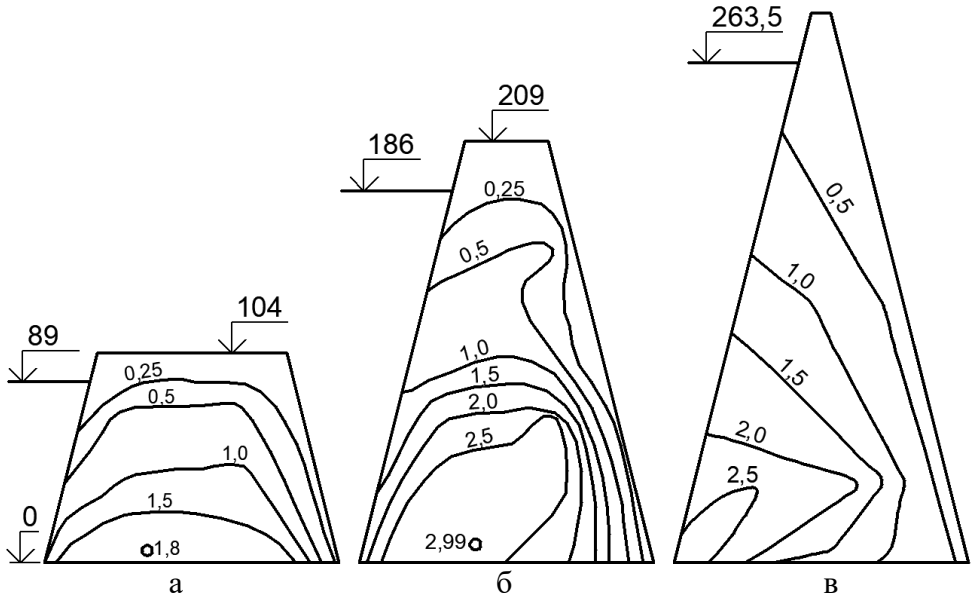


Рисунок 1 – Поровое давление в ядре Нурекской плотины в период строительства по результатам натурных измерений (в МПа)
а – через 2 года после начала строительства, б – через 6 лет после начала строительства, в – через 9 лет после начала строительства. Высотные отметки указаны относительными.

Об ускорении консолидации свидетельствует также изменение во времени максимального значения коэффициента порового давления (рис.2). Этот коэффициент характеризует, какую часть внешней нагрузки воспринимает жидкая фаза грунта. Коэффициент порового давления выражает долю порового давления по отношению к максимальному сжимающему напряжению. Применительно к задаче о каменно-земляной плотине это вертикальное нормальное напряжение σ_y. Напряжение σ_y определялось из расчёта напряжённо-деформированного состояния [8]. Оно составило: для момента времени 1 – 2,2 МПа, для момента 2 – 3,8 МПа, для момента 3 – 4,5 МПа. Рис.2 наглядно демонстрирует эффект быстрого рассеивания порового давления – коэффициент порового давления снижается на завершающем этапе строительства примерно на 30% несмотря на рост нагрузок.

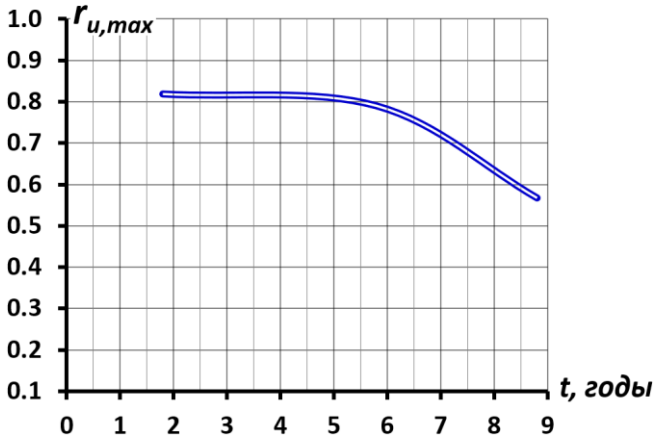


Рисунок 2 – Изменение коэффициента порового давления по данным натурных измерений.

Эффект быстрого рассеивания порового давления сложно объяснить с точки зрения теории фильтрационной консолидации. Расчёты, которые были выполнены нами по методу Ничипоровича-Цыбульник, прогнозируют лишь рост порового давления из-за увеличения нагрузки [9, 10]. Единственным фактором, который мог бы объяснить ускорение консолидации в рамках теории фильтрационной консолидации является увеличение водопроницаемости грунта.

В [7] представлены результаты подсчёта коэффициента фильтрации грунта, которые были выполнены другими авторами путём обратного анализа из условия достижения соответствия результатов расчёта натурным данным. Они показаны на рис.3. Было получено, что для того, чтобы достичь быстрого рассеивания порового давления коэффициент фильтрации супеси в нижней части ядра должен составлять примерно $2 \cdot 10^{-6}$ см/с. Это слишком высокое значение для глинистого грунта. При этом в нижней части ядра коэффициент фильтрации должен быть примерно на порядок выше, чем в верхней части. Эти данные противоречат теоретическим представлениям о напряжённо-деформированном состоянии каменно-земляных плотин.

При строительстве Нурекской плотины проводились экспериментальные исследования проницаемости сафедобской супеси, они опубликованы в монографии Ю.К. Зарецкого [11]. На номограмме (рис.4) показаны полученные экспериментально значения начального (при укладке) коэффициента фильтрации k_f сафедобской супеси. Эксперименты показали, что коэффициента фильтрации изменяется в широких пределах в зависимости от нескольких факторов. Первый фактор – это содержание в грунте мелкозернистых фракций (менее 2 мм), второй фактор – степень уплотнения грунта.

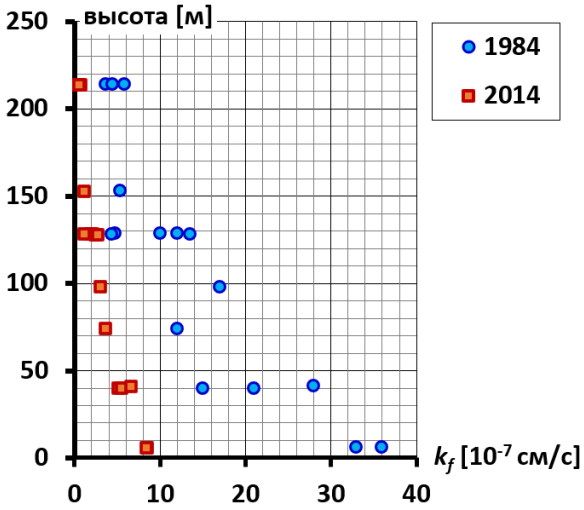


Рисунок 3 – Значения коэффициента фильтрации грунта ядра Нурекской плотины по результатам обратного расчётного анализа

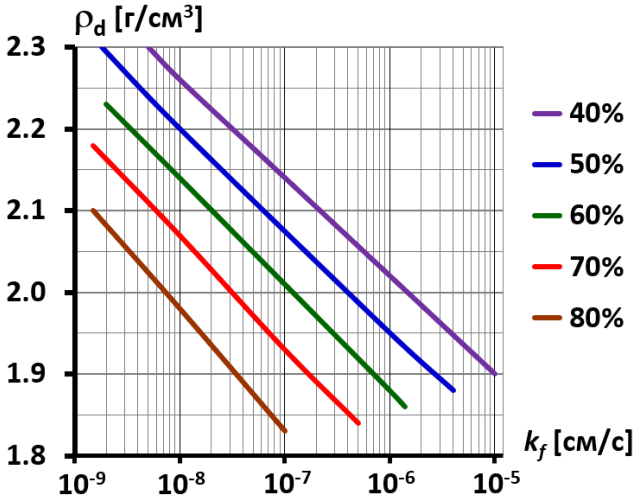


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента фильтрации сафедобской супеси от плотности и содержание мелкозёма.
Числа обозначают процентное содержание в грунте мелкозернистой фракции

По данным [12] количество мелкозёма в сафедобской супеси, уложенной в тело плотины, составляет от 36 до 71%, а грунт при строительстве уплотнялся до ρ_d=2,10–2,15 г/см^3 (ρ_d – плотность сухого грунта). В соответствии с рис.4 для указанных диапазонов значений факторов коэффициент фильтрации k_f должен был составить от $2\cdot10^{-9}$ см/с до $2\cdot10^{-7}$ см/с.

Разброс значений коэффициента фильтрации очень широкий, его граничные значения отличаются примерно в 100 раз. Но тем не менее, значение коэффициента $2\cdot10^{-6}$ см/с, полученное обратным анализом, не входит в указанный интервал, оно на порядок больше, чем самое высокое экспериментальное значение. Кроме того, в сооружении происходит уплотнение грунта и, соответственно, снижение его водопроницаемости. По данным экспериментов коэффициент фильтрации снижается ещё примерно в 2–3 раза [11]. Это подтверждается натурными наблюдениями (рис.3).

Всё это ставит под вопрос корректность подобранных значений коэффициента фильтрации и приведённых в [7]. Соответственно, сомнительной является и сама гипотеза о повышенной проницаемости грунта нижней части ядра как причине ускорения его консолидации.

Ещё одно предположение о причинах резкого снижения порового давления заключается во влиянии дилатансии, которое высказано в [2]. Дилатансия – это изменение объёмной деформации при сдвиге. Она может быть положительной (увеличение объёма) и отрицательное (уменьшение объёма). Увеличение объёма действительно могло бы повлечь за собой уменьшение порового давления. Однако положительная дилатансия наблюдается только при приближении грунта к предельному состоянию, а чаще в теле плотины имеет место не разуплотнение, а доуплотнение грунта. По этой причине можно считать, что влияние дилатансии не могло иметь решающего значения.

В связи с этим интересно оценить точность и адекватность прогноза порового давления по той аналитической методике, которая рекомендована в Своде правил (СП)[1] .

В этой статье описаны результаты выполненного нами расчётного исследования, которое должно ответить на следующие вопросы:

- воспроизводит ли методика СП эффект быстрого рассеивания порового давления в ядре каменно-земляной плотины?
- соответствует ли интенсивность порового давления в ядре, определённая по методичке СП, данным натурных измерений?
- при каких значениях показателей физико-механических свойствах грунта возможно соответствие натурных и расчётных данных?

Методика

Методика, рекомендованная СП[1], не предназначена для точного определения порового давления, она рекомендована для оценки необходимости учёта порового давления при проектировании гидротехнических сооружений. Эта методика заключается в определении максимально возможного значения коэффициента порового давления.

Методика СП учитывает все ключевые факторы, которые определяют величину порового давления: внешняя нагрузка, длительность её восприятия и физико-механические свойства грунта. Из физико-механических свойств учитываются сжимаемость, водопроницаемость, плотность и степень водонасыщения. Водопроницаемость характеризуется коэффициентом фильтрации, а сжимаемость принято выражать коэффициентом сжимаемости m.

В нормативной методике коэффициент порового давления $r_{u,max}$ выражен через два безразмерных параметра r_{uc} и r_{u0}:

$$r_{u,max} = r_{uc} \cdot r_{u0}. \quad (1)$$

Величина r_{uc} выражает интенсивность начального порового давления. Она определяется по номограмме на рис.5 в зависимости от внешнего давления p и параметра $П$. В свою очередь параметр $П$ определяется по номограмме на рис.6 по зависимости от коэффициента сжимаемости a_{max}, начального коэффициента пористости e_i и начальной степени водонасыщения $S_{r,i}$.

Коэффициент $C_{v,0}$ зависит от времени приложения нагрузки t, а также длины d пути фильтрации:

$$C_{v,0} = C_{v,min} \cdot \frac{t}{d^2}, \quad (2)$$

где $C_{v,min}$ – наименьшее значение коэффициента консолидации.

[1] СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*. Москва. ФАУ «ФЦС», 2012. 86 с.

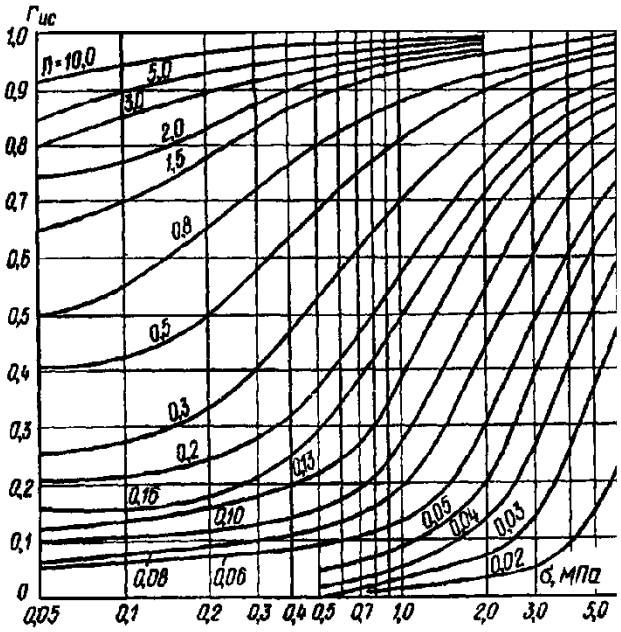


Рисунок 5 – Номограмма для определения параметра r_{uc}

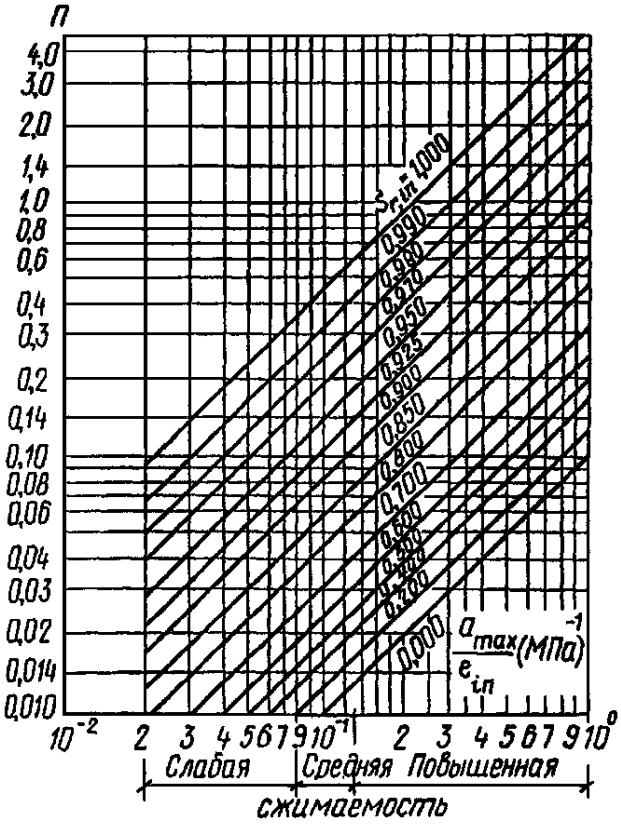


Рисунок 6 – Номограмма для определения параметра П

Величина r_{u0} отражает степень рассеивания порового давления с течением времени, она определяется по графику рис.7 через $C_{v,0}$.

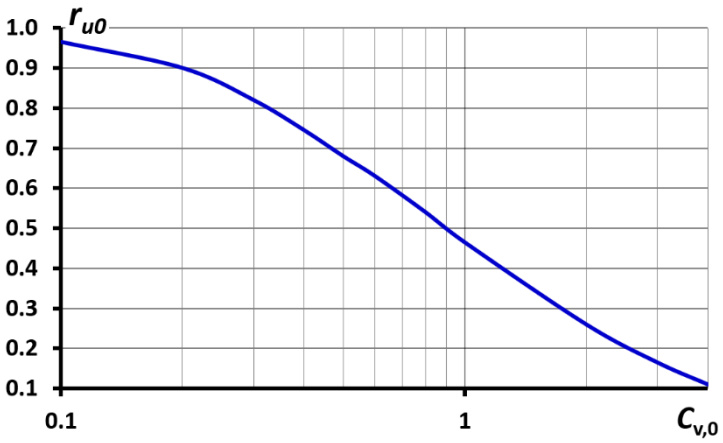


Рисунок 7 – График зависимости для определения коэффициента r_{u0}

.Применительно к каменно-земляной плотине с ядром t – это время возведения плотины на необходимую высоту, а d – это полуширина ядра плотины. Т.к. максимальное значение порового давления наблюдается у подошвы плотины, поэтому d равно полуширине ядра понизу (71,7 м).

Коэффициент консолидации учитывает сжимаемость и водопроницаемость грунта, он определяется по формуле.

$$C_{v,min} = \frac{k_f \cdot K}{\rho_w \cdot g} = \frac{k_f \cdot (1 + e_i)}{\rho_w \cdot g \cdot a_{max}}, \quad (3)$$

где k_f – коэффициент фильтрации, ρ_w – плотность воды, K – модуль объёмной деформации грунта.

Расчёт по методике СП 39 выполнялся для трёх моментов времени строительного периода, которые соответствуют возведению ядра на высоту 104, 209, 269 м. Срок возведения ядра принимался соответственно 1,8, 5,8 и 8,8 лет.

Плотность супесчаного грунта в сухом состоянии была принята ρ_d=2,1 т/м^3, соответственно начальное значение коэффициента пористости составляет e_i≅0,30.

Модуль объёмной деформации грунта был принят K=37 МПа, таким же как принимался в наших исследованиях [8]. Соответственно, a_{max}/e_i = 0,12, такой грунт в соответствии с номограммой на рис.6 характеризуется как грунт средней сжимаемости.

В силу неопределённости других показателей физико-механических свойств грунта расчёт выполнялся для нескольких вариантов, которые отличались коэффициентом фильтрации k_f и степенью водонасыщения S_r. Рассматривались три варианта значений коэффициента фильтрации ($1\cdot10^{-8}$, $5\cdot10^{-8}$, $1\cdot10^{-7}$ см/с), и три значения степени водонасыщения (0,85, 0,95 и 0,98). Номер варианта будем обозначать двойным номером, например «А1». Буква обозначает значение степени водонасыщения, а цифра – значение коэффициента фильтрации.

Результаты

Для 9 вариантов свойств грунта ядра были вычислены максимальные значения коэффициента порового давления.

По номограмме на рис.6 было определено, что при S_r=0,85 (варианты серии А) параметр П=0,07, при S_r=0,95 (варианты серии В) П=0,17, при S_r=0,98 (варианты серии С) П=0,30. Вычисление коэффициента консолидации и параметра r_{uc} представлены в табл.1.

Результаты расчёта коэффициента порового давления для рассматриваемых вариантов сведены в табл.2 и представлены на рис.8.

Таблица 1 – Вычисление коэффициента консолидации и начального коэффициента порового давления

вариант	k_f, см/с	C_v	r_{uc}		
			при S_r =0,85	при S_r =0,95	при S_r =0,98
1	$1\cdot10^{-8}$	$3{,}8\cdot10^{-7}$	0,41	0,75	0,85
2	$4\cdot10^{-8}$	$1{,}5\cdot10^{-6}$	0,64	0,86	0,92
3	$1\cdot10^{-7}$	$3{,}8\cdot10^{-6}$	0,69	0,87	0,93

Таблица 2 – Вычисление значений коэффициента порового давления

вар.	S_r	k_f, см/с	коэф. консолидации $C_{v,0}$			коэф. порового давления $r_{uc,max}$		
			момент 1	момент 2	момент 3	момент 1	момент 2	момент 3
A.1	0,85	$1\cdot10^{-8}$	0,017	0,054	0,081	0,43	0,65	0,68
A.2	0,85	$5\cdot10^{-8}$	0,08	0,27	0,41	0,40	0,53	0,51
A.3	0,85	$1\cdot10^{-7}$	0,17	0,54	0,81	0,37	0,42	0,37
B.1	0,95	$1\cdot10^{-8}$	0,017	0,054	0,081	0,78	0,87	0,86
B.2	0,95	$5\cdot10^{-8}$	0,08	0,27	0,41	0,74	0,72	0,64
B.3	0,95	$1\cdot10^{-7}$	0,17	0,54	0,81	0,69	0,57	0,46
C.1	0,98	$1\cdot10^{-8}$	0,017	0,054	0,081	0,89	0,93	0,92
C.2	0,98	$5\cdot10^{-8}$	0,08	0,27	0,41	0,84	0,77	0,69
C.3	0,98	$1\cdot10^{-7}$	0,17	0,54	0,81	0,78	0,61	0,49

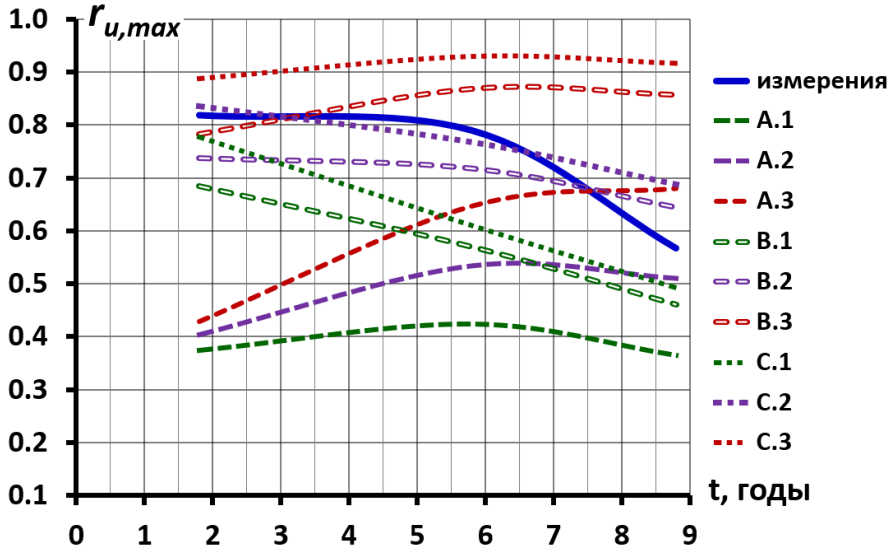


Рисунок 8 – Изменение во времени максимального значения коэффициента порового давления по результатам измерений и расчёта

Из рис. 8 видно, что при степени водонасыщения S_r=0,85 значения коэффициента порового давления существенно меньше наблюдаемых в натурных условиях, а при S_r=0,95 его уровень близок к натурному.

Заметно, что в большинстве вариантов проявляется эффект снижения коэффициента порового давления на завершающем этапе строительства, однако он проявляется гораздо слабее, чем в натурных условиях.

Самыми близкими к натурным данным являются варианты В.2 и С.2, соответствующие степени водонасыщения 0,95, 0,98 и коэффициенту фильтрации k_f=5·10^{-8} см/с. Это значение находится примерно посередине интервала значений коэффициента фильтрации, которое было определено экспериментально. Оно гораздо ниже того, которое было установлено обратным анализом.

Полученное значение коэффициента фильтрации супеси близко к тому, которое было использовано нами при численном моделировании процесса консолидации ядра Нурекской плотины [8], что подтверждает их достоверность.

Выводы

1. Методика, рекомендованная в СП, по величине и характеру изменения во времени порового давления в ядре каменно-земляной плотины в целом соответствует условиям протекания процесса консолидации грунта в ядре Нурекской плотины. Однако она не может точно воспроизвести реальный характер изменения во времени, его быстрое рассеивание на завершающем этапе строительства. Это вызвано тем, что процессы консолидации имеют более сложный характер и связаны с формированием напряжённо-деформированного состояния плотины.

2. В отличие от метода Ничипоровича-Цыбульник методика, рекомендованная в СП, даёт приемлемые результаты расчётного прогноза порового давления в ядре Нурекской плотины при коэффициенте фильтрации грунта около 5·10^{-8} см/с. Это значение соответствует результатам экспериментальных исследований. В связи с этим можно считать, что гипотеза о повышенной проницаемости грунта в нижней ядра Нурекской плотины как о причине ускорения его консолидации является несостоятельной.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rasskazov L.N., Yadgorov E.K., Nikolaev V.B. Field Observations of Soil Settlements, Displacements, and Pore Pressure in Dams // Power Technology and Engineering. 2018. Vol. 51. Issue 6. P. 611–620.

2. Aniskin N.A., Rasskazov R.N., Yadgorov E.K. Filtration, pore pressure, and settling from consolidation of an ultra-high dam. Power Technology and Engineering. 2017. Vol. 50, Issue 6. P. 600–605.

3. Akhtarpour A., Salari M. The deformation mechanism of a high rockfill dam during the construction and first impounding // Scientia Iranica A. 2020. Vol. 27, Issue 2. P. 566–587.

4. Wu Y., Zhang Y., Yu Y., Zhang Z. Consolidation analysis of Nuozhadu high earth-rockfill dam based on the coupling of seepage and stress-deformation physical state // International Journal of Geomechanics. 2016. Vol. 16, Issue 3. 04015085.

5. Ничипорович А.А., Цыбульник Т.И. Одномерная задача консолидации глинистого грунта при напряженном состоянии, соответствующем случаю плоской деформации // Труды ВОДГЕО, Гидротехника. 1972. Вып. 34. С. 3–17.

6. Goldin A.L., Rasskazov L.N. Design of earth dams. London. Taylor&Francis, 1992. 304 p.

7. Rasskazov L.N., Yadgorov E.Kh., Burenkov P.M. Pore Pressure Dissipation in the Core of the Nurek Dam // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. P.54–56.

8. Саинов М.П., Болдин А.А. Влияние напряжённо-деформированного состояния каменно-земляной плотины на формирование порового давления в ядре // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 314. С. 9-16.

9. Саинов М.П., Болдин А.А. Оценка методик расчёта порового давления в ядре каменно-земляной плотины // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т.312. С. 115-120.

10. Саинов М.П., Болдин А.А. Формирование порового давления в ядре каменно-земляной плотины от собственного веса // Гидротехника. 2024. №2. С. 10-14.

11. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов. Ростов: Изд-во Ростовского университета, 1989. 608 с.

12. Радченко В.Г., Заирова В.А. Каменно-земляные и каменно-набросные плотины. Л.: Энергия, 1971. 166 с.

REFERENCES

1. Rasskazov L.N., Yadgorov E.K., Nikolaev V.B. Field Observations of Soil Settlements, Displacements, and Pore Pressure in Dams. Power Technology and Engineering. 2018. Vol. 51. Issue 6, pp. 611–620.

2. Aniskin N.A., Rasskazov R.N., Yadgorov E.K. Filtration, pore pressure, and settling from consolidation of an ultra-high dam. Power Technology and Engineering. 2017. Vol. 50, Issue 6, pp. 600–605.

3. Akhtarpour A., Salari M. The deformation mechanism of a high rockfill dam during the construction and first impounding. Scientia Iranica A. 2020. Vol. 27, Issue 2, pp. 566–587.

4. Wu Y., Zhang Y., Yu Y., Zhang Z. Consolidation analysis of Nuozhadu high earth-rockfill dam based on the coupling of seepage and stress-deformation physical state. International Journal of Geomechanics. 2016. Vol. 16, Issue 3. 04015085.

5. Nichiporovich A. A., Tsybul'nik T.I. *Odnomernaya zadacha konsolidacii glinistogo grunta pri napryazhennom sostoyanii, sootvetstvuyushhem sluchayu ploskoj deformacii* [One-dimensional problem of consolidating clay soil in a stressed state corresponding to the plane deformation case]. *Trudy VODGEO, Gidrotekhnika*. 1972. Vol. 34, pp. 3–17.

6. Goldin A.L., Rasskazov L.N. Design of earth dams. London. Taylor&Francis, 1992. 304 p.

7. Rasskazov L.N., Yadgorov E.Kh., Burenkov P.M. Pore Pressure Dissipation in the Core of the Nurek Dam. Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50, pp.54–56.

8. Sainov M.P., Boldin A.A. *Vliyanie napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya kamenno-zemlyanoj plotiny` na formirovanie porovogo davleniya v yadre* [Impact of the stress-strain state of the earth core rockfill dam on the formation of pore water pressure]. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva* [Proceedings of the VNIIG]. 2024. Vol.314, pp.6–19.

9. Sainov M.P., Boldin A.A. *Ocenka metodik raschyota porovogo davleniya v yadre kamenno-zemlyanoj plotiny* [Assessment of methods for calculating pore water pressure in the core of earth-rockfill dam]. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva*. 2024. Vol. 312, pp.94–101.

10. Sainov M.P., Boldin A.A. *Formirovanie porovogo davleniya v yadre kamenno-zemlyanoj plotiny ot sobstvennogo vesa* [Formation of pore pressure in the earth-core rockfill dam due to the dead weight]. *Hydrotechnika*. 2024. No.2, pp.10–14.

11. Zaretsky Yu.K. *Lekcii po sovremennoj mexanike gruntov* [Lectures on modern soil mechanics]. Rostov University Publishing House. 1989, 608 p.

12. Radchenko V.G. *Kamenno-zemlyanye i kamenno-nabrosnye plotiny* [Rock-earth and rockfill dams]. Leningrad: Energiya, 1971. 166 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Саинов Михаил Петрович – доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14, стр.1, e-mail: SainovMP@mpei.ru)	*Sainov Mikhail Petrovich* – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (111250, Russia, Moscow, 14-1, Krasnokazarmennaya street, e-mail: SainovMP@mpei.ru)
Болдин Александр Анатольевич – аспирант, Московский государственный строительный университет (Национальный	*Boldin Aleksandr Anatolievich* – postgraduate student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

исследовательский университет) (129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, e-mail: alex.boldin2012@yandex.ru).	(129337, Russia, Moscow, 26, Yaroslavskoe shosse, e-mail: alex.boldin2012@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 10.01.2025; одобрена после рецензирования 24.01.2025, принята к публикации 27.01.2025.
The article was submitted 10.01.2025; approved after reviewing 24.01.2025; accepted for publication 27.01.2025.