

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ И ПУАССОНА ГОРНЫХ ПОРОД ИСКУССТВЕННО НАРУШЕННОГО СЛОЖЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НОЙОН-ТОЛОГОЙ

В. А. Бабелло¹, А. В. Бейдин¹

¹ Забайкальский государственный университет, Чита, Россия

Аннотация: Успешное решение проблемы изучения поведения массивов пород нарушенного сложения при строительстве высоких дамб и отвалов зависит от надежности и достоверности показателей их механических свойств. Целью работы является определение коэффициента относительной поперечной деформации пород нарушенного сложения в условиях, максимально приближенных к натурным. Сложность определения упомянутых параметров в лабораторных условиях связана с несопоставимостью размеров отдельных кусков породы и рабочих камер приборов, а также влиянием масштабного фактора. Для разрешения этого вопроса в опытах был использован крупногабаритный стенд с силовыми рамами для восприятия реактивных усилий, передаваемых гидродомкратами и заполняемый породами нарушенного сложения. Для проведения опытов было изготовлено необходимое оборудование – штампы, срезные кольца, тележки, пластины и т. д. При этом для определения коэффициента относительной поперечной деформации были использованы оригинальные оборудование и методика, новизна которых подтверждена патентом на изобретение. Таким образом, были получены наиболее важные характеристики механических свойств пород нарушенного сложения, использованные для проектирования высоких дамб хвостохранилища. В результате проведенных исследований получены данные о влиянии процентного содержания в породах различных по крупности фракций на величины коэффициентов бокового давления и Пуассона при одном и том же вертикальном давлении. Традиционное задание постоянного значения коэффициента Пуассона в геомеханических расчетах геомассивов различного гранулометрического состава требует соответствующей корректировки.

Ключевые слова: крупнообломочный грунт нарушенной структуры, полевые испытания, гранулометрический состав, метод ленты, коэффициент бокового давления, коэффициент Пуассона, механические свойства.

Для цитирования: Бабелло В. А., Бейдин А. В. Оценка коэффициентов бокового давления и пуассона горных пород искусственно нарушенного сложения месторождения нойон-тологой // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3-2. – С. 5–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_32_0_5.

Assessment of lateral earth pressure coefficient and Poisson's ratio in artificially damaged enclosing rock mass of the Noyon-Tologoy deposit

V. A. Babello¹, A. V. Beydin¹

¹ Transbaikal State University, Chita, Russia

Abstract: Efficient analysis of the rock mass behavior during construction of high dams and dumps depends on the reliable estimates of their mechanical properties. This research goal is to determine relative transverse strain of damaged rocks in the conditions as close to the full-scale conditions as possible. The difficulty of the lab-scale tests in this case is connected with the incommensurability between sizes of lumps of rocks and test cells, as well as with the influence of the size effect. With this end in view, a large test bench with power frames was used to record the reaction forces transmitted by hydraulic jacks to damaged rocks filled in the test cell. The necessary equipment—press tools, shear rings, trolleys, plates, etc.—was manufactured for the tests. The relative transverse strain was assessed using the novel original equipment and methods protected by an invention patent. Thus, the most important mechanical properties of damaged rocks were obtained and used for high dam design at tailing ponds. The test results provide information on the influence of fractional composition of rocks on lateral earth pressure coefficient and Poisson's ratio at the same vertical pressure. The traditional-way setting of a constant Poisson's ratio in the geomechanical calculations for rock masses of different granulometric composition requires an appropriate correction.

Key words: coarse-grained soils with deformation structure, field tests, granulometric composition, tape test, lateral pressure ratio, Poisson's ratio, rocks' mechanical properties.

For citation: Babello V. A., Beydin A. V. Assessment of lateral earth pressure coefficient and Poisson's ratio in artificially damaged enclosing rock mass of the Noyon-Tologoy deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(3-2):5-17. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_32_0_5.

Введение

Месторождение полиметаллических руд Нойон-Тологой расположено на территории Забайкальского края в 65 км от г. Краснокаменск и в 35 км от с. Александровский завод. Месторождение включает в себя несколько пространственно разобщенных руденосных участков, локализованных на площади около 10 км². Характерной особенностью участков является однотипная форма пологопадающих рудных залежей. В качестве их отличий следует назвать условия залегания, качество руд и количество запасов. В настоящее время на Юго-Восточном участке завершены разведочные работы и начата подземная опытно-промышленная отработка рудных залежей.

Сегодня перед горнодобывающим предприятием стоит задача увеличения объема добычи руды за счет освоения Восточного участка месторождения открытым способом разработки. В этой связи возникла необходимость строи-

тельства обогатительной фабрики № 2 по переработке полиметаллических руд месторождения с годовой производительностью 2,2 млн т и, в частности, нового хвостохранилища, ограждающей конструкцией которого является грунтовая насыпная дамба общей высотой на полное развитие 53 м. Для оценки устойчивости ограждающей дамбы возникла проблема изучения поведения массива пород нарушенного сложения, складывающих ее тело. Одним из путей решения этой проблемы является компьютерное моделирование геомеханических процессов, реализуемых на конкретном объекте. Использование современных методов численного моделирования позволяет проводить оценку таких процессов с учетом адекватного описания параметров физико-механических свойств породного массива [1]. При этом существующие программы требуют задания определенного набора параметров физико-механических свойств горных

пород. Например, упруго-идеально-пластическая модель Кулона–Мора, используемая в программе PLAXIS, требует задания не только известных параметров прочности и деформируемости горной породы, но и угла дилатансии, экспериментальное определение которого сопряжено с определенными трудностями. Однако даже самая универсальная программа не может гарантировать достоверных результатов, поскольку содержит целый ряд условий. Одним из таких условий является знание возможного диапазона изменения показателей механических свойств горных пород и соответствующей реакции используемой программы. В качестве примера можно отметить существенную чувствительность программы FEM (проф. О. В. Зотеев, ИГД УрО РАН), к изменению такого входного параметра, как коэффициент Пуассона, используемого в расчетах напряженно-деформированного состояния массивов [2].

Следует отметить, что вопрос о достоверности этих параметров является наиболее сложным в исследованиях породных массивов и от него, главным образом, зависит объективность геомеханических расчетов [3]. Некорректное использование рассматриваемых характеристик связано, в основном, с тем обстоятельством, что их определение производилось в условиях, неадекватно отражающих реальное напряженно-деформированное состояние породного массива. В связи с этим возрастают требования к достоверности определения параметров механических свойств пород [4, 5]. Основная сложность задания таких характеристик заключается в методических особенностях их определения.

Известно, что определения параметров прочности и деформируемости горных пород применяют различ-

ные методы — прямые и косвенные. В состав прямых методов входят лабораторные и натурные эксперименты [6]. Проблематичность определения упомянутых параметров в лабораторных условиях связана с несопоставимостью размеров отдельных кусков породы и камер приборов, влиянием масштабного фактора и неопределенностью задания коэффициента перехода к параметрам механических свойств массива горных пород нарушенного сложения. В результате исследований установлено [7, 8], что на показатели механических свойств пород существенное влияние оказывают размеры и формы образцов, характер их нагружения и взаимодействия с прибором. Эти обстоятельства делают необходимым проведение натуральных исследований горных пород в массиве либо в условиях крупногабаритных стендов [9]. В рассматриваемом случае, когда дамба еще не существует, возможен только вариант испытания пород нарушенного сложения в стендовых условиях. Для реализации таких исследований необходимо было спроектировать и изготовить стенд и соответствующее оборудование, которые бы позволяли определить параметры основных механических свойств пород: коэффициент Пуассона, (коэффициента относительной поперечной деформации), прочность и деформируемость. Основой для конструирования стенда послужили авторское свидетельство и патент РФ на изобретение [10, 11]. Был изготовлен крупногабаритный стенд, представляющий собой лоток для размещения в нем горной породы с размерами в плане 2,52×2,52 м и высотой 2,47 м, стальных стоек, продольных и поперечных балок, объединенных в силовые рамы для восприятия нагрузки, передаваемой гидродомкратами (рис. 1). Размеры штампа и рабочей емкости стенда



Рис. 1. Стенд для исследования механических свойств горных пород

Fig. 1. Stand for rock mechanical properties research

и соотношение между ними исключали влияние стенок на результаты эксперимента.

Методы исследований

На следующем этапе работ были выбраны методики исследований механических свойств пород нарушенного строения, предназначенных для укладки в тело дамбы. Особое затруднение вызывало обоснование способа определения значений коэффициента Пуассона (относительных поперечных деформаций) упомянутых пород. Необходимо заметить, что для его определения существуют различные методы. Так, в работах [12 – 16] величины коэффициентов Пуассона и поперечной деформации предлагается определять с помощью стабилметрических испытаний и методом одноосного сжатия горных пород. При этом данные стабилметрических опытов по определению коэффициента Пуассона могут служить основой для оценки возможности применения той или иной расчетно-теоретической модели геомассива. В работах [17, 18] приведены сведения о том, что по данным экспериментов в стабилметрах нередко получают значения $\mu > 0,5$. В связи с этим полученные данные

могут служить основой для оценки возможности применения той или иной расчетно-теоретической модели для компьютерного моделирования геомеханических процессов.

В качестве другого подхода к определению величины коэффициента Пуассона (относительных поперечных деформаций) следует отметить работы [19, 20], где оценку упомянутого параметра в первом случае проводили с помощью специального прибора, когда в условиях невозможности бокового расширения образца определяли напряжения на верхнем и нижнем штампах, вычисляли боковое давление и, соответственно, коэффициент Пуассона. Во втором случае конструкция компрессионного прибора с возможностью изменения горизонтальных напряжений (бокового давления) позволила получить зависимости коэффициентов бокового давления и Пуассона от вертикального давления. Не вдаваясь в анализ упомянутых методов, отметим, что отсутствие компрессионных приборов и стабилметров с рабочими камерами достаточно больших размеров делают проблематичным проведение опытов по определению коэффициента Пуассона (относительной поперечной деформации) в рассматриваемых условиях [6].

Исходя из вышеизложенного, определение коэффициентов бокового давления и Пуассона (относительной поперечной деформации) было предложено выполнить с помощью метода ленты, когда стенка кольца компрессионного прибора диаметром 0,35 м снабжалась крестообразной прорезью для свободного пропуска стальной ленты [21, 22]. Кольцо прибора с предварительно установленной в нем лентой заполняли горной породой нарушенного сложения и уплотняли до получения требуемой по проекту плотности. Далее на вну-

тренную поверхность кольца (породы) устанавливали штамп для передачи вертикального давления на породу и, соответственно, ленту. При выдергивании ленты из горизонтальной прорези (первый опыт) и вертикальной (второй опыт) замеряли соответствующие усилия и тем самым определяли коэффициент бокового давления (рис. 2). Получив таким образом значения коэффициентов бокового давления ξ , соответствующие упругой и неупругой стадии деформации горной породы,

по известной формуле $\mu = \frac{\xi}{1 + \xi}$ находили значения коэффициентов Пуассона (поперечной деформации).

Авторами статьи была произведена модификация метода, которая потребовала разработку нового технического решения рассматриваемого вопроса. Новизна решения подтверждена полученным в 2017 г. патентом РФ на изобретение [23]. Суть заклю-

чалась в том, что стальная лента, расположенная вертикально или горизонтально в породе, находящейся под нагрузкой в кольце, оставалась неподвижной, а кольцо с породой получало перемещение с замером усилия, инициирующего это перемещение. Такая модификация позволила повысить точность получаемых результатов. При традиционном подходе возникали проблемы с фиксацией положения вытягиваемой незакрепленной ленты в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Это обстоятельство, в свою очередь, не гарантировало отсутствия касания ленты стенок прорези и, соответственно, возникновения сил трения, не учитываемых при измерении вытягивающего усилия. В проводимых опытах стальная лента жестко закреплялась с упорной пластиной, что позволило зафиксировать ее положение в пространстве. Стальные направляющие пластины, уложенные горизонтально на поверх-

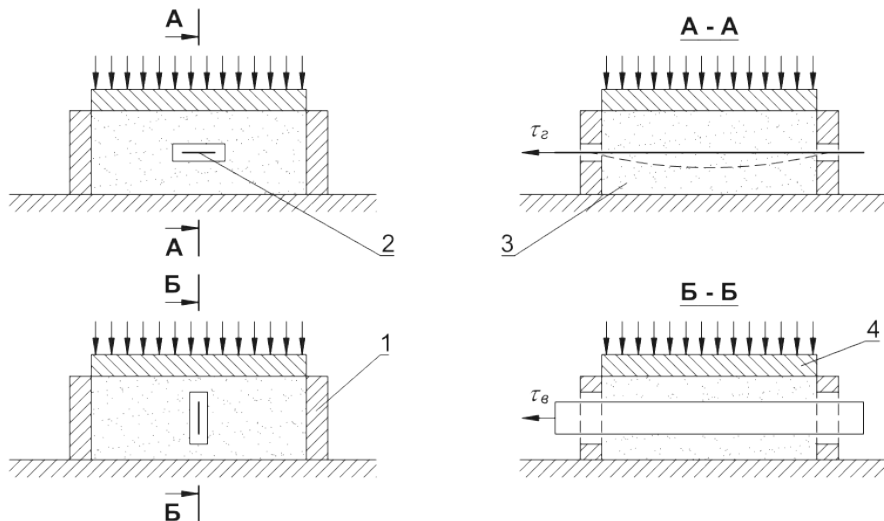


Рис. 2. Схема испытания образца породы методом извлечения ленты: 1 – кольцо; 2 – стальная лента; 3 – грунт; 4 – поршень
 Fig. 2. Scheme of testing the rock sample by tape method: 1 – ring; 2 – steel tape; 3 – soil; 4 – piston

ности породы, позволили обеспечить строго горизонтальное перемещение тележки с кольцом, заполненным породой, помещенной внутри ленты. Таким образом, была исключена возможность касания лентой стенок прорезы и тем самым искажения результатов измерения выдергивающего усилия. Расширение функциональных возможностей метода заключалось в применении пластин круглой и прямоугольной формы, укладываемых горизонтально на поверхность массива грунтов и соединенных струнами с приборами регистрации вертикальных его деформаций. Это позволило проводить одновременно с опытами по определению коэффициента Пуассона достоверные опыты по оценке сжимаемости породы с вычислением соответствующих характеристик.

Использованное устройство (рис. 3, 4) состоит из направляющих стальных пластин 1, уложенных на поверхности породы 2. На пластины 1 установлена тележка 3 на шарикоподшипниках 4, внутри которой жестко закреплено стальное кольцо 5 диаметром 0,30 м и высотой 0,15 м с приваренным дном 6. В стенке кольца 5 и вертикальной пластине 10 выполнена крестообразная прорезь для пропуска стальной ленты 7, жестко закрепленной одним концом к упорной пластине 8, находящейся на отрезке трубы, соединенной со стенкой лотка 9. Между упорной пластиной 8 и вертикальной пластиной 10 установлен горизонтальный гидродомкрат 11 и переносной образцовый динамометр 12. Каждая серия опытов с породой различного грану-

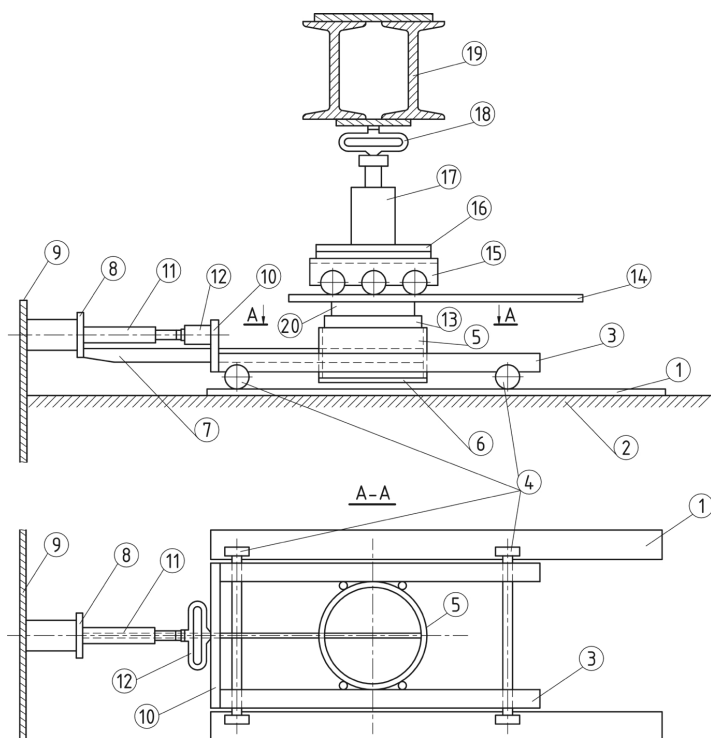


Рис. 3. Схема устройства для определения коэффициентов бокового давления и Пуассона
 Fig. 3. Scheme of the device for determining the lateral pressure and Poisson's coefficients

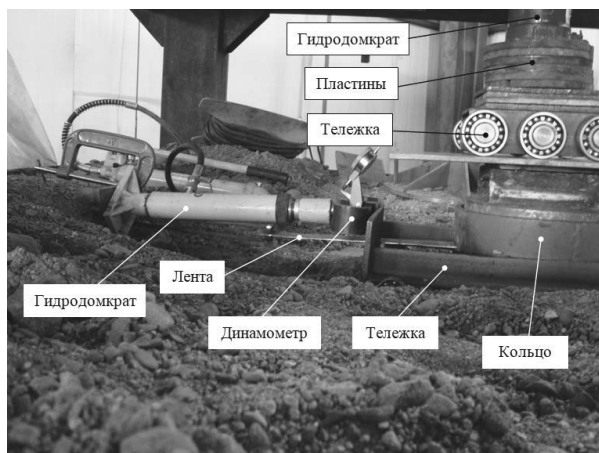


Рис. 4. Общий вид устройства для определения коэффициентов бокового давления и Пуассона (месторождение Нойон-Тологой, март-апрель 2019 г.)

Fig. 4. General view of the device for determining the lateral pressure and Poisson's coefficients (Noyon-Tologoy deposit, March-April 2019)

лометрического состава выполнялась с вертикально и горизонтально установленной в кольцо стальной лентой 7 при возрастающих значениях вертикального давления. Для этого в кольцо 5, используя прорезь в нем и вертикальной пластине 10, помещалась вертикально или горизонтально лента 7. Затем кольцо заполнялось рудой, сверху устанавливался штамп 13 с диаметром, допускающим его свободное вертикальное перемещение в кольце. Сверху штампа 13 укладывались отрезок швеллера 20 и стальная пластина 14. На пластину 14 последовательно устанавливались тележка 15 с тремя парами шарикоподшипников, регулировочные пластины 16, гидродомкрат 17 и переносный образцовый динамометр ДОСМ 18 упором в центральную балку 19, выполненную из двутавров, соединенных между собой стальными пластинами.

Свободное горизонтальное перемещение кольца относительно стальной ленты дополнительно обеспечивалось второй тележкой на шарикоподшипниках с расположенными на ней гидро-

домкратом и силоизмерительным устройством.

Результаты исследований

Опыты по определению коэффициентов бокового давления и Пуассона проводили с породами нарушенного сложения, отобранными с участка Восточный Нойон-Тологойского месторождения. Гранулометрический состав исследуемых пород определяли ситовым методом (табл. 1.) Интегральные кривые гранулометрического состава исследуемых пород представлены на рис. 5.

Во многих случаях несвязный грунт характеризуется размером преобладающих частиц, процентным содержанием различных по крупности фракций и степенью неоднородности гранулометрического состава [24]. Поскольку исследуемые породы являются неоднородными по гранулометрическому составу, то за количественный показатель, характеризующий крупность частиц породы, может быть принят средний размер, подсчитанный как средневзвешенное (d_g , мм) по выражению [25]

Таблица 1

Результаты определения зернового состава грунтов
Results of determining the grain size composition of soils

Лабораторный номер образца	Содержание фракций грунта, %, размерами, мм								d_{10}	d_{60}	C_u	d_B	Номенклатура грунта по ГОСТ 25100–2011
	>10	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,10	<0,10					
1	27,2	14,3	16,4	14,8	8,2	8,3	1,9	8,9	0,24	5,57	23,2	5,37	гравийный грунт с супесчаным заполнителем
2	9,1	10,6	22,0	30,3	14,7	10,4	1,3	1,6	0,45	2,19	4,9	3,31	песок гравелистый

Примечание: d_{10} – диаметр частиц, меньше которого в грунте содержится 10% частиц (эффективный диаметр), мм; d_{60} – диаметр частиц, меньше которого в данном грунте содержится 60% частиц (контролирующий диаметр), мм; C_u – степень неоднородности грунта; d_B – средневзвешенный диаметр частиц, мм.

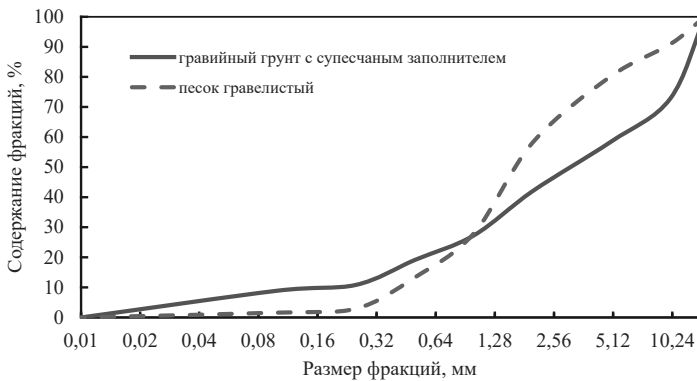


Рис. 5. Суммарные кривые гранулометрического состава
Fig. 5. Summary curves of particle size distribution

$$d_B = \frac{\sum \gamma_i d_i}{\sum \gamma_i},$$

где γ_i – выход узкого класса крупности, %; d_i – средний диаметр частиц узкого класса, мм; $\sum \gamma_i$ – общий выход всех классов, %.

Помещенная в кольцо порода предварительно уплотнялась с помощью глубинного вибратора до состояния, которое соответствовало коэффициенту уплотнения, равному 0,95, исчисляющемуся как отношение плотности грунта

(1,8 т/м³) к его максимальной плотности (1,9 т/м³). Контроль плотности осуществлялся специально изготовленным плотномером, работающим по принципу пенетromетра. Градуировка плотнометра производилась в специальной емкости, объем которой был заранее определен. Емкость заполнялась до краев рыхлоотсыпанным грунтом, взятым из стенда, взвешивалась и тем самым находилась масса грунта в емкости и его плотность путем деления массы грунта на объем

ёмкости. Затем на поверхность грунта в ёмкости устанавливался плотномер, осуществлялся сброс заостренного стержня вниз по трубе плотномера и производилась регистрация известной плотности грунта. Осредненные результаты проведенных исследований представлены в табл. 2 и на рис. 6.

Полученные коэффициенты бокового давления (ξ) и Пуассона (μ) в зависимости от вертикального давления

на породу (P , МПа) характеризуются полиномиальными функциями:

– гравийный грунт с супесчаным заполнителем:

$$\xi = 0,1875P^2 - 0,12P + 0,3981$$

$$\mu = 0,0875P^2 - 0,055P + 0,2836$$

– песок гравелистый:

$$\xi = 0,125P^2 + 0,1P + 0,4388$$

$$\mu = 0,125P^2 - 3 \times 10^{-15}P + 0,3088$$

Таблица 2

Осредненные результаты определений коэффициентов бокового давления и Пуассона
Average results of lateral pressure and Poisson's coefficient definitions

Номенклатура породы по ГОСТ 25100–2011	Вертикальное давление на породу в кольце P , МПа	Горизонтальное усилие, кН	Вертикальное усилие, кН	ξ	μ
Гравийный грунт с супесчаным заполнителем	0,1	2,36	6,09	0,388	0,279
	0,3	2,49	6,56	0,379	0,274
	0,5	2,80	7,26	0,385	0,278
Среднее значение				0,384	0,277
песок гравелистый	0,1	2,20	4,94	0,450	0,310
	0,3	2,38	4,95	0,480	0,320
	0,5	2,60	5,00	0,520	0,340
Среднее значение				0,483	0,323

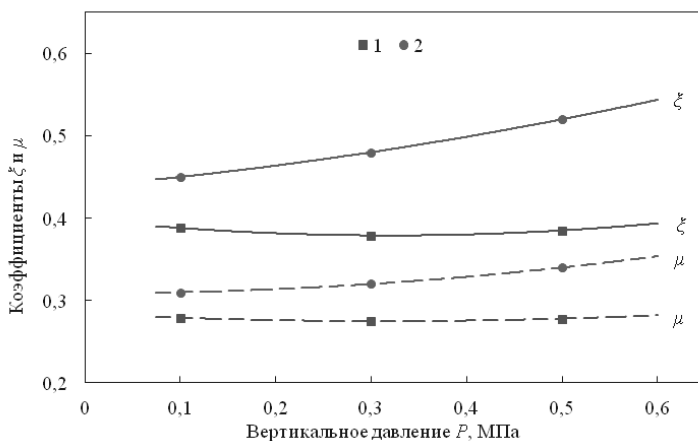


Рис. 6. Зависимости коэффициентов бокового давления ξ и Пуассона μ от вертикальной нагрузки на штамп для гравийного грунта с супесчаным заполнителем (1) и песка гравелистого (2)

Fig. 6. Dependence of lateral pressure ξ and Poisson's μ coefficients on the vertical load on the die for light-textured soil (1) and gravel sand (2)

Выводы

1. В работе был использован новый подход при определении коэффициента Пуассона (поперечной деформации) пород нарушенного сложения, предполагаемых для устройства дамбы. Суть подхода заключалась в использовании установки и оборудования, не имеющего аналогов и соответствующих методик. Уникальность установки и оборудования подтверждены патентами РФ на изобретения и авторским свидетельством. В 2015 г. с помощью данного технического средства и методик были получены характеристики физико-механических свойств раздробленных урано-содержащих скальных пород при выполнении работы «Создание комплексной технологии обработки беднобалансового уранового сырья геотехнологическими методами» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

2. В результате проведенных опытов с двумя разновидностями пород установлено влияние процентного содержания в них различных по крупности фракций на величины коэффициентов бокового давления и Пуассона при одинаковом вертикальном давлении. Таким образом, традиционное задание постоянного значения коэффициента Пуассона в геомеханических расчетах геомассивов различного гранулометрического состава требует соответствующей корректировки.

3. В рассмотренных условиях, когда ввиду отмеченных выше обстоятельств невозможно проведение лабораторных и полевых опытов с породами нарушенного сложения по определению коэффициента Пуассона (поперечной деформации), стендовые их испытания являются альтернативным методом получения достоверных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang Q., Upadhyaya S. K., Liao Q., Li X. Determination of in-situ engineering properties of soil using an inverse solution technique and limited field tests // Journal of Terramechanics. 2018. Vol. 79. No 10. Pp. 69–77. DOI: 10.1016/j.jterra.2018.07.001.
2. Бабелло В. А., Бейдин А. В., Овсячук В. А., Смолич С. В. Оценка состояния горного массива на основе анализа горно-геологической обстановки и моделирования его напряженности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 12. — С. 41–54.
3. Jaeger J. C., Cook N. G.W., Zimmerman R. W. Fundamentals of Rock Mechanics. 4th ed. — Oxford: Blackwell, 2007. — 475 p.
4. Шабаетов С. Н., Крушина Н. В., Шаламанов В. А., Мартель Н. А., Штарк А. И. Метод косо́го среза для определения прочностных характеристик предварительно уплотненных крупнообломочных грунтов // Известия Уральского государственного горного университета. — 2020. — № 3. — С. 115–122. DOI: 10.21440/2307–2091–2020–3-115–122.
5. Patel A., Ingale R., Bhanarkar K. B. Effect of Compaction States and the Confining Pressure on Poisson's Ratio of Stratified and Non-Stratified Soils // Arabian Journal for Science and Engineering. 2018. Vol. 43. No 4. Pp. 1983–1999. DOI: 10.1007/s13369–017–2846-y.
6. Болдырев Г. Г., Мельников А. В., Меркульев Е. В., Новичков Г. А. Сравнение методов лабораторных и полевых испытаний грунтов // Инженерные изыскания. — 2013. — № 14. — С. 28–46.
7. Еремин Г. М. Повышение точности и надежности определения прочностных характеристик пород и их свойств при деформациях массивов пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2000. — № 9. — С. 31–33.

8. Choo H., Zhao Q., Burns S. E., Sturm T. W., Hong S. H. Laboratory and theoretical evaluation of impact of packing density, particle shape, and uniformity coefficient on erodibility of coarse-grained soil particles // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2020. Vol. 45. No 1. Pp. 1499–1509. DOI: 10.1002/esp.4825.

9. Саинов М. П. Параметры деформируемости крупнообломочных грунтов в теле грунтовых плотин // *Строительство: наука и образование*. — 2014. — № 2. — С. 2.

10. Бабелло В. А. Авторское свидетельство СССР № 1604917. Установка для определения механических характеристик грунта. Заявл. 05.08.1988. Опубл. 07.11.1990. Бюл. 41.

11. Бабелло В. А. Патент РФ № 2276343. Устройство для определения прочностных свойств пород отвалов. Заявл. 21.07.2004. Опубл. 10.05.2006. Бюл. № 13.

12. Панюков П. Н., Верещагин Н. П., Добров Э. М., Кравчук С. В. Методические указания по определению деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик горных пород в стабилометрах. — Белгород: ВИОГЕМ, 1973. — 67 с.

13. Meng F., Zhang Js., Chen Xb., Wang Qy. Deformation characteristics of coarse-grained soil with various gradations // *Journal of Central South University*. 2014. Vol. 21. No 6. Pp. 2469–2476. DOI: 10.1007/s11771-014-2201-3.

14. Pham Duc Phong, Su Q., Zhou C.-B., Vu Anh-Tuan, Lam H.-H. Deformation and strength characteristics of graded gravel by large-scale triaxial tests // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2015. Vol. 20. No 1. Pp. 5913–5925.

15. Сорокина Г. В. Рекомендации по методам определения коэффициентов бокового давления и поперечного расширения глинистых грунтов. — М.: НИИОСП, 1978. — 31 с.

16. ГОСТ 12248—2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. — М.: Стандартинформ, 2011. — 82 с.

17. Бугров А. К., Нарбут Р. М., Сипидин В. П. Исследование грунтов в условиях трех одноосного сжатия. 2-е изд., исп. и доп. — Л.: Стройиздат, 1987. — 184 с.

18. Chen S., Kong L., Xu G. An effective way to estimate the Poisson's ratio of silty clay in seasonal frozen regions // *Cold Regions Science and Technology*. 2018. Vol. 154. No 10. Pp. 74–84. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.06.003.

19. Зиангиров Р. С., Кальбергенов Р. Г. Оценка деформируемости крупнообломочных грунтов // *Инженерная геология*. — 1987. — № 3. — С. 107–117.

20. Болдырев Г. Г., Скопинцев Д. Г. О целесообразности разработки национального стандарта «Компрессионные испытания грунтов с измерением боковых напряжений» // *Инженерная геология*. — 2015. — № 1. — С. 20–24.

21. Абуханов А. З. Механика грунтов: учеб. пособие. — Ростов н/Д: Феникс, 2006. — 352 с.

22. Лизункин В. М., Бабелло В. А., Лизункин М. В., Бейдин А. В. Определение коэффициента Пуассона раздробленных скальных пород различного гранулометрического состава // *Горный журнал*. — 2017. — № 2. — С. 45–50. DOI: 10.17580/gzh.2017.02.08.

23. Бабелло В. А., Бейдин А. В., Лизункин В. М., Лизункин М. В. Патент РФ № 2634312. Устройство для определения коэффициентов Пуассона и поперечных деформаций фрагментов массива раздробленных скальных пород и оценки их сжимаемости в массиве. Заявл. 14.09.2016. Опубл. 25.10.2017. Бюл. № 30.

24. Das B. M., Sivakugan N., Atalar C. Maximum and minimum void ratios and median grain size of granular soils: their importance and correlations with material properties / 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Near East University, Nicosia, North Cyprus, 2012.

25. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Под ред. О. С. Богданова, В. А. Олевского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1982. — 366 с. **ГИАЭ**

REFERENCES

1. Zhang Q., Upadhyaya S. K., Liao Q., Li X. Determination of in-situ engineering properties of soil using an inverse solution technique and limited field tests. *Journal of Terramechanics*. 2018. Vol. 79. no. 10. Pp. 69–77. DOI: 10.1016/j.jterra.2018.07.001.
2. Babello V. A., Beydin A. V., Ovseychuk V. A., Smolich S. V. Assessment of rock mass behavior based on its geology analysis and stress state modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019. no. 12. Pp. 41–54. [In Russ].
3. Jaeger J. C., Cook N. G.W., Zimmerman R. W. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 4th ed., Oxford, Blackwell, 2007, 475 p.
4. Shabaev S. N., Krupina N. V., Shalamanov V. A., Martel N. A., Shtark A. I. Oblique shear method for determining strength performance of pre-compacted very coarse soils. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2020. no. 3. Pp. 115–122. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-115-122. [In Russ].
5. Patel A., Ingale R., Bhanarkar K. B. Effect of Compaction States and the Confining Pressure on Poisson's Ratio of Stratified and Non-Stratified Soils. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018. Vol. 43. no. 4. Pp. 1983–1999. DOI: 10.1007/s13369–017–2846-y.
6. Boldyrev G. G., Melnikov A. V., Merkulyev E.V, Novichkov G. A. Comparison of methods of laboratory and field soil testing. *Inzhenernye izyskaniya*. 2013. no. 14. Pp. 28–46. [In Russ].
7. Eremin G. M. Increasing of accuracy and reliability of definition of strength characteristics of rocks and their properties during rock massif deformations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2000, no. 9, Pp. 31–33. [In Russ].
8. Choo H., Zhao Q., Burns S. E., Sturm T. W., Hong S. H. Laboratory and theoretical evaluation of impact of packing density, particle shape, and uniformity coefficient on erodibility of coarse-grained soil particles. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2020. Vol. 45. no. 1. Pp. 1499–1509. DOI: 10.1002/esp.4825.
9. Sainov M. P. Deformation parameters of macrofragment soils in soil dams // *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. 2014. no. 2. P. 2. [In Russ].
10. Babello V. A. *Author's certificate USSR 1604917*, 07.11.1990. [In Russ]
11. Babello V. A. *Patent RU 2276343*, 10.05.2006. [In Russ]
12. Panyukov P. N., Vereshchagin N. P., Dobrov E. M., Kravchuk S. V. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu deformatsionnykh, prochnostnykh i fil'tratsionnykh kharakteristik gornyykh porod v stabilometrah* [Methodical guidances for the definition of deformation, surface and filtration characteristic of rocks in stabilometers], Belgorod, VIOGEM, 1973, 67 p. [In Russ]
13. Meng F., Zhang Js., Chen Xb., Wang Qy. Deformation characteristics of coarse-grained soil with various gradations. *Journal of Central South University*. 2014. Vol. 21. no. 6. Pp. 2469–2476. DOI: 10.1007/s11771-014-2201-3.
14. Pham Duc Phong, Su Q., Zhou C.-B., Vu Anh-Tuan, Lam H.-H. Deformation and strength characteristics of graded gravel by large-scale triaxial tests. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2015. Vol. 20. no. 1. Pp. 5913–5925.
15. Sorokina G. V. *Rekomendatsii po metodam opredeleniya koeffitsientov bokovogo davleniya i poperechnogo rasshireniya glinistykh gruntov* [Recommendations for the methods of definition of coefficients of lateral pressure and lateral expansion of clayey soils], Moscow, NIIOSP, 1978, 31 p. [In Russ]
16. GOST 12248–2010. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruemosti* [GOST 12248–2010. Soils. Laboratory methods for determining the strength and strain characteristics], Moscow, Standartinform, 2011, 82 p. [In Russ]
17. Bugrov A. K., Narbut R. M., Sipidin V. P. *Issledovanie gruntov v usloviyakh trekh odnoosnogo szhatiya. 2-e izd., isp. i dop.* [Soil investigation in the conditions of triaxial compression. 2nd ed., rev. and enl.]. Leningrad, Stroyizdat, 1987, 184 p. [In Russ]

18. Chen S., Kong L., Xu G. An effective way to estimate the Poisson's ratio of silty clay in seasonal frozen regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2018. Vol. 154. no. 10. Pp. 74–84. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.06.003.

19. Zianguirov R. S., Kalbergenov R. G. Assessment of deformation properties of macrofragmental soils. *Inzhenernaya geologiya*. 1987, no. 3, Pp. 107–118. [In Russ]

20. Boldyrev G. G., Skopintsev D. G. On expedience of developing a national standard of «Compression soil testing with measurement of lateral stresses». *Inzhenernaya geologiya*. 2015, no. 1, Pp. 20–24. [In Russ]

21. Abukhanov A. Z. *Mekhanika gruntov: ucheb. posobie* [Soil mechanics: tutorial], Rostov-on-Don, Feniks, 2006, 352 p. [In Russ]

22. Lizunkin V. M., Babello V. A., Lizunkin M. V., Beydin A. V. Determination of Poisson's ratio in crushed hard rocks of various grain-size composition. *Gornyi zhurnal*. 2017. no. 2. Pp. 45–50. DOI: 10.17580/gzh.2017.02.08. [In Russ].

23. Babello V. A., Beydin A. V., Lizunkin V. M., Lizunkin M. V. *Patent RU 2634312*, 25.10.2017. [In Russ]

24. Das B. M., Sivakugan N., Atalar C. Maximum and minimum void ratios and median grain size of granular soils: their importance and correlations with material properties. *3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Near East University, Nicosia, North Cyprus, 2012.

25. *Spravochnik po obogashcheniyu rud. Podgotovitel'nye protsessy*. Pod red. O. S. Bogdanova, V. A. Olevskogo. 2-e izd., pererab. i dop. [Handbook for the beneficiation of ores. Preparatory processes. Bogdanov O.S, Olevskiy V. A. (Ed.). 2nd ed., rev. and enl.], Moscow, Nedra, 1982, 366 p. [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Бабелло Виктор Анатольевич*¹ — докт. техн. наук, профессор;

*Бейдин Алексей Владимирович*¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: beydin@mail.ru;

¹ Забайкальский государственный университет, Чита, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Babello V. A.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor;

*Beydin A. V.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: beydin@mail.ru;

¹ Transbaikal State University, Chita, Russia.

Получена редакцией 20.11.2020; получена после рецензии 23.12.2020; принята к печати 10.02.2021.

Received by the editors 20.11.2020; received after the review 23.12.2020; accepted for printing 10.02.2021.

