

УДК 624.154.5

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-175-181

АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРИРОДНОГО ЗАЛЕГАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ВФС

**А. Н. Труфанов, Р. Ф. Шарафутдинов, М. Д. Кузьменко,
В. С. Морозов, Е. Б. Басакин**

НИИОСП им. Н. М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия

Аннотация. Приведены результаты апробации нового подхода к определению коэффициента бокового давления переуплотненного грунта в условиях природного залегания. Апробация выполнялась методом физического моделирования и включала в себя создание искусственно подготовленных образцов водонасыщенного суглинка с заданным напряженно-деформированным состоянием (НДС) грунта с последующей имитацией пробоотбора, хранения и реконсолидации образца по методу восстановления фазового состава (ВФС) в соответствии с требованиями ГОСТ 12248.3-2020. По результатам ВФС выполнялся расчет природного коэффициента бокового давления грунта. Результаты моделирования подтверждают достоверность разработанного метода и его применимость для оценки напряженного состояния грунтового массива. Важным условием получения надежных результатов является строгое соблюдение регламентов пробоотбора, транспортировки и хранения монолитов, минимизирующих нарушение их структуры.

Ключевые слова: коэффициент бокового давления, лабораторные методы, природное напряженное состояние, трехосные испытания, фазовый состав

ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF THE RESULTS OF DETERMINING THE LATERAL PRESSURE COEFFICIENT IN SITU USING THE PHASE COMPOSITION RESTORING METHOD

**A. N. Trufanov, R. F. Sharafutdinov, M. D. Kuzmenko,
V. S. Morozov, E. B. Basakin**

Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) Research Center of Construction JSC. Moscow, Russia

Annotation. This paper presents the validation results of a novel approach to determining the lateral earth pressure coefficient of overconsolidated soils under in-situ conditions. The validation was carried out using physical modeling and involved the creation of artificially prepared loam specimens with specified physical and mechanical properties and an initial stress-strain state. This procedure included the simulation of sampling and storage, followed by the reconsolidation of the specimen using the phase composition restoration (PCR) method, in accordance with the GOST 12248.3-2020 requirements. Based on the PCR results, the natural lateral earth pressure coefficient was calculated. The modeling results confirm the reliability of the developed method and its applicability for assessing the stress state of a soil mass. A crucial prerequisite for obtaining reliable results is strict adherence to the protocols for the sampling, transportation, and storage of undisturbed samples to minimize their structural disturbance.

Keywords: lateral earth pressure coefficient, laboratory methods, in-situ stress state, triaxial tests, phase composition

Введение

Широкое внедрение современных нелинейных моделей грунта в практику численного моделирования (Plaxis, Midas GTS NX, ZSoil) требует задания начальных условий, соответствующих природным. Ключевым параметром, определяющим начальное напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтового массива, является коэффициент бокового давления в условиях природного залегания K_0^{ep} .

$$K_0^{ep} = \frac{\sigma_{h0}'}{\sigma_{v0}'}, \quad (1)$$

где σ_{h0}' и σ_{v0}' — горизонтальное и вертикальное эффективное напряжение в некоторой точке массива грунта, соответственно.

Существующие методы определения K_0^{ep} традиционно делятся на полевые и лабораторные.

К полевым методам относятся испытания прессиометром Менара [1], самозабуривающимся прессиометром [2, 3], плоским дилатометром [4], методы статического зондирования [5], испытания вдавливаемыми месдозами [6], ступенчатыми лезвиями [7], метод измерительного гидроразрыва [8]. К недостаткам большинства полевых методов определения K_0^{ep} следует отнести влияние на результат изменение напряженного состояния грунта перед испытанием.

В отличие от полевых методов лабораторные методы теоретически позволяют строго контролировать граничные условия и траектории напряжений. К лабораторным методам относятся испытания в компрессионных приборах с измерением бокового давления [9, 10], испытания в приборах трехосного сжатия в режиме « K_0 -консолидации» [11, 12] и испытания с измерением отрицательного давления в образце грунта [13, 14]. При этом в ряде лабораторных методов имеются расхождения в понятии коэффициента бокового давления [15]. К общим недостаткам лабораторных методов следует отнести разуплотнение образца в результате пробоотбора, изменение структуры грунта в процессе пробоотбора и испытания [16].

На основе полевых и лабораторных методов предложены многочисленные эмпирические зависимости [2, 17].

Целью работы является апробация предложенного метода определения природного коэффициента бокового давления K_0^{ep} [18] на основе физического моделирования.

Сущность метода

Сущность метода [18] заключается в определении природного коэффициента бокового давления водонасыщенных глинистых грунтов на основе принципа гидроемкости Н. М. Герсевича [19]. Согласно данному принципу, пористость полностью водонасыщенного грунта определяется суммой действующих в нём главных эффективных напряжений. Следовательно, если в лабораторных условиях восстановить природную пористость разуплотненного в результате пробоотбора образца, то восстановится и сумма главных эффективных напряжений, действующих в массиве в условиях природного залегания.

Восстановление природной пористости образцов при лабораторных испытаниях выполняется реконсолидацией методом ВФС [20, 21]. С учетом принципа гидроемкости, в результате ВФС может быть восстановлена не только природная плотность, но и среднее эффективное напряжения p'_0 , определяемое по разности между достигнутыми значениями полного давления в камере CP и поровым давлением u . Данное значение эффективного напряжения теоретически соответствует среднему эффективному напряжению в условиях природного залегания.

Исходя из допущения о равенстве горизонтальных напряжений в массиве $\sigma'_{xg} = \sigma'_{yg}$, искомый коэффициент-определяется по формуле:

$$K_0 = \frac{3p'_0 - \sigma'_{zg}}{2\sigma'_{zg}}, \quad (2)$$

где σ'_{zg} — природное вертикальное эффективное напряжение.

Методика и результаты моделирования

Для апробации предложенного метода определения K_0^{ep} в условиях природного залегания было проведено искусственное формирование напряженно-деформированного состояния элемента грунта, физическое моделирование процесса пробоотбора и хранения. Методика моделирования включала в себя несколько этапов.

На первом этапе формировался элемент массива грунта условно природного сложения на основе водонасыщенного суглинка со следующими показателями пластичности и текучести $I_p = 15,8$, $I_L = -0,25$. Из подготовленной грунтовой пасты с заданными значениями начальной влажности формировался цилиндрический образец диаметром 300 мм и высотой 600 мм (рис. 1а).

Напряженное состояние образца формировалось следующим образом. На первой стадии сформированный элемент массива грунта помещался в камеру прибора трехосного сжатия, где выполнялось всестороннее обжатие при закрытом дренаже до полного растворения газовой фазы (по аналогии с

методом ВФС). На второй стадии создавалось анизотропное напряженное состояние путем регулирования вертикальной нагрузки до достижения заданного соотношения главных эффективных напряжений $\sigma'_h / \sigma'_v = 0,8$ и выдерживалось на протяжении 1 месяца. Закрытый дренаж гарантировал сохранение постоянной влажности, а длительное время выдержки обеспечивало протекание процессов упрочнения, и формирования водно-коллоидных связей. Таким образом моделировалось условно природное состояние грунта.

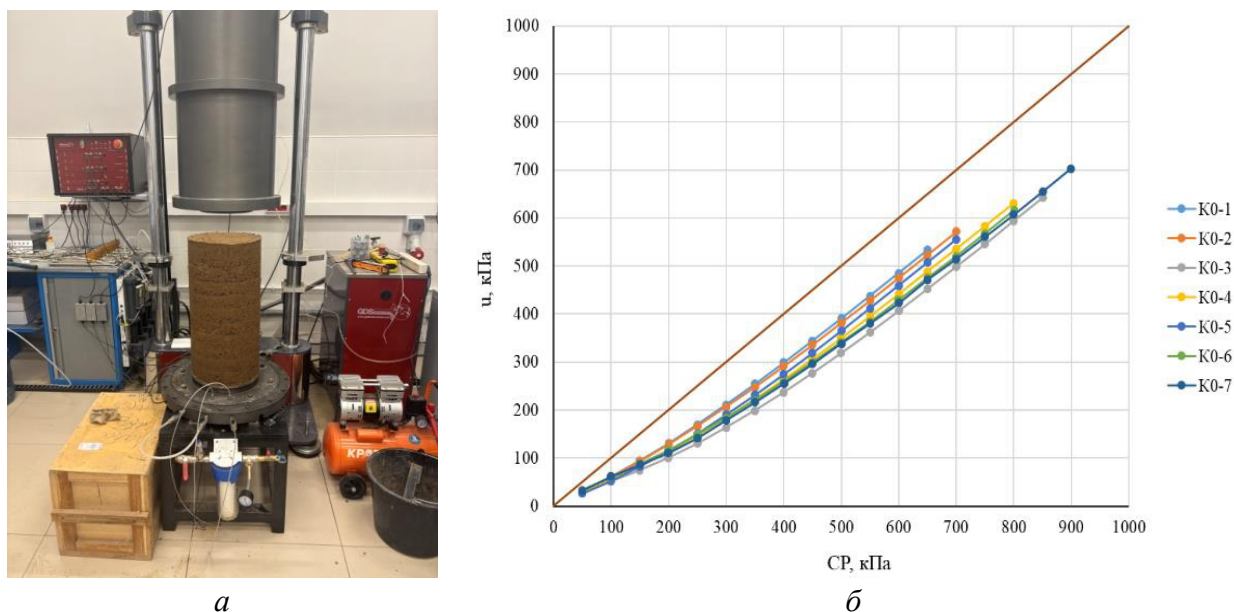


Рис. 1. Процесс апробации метода определению коэффициента бокового давления:
а – искусственно сформированный элемент массива грунта; *б* – диаграммы ВФС
(зависимость порового давления u от давления в камере CP)

На втором этапе элемент массива грунта извлекался из камеры прибора и разрезался на цилиндрические монолиты-заготовки меньшего размера (диаметром 71,4 мм) с помощью металлической струны. Использование струны позволило минимизировать механическое нарушение монолитов. Далее полученные монолиты герметично упаковывались для предотвращения изменения влажности. Хранение образцов проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 12071.

На третьем этапе из монолитов диаметром 71,4 мм при помощи струны вырезались образцы диаметром 50 мм и высотой 100 мм. Подготовленные образцы помещались в камеры приборов трехосного сжатия, где осуществлялась их реконсолидация по методу ВФС в соответствии с требованиями ГОСТ 12248.3-2020.

Для минимизации собственных деформаций измерительной системы порового давления, система противодействия, оснащенная полимерными магистральями была перекрыта в процессе испытаний перекрывалась.

По результатам испытаний получены графики зависимости порового давления от давления в камере, по которым определялись значения среднего эффективного напряжения (рис. 1, б).

Данные об исходном НДС грунта (начальные значения среднего эффективного напряжения p'_0 и природного коэффициента бокового давления K_0^{ep} , а также результаты испытаний (частные значения величины среднего эффективного напряжения $p'_{ВФС}$, среднее значение $M(p'_{ВФС})$, среднеквадратическое отклонение $\sigma(p'_{ВФС})$, коэффициент вариации $\nu(p'_{ВФС})$, среднее значение коэффициента бокового давления $K_0^{ВФС}$ приведены в табл. 1.

Результаты показывают хорошую сходимость с исходным напряженным состоянием, отклонение между K_0^{ep} и $K_0^{ВФС}$ составило 2 %. При этом, коэффициент вариации не превышает 0,23, величина которого во многом зависит от объема рассматриваемой выборки.

Таблица 1. Сопоставительная таблица результатов испытаний

Лаб. №	Начальные значения		Результаты испытаний				
	p'_0	K_0^{ep}	$p'_{ВФС}$	$M(p'_{ВФС})$	$\sigma(p'_{ВФС})$	$\nu(p'_{ВФС})$	$K_0^{ВФС}$
K0-1	137	0,8	87,3	134	31	0,23	0,79
K0-2			107,7				
K0-3			175,6				
K0-4			134,3				
K0-5			119,6				
K0-6			148,4				
K0-7			165,1				

Заключение

Проведены результаты апробации нового подхода к определению коэффициента бокового давления переуплотненного грунта в условиях природного залегания K_0^{ep} [19]. Апробация выполнялась на искусственно сформированных образцах водонасыщенных суглинков с показателями пластичности и текучести $I_p = 15,8$, $I_L = -0,25$.

Получено, что оценка K_0^{ep} по данным ВФС показывает хорошую сходимость с исходным напряженным состоянием грунта. Соотношение главных напряжений, полученные по предложенному методу, сопоставимы с исходным соотношением, заданным при моделировании разность составила 2 %. В то же время следует отметить, что исследуемая выборка из 7 образ-

цов характеризуется значительным разбросом данных (коэффициент вариации — 0,23). Данный результат может быть обусловлен ограниченным объемом проведенных испытаний.

Одним из направлений дальнейших исследований является увеличение объема выборки, а также проведение испытаний на других разновидностях грунтов

Следует отметить, что в рамках настоящих исследований моделировалось только изменение НДС грунта в процессе пробоотбора, без учета дополнительных механических воздействий. Важно отметить, что на полученные результаты существенное влияние оказывает качество образцов, а также сохранение их структуры и естественной влажности. Для надежного определения природного коэффициента бокового давления по предлагаемому методу необходимо использовать монолиты высокого качества и контролировать изменение их влажности в процессе пробоотбора и последующего хранения.

Список источников

1. Menard L.F. An apparatus for measuring the strength of soils in place: diss. – Urbana, IL: University of Illinois, 1957.
2. Wroth C.P. In-situ measurements on initial stresses and deformations characteristics // *Proceedings of In-Situ Measurements of Soil Properties*. – 1975. – Vol. 2. – P. 181-230.
3. Hughes J.M.O., Wroth C.P., Windle D. Pressuremeter tests in sands // *Geotechnique*. – 1977. – Vol. 27, No. 4. – P. 455-477. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1977.27.4.455>.
4. Marchetti S. In situ tests by flat dilatometer // *Journal of the geotechnical engineering division*. – 1980. – Vol. 106, No. 3. – P. 299-321. DOI: <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000934>.
5. Lunne T., Powell J.J.M., Robertson P.K. Cone penetration testing in geotechnical practice. – CRC press, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482295047>.
6. Massarsch K.R. New method for measurement of lateral earth pressure in cohesive soils // *Canadian Geotechnical Journal*. – 1975. – Vol. 12, No. 1. – P. 142-146. DOI: <https://doi.org/10.1139/t75-013>.
7. In situ stress determination by Iowa stepped blade / Handy, R. L., Remmes, B., Moldt, S., Lutenecker, A. J., Trott, G., // *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. – 1982. – Vol. 108, No. 11. – P. 1405-1422. DOI: <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001368>.
8. Bjerrum L., Andersen K.H. In situ measurement of lateral pressures in clay // *Proceedings of the 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – Madrid, 1972. – Vol. 1. – P. 11-20.
9. Brooker E.W., Ireland H.O. Earth pressures at rest related to stress history // *Canadian geotechnical journal*. – 1965. – Vol. 2, No. 1. – P. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1139/t65-001>.
10. Al-Khafaji K.R., Fattah M.Y., Al-Recaby M.K. Measurement of the lateral earth pressure coefficient of clayey soils by modified oedometer test // *Engineering and Technology Journal*. – 2022. – Vol. 40, No. 11. – P. 1376-1384. DOI: <https://doi.org/10.30684/etj.2022.131675.1046>.
11. Bishop A. W. “Test requirements for measuring the coefficient of earth pressure at rest.” In *Proceedings of the Conference on Earth Pressure Problems, Brussels, Belgium, Vol.1*, c. 2–14.

12. S. C. R. Lo, J. Chu The measurement of K_0 by triaxial strain path testing // *Soils and Foundations*. – 1991. – Т. 31. – №. 2. – С. 181-187. DOI: https://doi.org/10.3208/sandf1972.31.2_181
13. Skempton A. W. Horizontal stresses in an overconsolidated Eocene clay // *Selected Papers on Soil Mechanics*. – 1961. – Т. 1. – С. 119-125. DOI: <https://doi.org/10.1680/sposm.02050.0015>.
14. Doran I. G. Estimation of in situ stresses using anisotropic elasticity and suction measurement / Doran I. G., V. Sivakumar, J. Graham, A. Johnson // *Géotechnique* – 2000 - 50(2), с. 189-196. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.2.189>
15. Кузьменко, М. Д. Лабораторные методы определения коэффициента бокового давления грунтов в условиях природного залегания / М. Д. Куликов // 2-я Международная научно-практическая конференция GEOMOS26 – Москва, 2026 – С. 871-876
16. Шарафутдинов, Р. Ф. Основы расчета длительных осадок свайных фундаментов с учетом реологических свойств грунтов: дис. ... д-ра техн. наук / Р. Ф. Шарафутдинов. – Москва, 2025. – 392 с.
17. Mayne, P.W., Kulhawy, F.H. K_0 -OCR relationships in soil // *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. – 1982. – 108(6). – pp. 851–872.
18. Способ определения природного коэффициента бокового давления грунта: пат. Рос. Федерация / Р. Ф. Шарафутдинов, А. Н. Труфанов, М. Д. Кузьменко [и др.]. – № 2845336; заявл. 08.04.2025; опубл. 15.08.2025.
19. Герсеванов, Н. М. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения / Н. М. Герсеванов, Д. Е. Польшин. – Москва: Стройиздат. – 1948. – 247 с.
20. Труфанов, А. Н. Влияние газовыделения при подъеме на поверхность образцов грунтов континентального шельфа на изменение их прочности : дисс. ... канд. техн. наук / А. Н. Труфанов. – Москва, 1986. – 204 с.
21. Способ трехосных испытаний грунтов, преимущественно донных: а. с. СССР / Л. Г. Мариупольский, А. Н. Труфанов, И. В. Пчелина. – № 1231134; заявл. 18.07.1984; опубл. 15.05.1986.

© Труфанов А. Н., Шарафутдинов Р. Ф., Кузьменко М. Д.,
Морозов В. С., Басакин Е. Б., 2026