



УДК 624.138

С. И. Алексеев, Р. Р. Хисамов

Петербургский государственный университет путей сообщения

**ТРЕНИЕ ГРУНТА О ВЕРТИКАЛЬНУЮ СТЕНКУ И ЕГО ВЛИЯНИЕ
НА РАБОТУ ОСНОВАНИЯ В ШПУНТОВОЙ ОБОЙМЕ**

Рассмотрена оценка влияния коэффициента трения грунта о вертикальную стенку на работу основания в шпунтовой обойме. Приведено сравнение аналитических и численных методов определения напряженно-деформированного состояния грунта в шпунтовой обойме. Представлены результаты лабораторных опытов по определению коэффициента трения грунта о вертикальную стенку, дана качественная оценка его влияния на величину осадки фундамента.

основание, фундамент, шпунт, обойма, коэффициент трения, осадка, несущая способность.

Введение

Как при новом строительстве, так и при реконструкции зданий на слабых грунтах необходимо проводить ряд мероприятий, направленных на улучшение механических свойств грунтов и работы основания в целом. Методы улучшения искусственных оснований можно разделить на три вида: конструктивные, механические и физико-химические. Одним из конструктивных методов искусственного улучшения работы основания является устройство шпунтового ограждения.

Такое техническое решение позволяет избежать возможности выпирания грунта из-под подошвы фундамента, т. е. увеличивает его несущую способность, и ограничивает боковое расширение грунта при деформациях основания, что приводит к уменьшению величины осадки [1].

На шпунтовое ограждение при незначительном перемещении (u) со стороны фундамента начинает действовать активное боковое давление (E_a). В случае, если пере-

мещения отсутствуют, т. е. шпунт является жесткой обоймой, на него действует давление в состоянии покоя (E_0) (рис. 1).

В зависимости от величины трения грунта о стенку результирующая давления может быть направлена под разным углом к шпунтовой обойме. При отсутствии трения грунта о стенку результирующая давления направлена перпендикулярно к шпунтовой обойме. При трении грунта о стенку, отличным от нуля, появляется вертикальная составляющая давления. Правильное определение трения грунта о стенку и его учет позволит улучшить работу основания в шпунтовой обойме и снизить величину осадки.

**1 Лабораторные исследования работы
основания в шпунтовой обойме**

Для качественной оценки работы основания в шпунтовой обойме и влияния коэффициента трения грунта о стенку была проведена серия лабораторных опытов на мало-

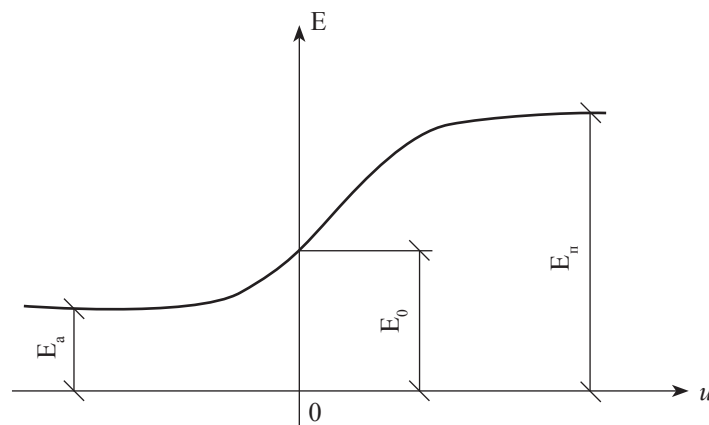


Рис. 1. Изменение давления грунта (E) на подпорную стенку в зависимости от ее перемещения (u):

E_a – активное давление; E_0 – давление в состоянии покоя;
 E_n – пассивное давление

масштабных моделях. Общий вид установки представлен на рис. 2.

Установка состояла из лотка с размерами $45 \times 45 \times 35$ см, заполненного песком средней крупности, и нагрузочного устройства. Усилия на штамп передавались с помощью рычагов с соотношением плеч 1:10. Вертикальное перемещение штампа измерялось индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. В качестве модели фундамента был принят жесткий гладкий металлический квадратный штамп со стороной 65 мм. Шпунтовой обоймой служила металлическая труба квадратного профиля.

В лоток послойно с уплотнением укладывался сухой отсортированный песок средней крупности. Нагрузка на обрез штампа передается ступенями (10–15 циклов). Следующая ступень нагрузки прикладывалась после стабилизации осадки. Поскольку при проведении опытов использовался песчаный грунт, стабилизация осадки основания происходила довольно быстро. Для достоверности оценки влияния трения грунта о стенку на величину осадки опыты повторялись 3–6 раз.

На данном этапе исследований была выполнена следующая серия опытов:



Рис. 2. Общий вид установки

1. Изучалась несущая способность штампа без обоймы.

2. Изучалась несущая способность в шпунтовой обойме при длине шпунта от $0,5b$ до b .

3. Изучалась работа основания в обойме при значении коэффициента трения грунта о стенку 0 и 1.

Из графика (рис. 3) видно, что при использовании шпунтовой обоймы несущая способность увеличивается. При использовании обоймы длиной $b/2$ довести нагрузку до предельного состояния не удалось. Нагрузка до определенного момента была близка к прямой, затем осадка резко увеличивалась

и происходил выпор грунта. Этот факт может свидетельствовать о том, что упругое ядро формируется на выходе из обоймы. Шпунтовая обойма улучшает работу основания, создавая эффект заглубленного фундамента.

Для исследования эффекта трения грунта о стенку была изменена шероховатость внутренней поверхности шпунтовой обоймы. Для создания гладкой поверхности на шпунтовую обойму был наклеен скотч, а для создания шероховатой – песок.

Значение коэффициента трения грунта о стенку было определено на сдвиговом приборе ВСВ-1 (рис. 4) согласно [2, 3].

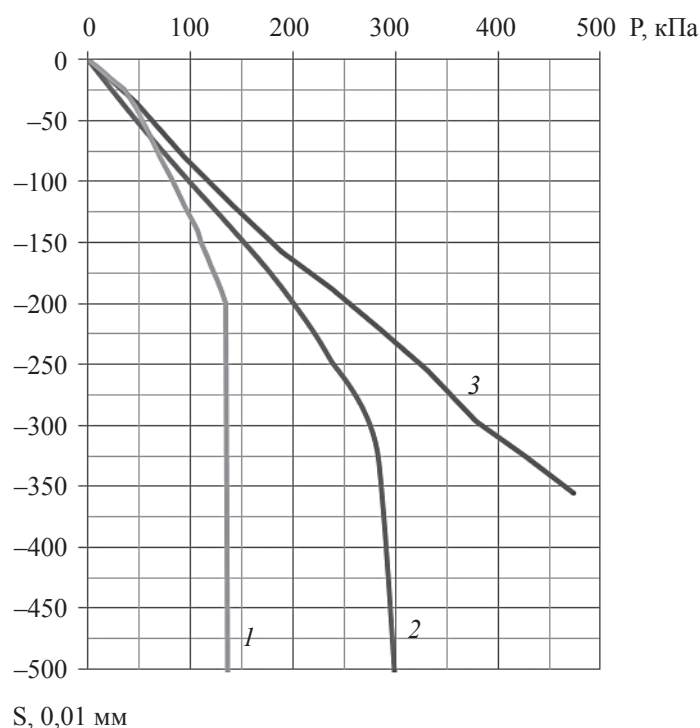


Рис. 3. График зависимости «осадка – нагрузка»: 1 – без обоймы; 2 – обойма $b/4$; 3 – обойма $b/2$



Рис. 4. Определение коэффициента трения на сдвиговом приборе ВСВ-1

Результаты опыта представлены в виде графика на рис. 5. Значение трения грунта о гладкую стенку составило $\text{tg}(\varphi_{01}) = 0,05$ ($\varphi_{01} = 2,9^\circ$), а для шероховатой стенки – 0,56 ($\varphi_{02} = 29,2^\circ$). Угол внутреннего трения грунта составил 31° .

Согласно полученным результатам (рис. 6), эффект трения грунта о стенку на снижение величины осадки фундамента составил от 20 до 60%.

2 Аналитические методы определения вертикальных напряжений в основании, ограниченном шпунтовой обоймой

Будучи частной задачей общей теории предельного равновесия, давление грунта на шпунтовую стенку имеет особенности, обусловленные главным образом тем, что

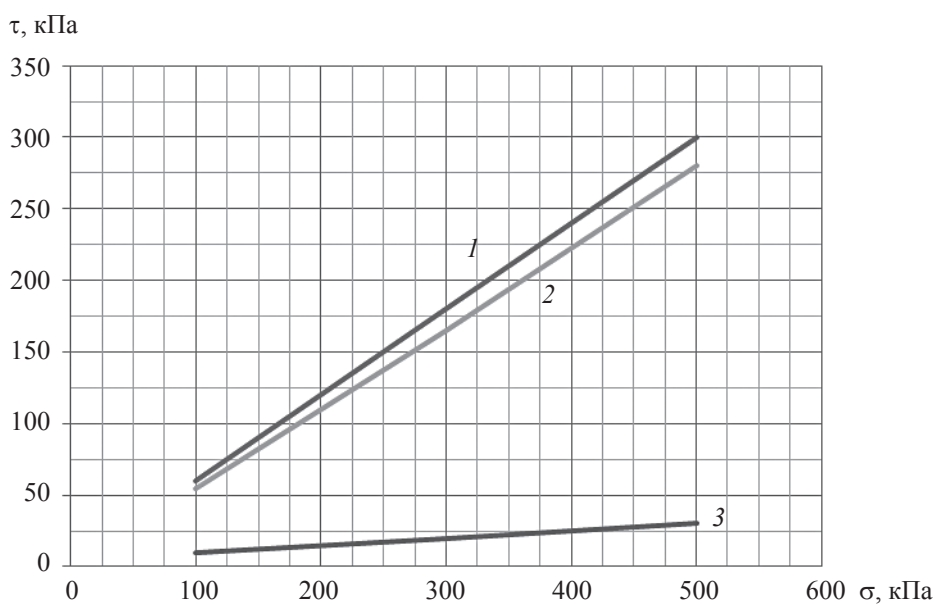


Рис. 5. График определения трения грунта:
1 – угол внутреннего трения; 2 – трение грунта о шероховатую стенку;
3 – трение грунта о гладкую стенку

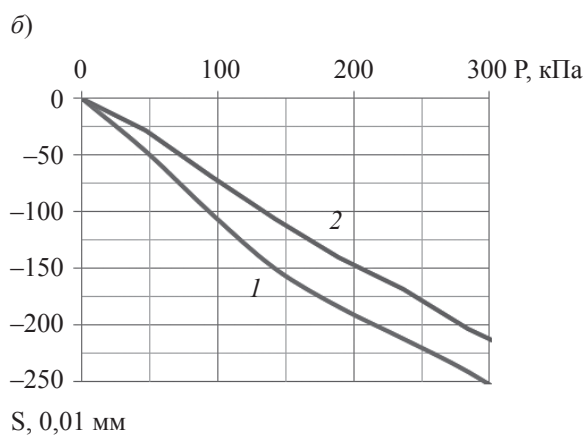
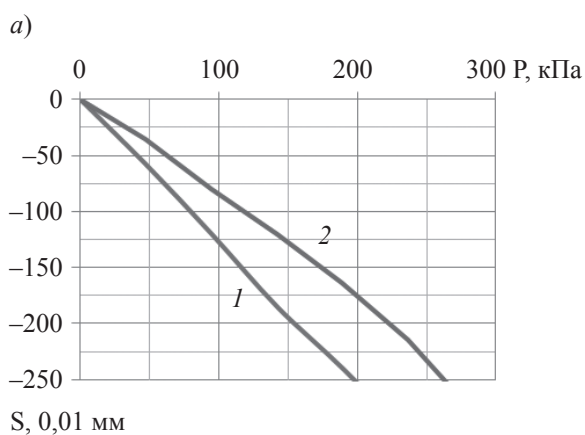


Рис. 6. График зависимости «осадка – нагрузка»:
а – при длине обоймы $b/4$; б – при длине обоймы $b/2$;
1 – трение грунта о гладкую стенку;
2 – трение грунта о шероховатую стенку

поверхности скольжения, возникающие в грунте, в рассматриваемом случае не имеют возможности свободно развиваться и на их очертание будут влиять соседние близлежащие ограждения. Расположенный между параллельными стенками грунт уплотняется, и часть его веса, вследствие трения, возникающего в процессе уплотнения, будет передаваться на боковые массы грунта или боковые стенки. Давление в нижней части засыпки снижается – возникает так называемый арочный эффект [4].

Выражение для определения вертикальных напряжений в основании ограниченного шпунтовой обоймы можно записать по Н. А. Цытовичу [4]:

$$\sigma_v = 1/A \times [\gamma - (\gamma - A \times p) e^{-Az}], \quad (1)$$

где A – коэффициент; γ – удельный вес грунта, кН/м³; p – нагрузка на поверхности засыпки, кН/м²; z – глубина, на которой вычисляется вертикальное давление.

Коэффициент A определяется:

– для замкнутых стенок:

$$A = 2\xi \times \operatorname{tg}(\varphi_0)/b_1 = \xi \times \operatorname{tg}(\varphi_0) \times u/F;$$

– для незамкнутых стенок:

$$A = \xi \times \operatorname{tg}(\varphi_0)/b_1,$$

где ξ – коэффициент бокового давления грунта; φ_0 – трение грунта о стенку; b_1 – полуширина фундамента; u , F – периметр и площадь ячейки.

Выражение (1) показывает, что по мере увеличения глубины z приращение вертикального давления, а следовательно, и бокового

давления на стенки шпунта уменьшаются (в зависимости от трения грунта о стенку).

Наряду с изложенным выше способом, для решения данной задачи можно использовать строгие решения предельного (пластического) равновесия грунтов, впервые предложенные проф. В. В. Соколовским [5]. Сложность метода В. В. Соколовского состоит в том, что им затруднительно, а иногда и невозможно пользоваться при сложных напластованиях грунтов и очертаниях поверхности.

Для сопоставления двух вышеизложенных методик расчета была, в качестве примера, решена задача с одинаковыми исходными данными: ширина подошвы фундамента – 1 м, давление под подошвой – 200 кПа. Характеристики грунта: удельный вес – 20 кН/м³, угол внутреннего трения – 30°, сцепление – 0, трение грунта о стенку 2/3φ.

При сопоставлении двух методов расчета с одинаковыми исходными данными погрешность определения вертикальных напряжений (σ_v) на разной глубине составила около 10%, что вполне приемлемо для практических инженерных задач. Результаты представлены в табл. 1.

Методика, разработанная В. В. Соколовским, основана на строгой теории предельного равновесия, и для ее решения необходимо выполнить трудоемкие вычисления с большим количеством табличных данных, в отличие от метода Н. А. Цытовича. Таким образом, по методу Н. А. Цытовича можно значительно проще и с достаточной степенью точности оценить влияние трения грунта о стенку шпунтовой обоймы на величину вертикальных напряжений.

ТАБЛИЦА 1. Сопоставление расчетов вертикального напряжения (σ_v) в основании, ограниченном шпунтовой обоймой на различной глубине

Метод	Глубина			
	1 м	1,5 м	2 м	2,5 м
Н. А. Цытовича, кПа	163,5	149,1	136,7	126,2
В. В. Соколовского, кПа	169,0	145,2	125,6	112,8
Погрешность, %	3,3	2,6	8,1	10,6

3 Численные методы определения напряжений в основании, ограниченном шпунтовой обоймой

Для сравнения инженерно-аналитического метода Н. А. Цытовича с методом В. В. Соколовского были сопоставлены результаты, полученные численными методами решения, основанными на методе конечных элементов.

В программе *Plaxis* 8.2, для оценки влияния трения на НДС системы «фундамент – основание – стенка», были смоделированы ситуации с разным значением коэффициента трения грунта о стенку.

Для исходных данных были использованы аналогичные (см. выше) характеристики грунта.

После определения НДС без использования шпунтового ограждения были смоделированы ситуации, когда длина шпунта составляла от 0,5 до 3 м, коэффициент трения грунта о стенку – от 0 до φ . Результаты представлены в виде графика на рис. 7.

Анализ результатов вычислений (рис. 7, б) показывает, что применение шпунтового ограждения позволяет значительно снизить величину осадки в зависимости от коэффициента трения грунта о стенку и длины шпунта. Например, если без шпунта осадка фундамента составляла 14,31 мм, то при использовании шпунтового ограждения длиной 3 м с трением грунта о стенку, равным φ , осадка снижается до 5,83 мм (почти в 3 раза). При сравнении значений вертикальных напряжений (σ_v), полученных аналитическим и численным методами, расхождения составили до 10% (табл. 2), что подтверждает достоверность используемых методик.

4 Рекомендуемые значения коэффициента трения грунта о стенку

В зависимости от значения коэффициента трения грунта о стенку можно значительно уменьшить (увеличить) осадку здания,

главное – знать, какой коэффициент трения реализуется и от чего он зависит.

Согласно [6], силы трения и сцепления на контакте «конструкция – грунтовый массив» должны определяться в зависимости от значений прочностных характеристик грунта, гидрогеологических условий площадки, материала конструкции, технологии ее устройства. Для нескальных грунтов рекомендуется принимать, что угол трения грунта по материалу конструкции $\varphi_0 = \gamma_k \varphi$, где φ – угол внутреннего трения грунта, γ_k – коэффициент условий работы, принимаемый по табл. 3.

В [7] трение грунта о стенку принимается равным $0,5\varphi$. В литературе также приводятся значения коэффициента трения грунта для шероховатых стенок – φ , для водонасыщенных мелких песков при наличии вибрации – 0, во всех остальных случаях – $0,5\varphi$.

В строительных нормах и правилах для плотин из грунтовых материалов [8] приведен график зависимости трения о стенку от влажности и размера (d) частиц грунта (рис. 8).

Таким образом, рекомендуемые значения коэффициентов трения грунта о вертикальную шпунтовую стенку можно использовать в предварительных расчётах. Уточнение значений коэффициента трения грунта о стенку для проведения аналитических расчётов требует дополнительных исследований.

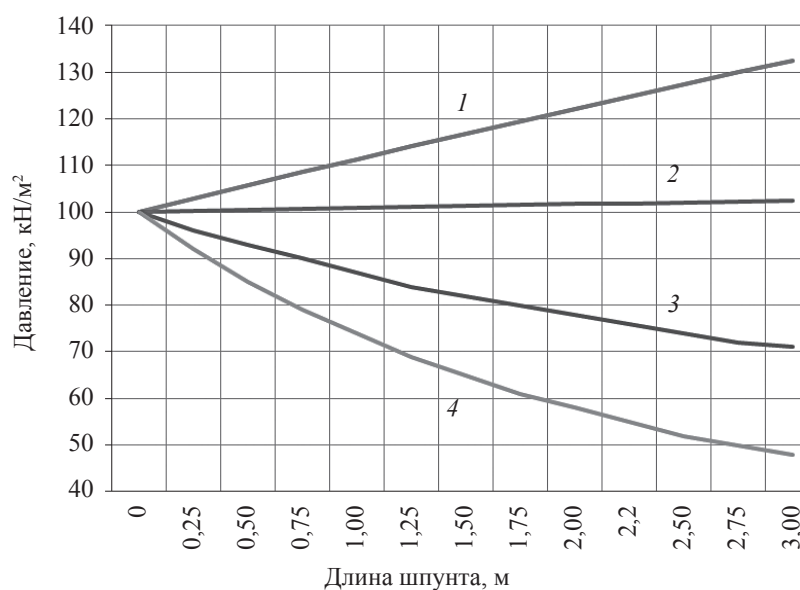
Заключение

Проделанная работа позволяет сделать следующие выводы:

1. Использование шпунтовой обоймы улучшает работу основания. Анализ испытаний и аналитических вычислений показал, что при работе основания в шпунтовой обойме значительно возрастает несущая способность, основание работает в линейной стадии.

2. На основе численных и аналитических расчетов можно сделать вывод о том, что в зависимости от трения грунта о стенку можно существенно снизить величину осадки фундамента.

а) по Н. А. Цытовичу



б) по программе Plaxis 8.2

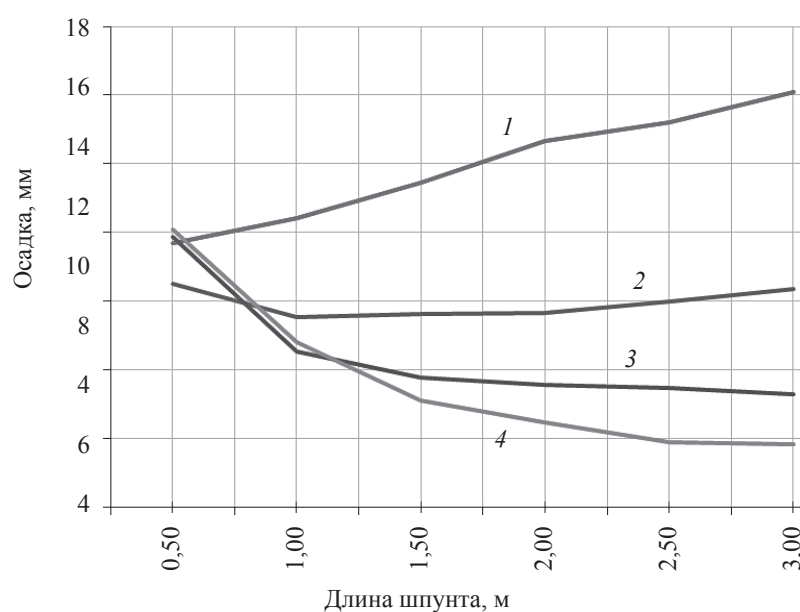


Рис. 7. График зависимости вертикального давления (а) и осадки (б) от трения грунта о стенку при различной длине шпунта:
 1 – $\varphi_0 = 0$; 2 – $\varphi_0 = 1/3\varphi$; 3 – $\varphi_0 = 2/3\varphi$; 4 – $\varphi_0 = \varphi$

ТАБЛИЦА 2. Сопоставление результатов при длине шпунта 2 м, $\varphi_0 = \varphi$

Глубина	(σ_v) по Plaxis 8.2, кПа	(σ_v) по Н. А. Цытовичу, кПа	Расхождение, %
0,5	89,94	85,23	5,2
1	81,71	73,71	9,8
1,5	66,58	64,70	2,8
2	59,57	57,66	3,2

ТАБЛИЦА 3. Значения коэффициента условий работы

Материал конструкции	Технология устройства и особые условия	γ_k
Бетон, железобетон	Монолитные гравитационные и гибкие подпорные стены, бетонизируемые насухо. Монолитные фундаменты.	0,67
	Монолитные гибкие подпорные стены, бетонизируемые под глинистым раствором в грунтах естественной влажности. Сборные гравитационные стены и фундаменты.	0,50
	Монолитные гибкие стены, бетонизируемые под глинистым раствором в водонасыщенных грунтах. Сборные гибкие стены, устраиваемые под глинистым раствором в любых грунтах	0,33
Металл, дерево	В мелких и пылеватых водонасыщенных песках	0
	В прочих грунтах	0,33
Любой	При наличии вибрационных нагрузок на основание	0

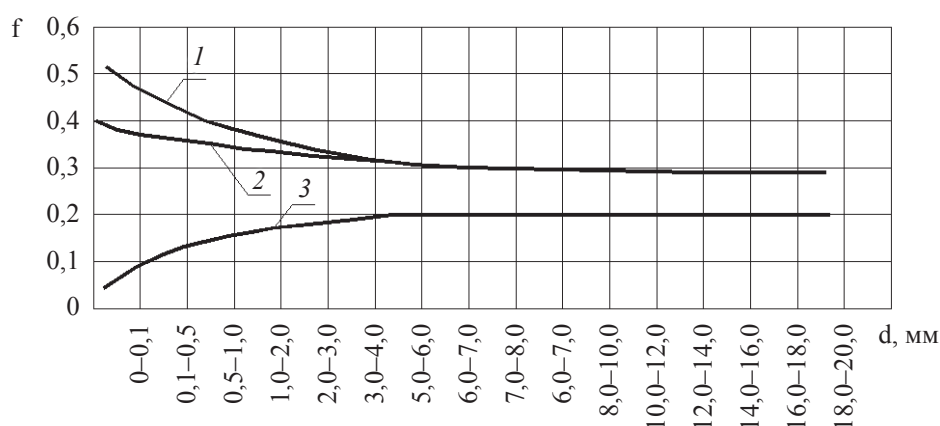


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения грунтов по стальной диафрагме от их крупности и влажности:

1 – грунт с влажностью 2–7%; 2 – грунт водонасыщенный; 3 – покрытие диафрагмы битумом

3. В нормативной литературе приводятся значения коэффициента трения грунта о стенку в зависимости от материала стенки и шероховатости, технологии ее устройства и частично от грунтовых условий, которые, в первом приближении, можно использовать для аналитических вычислений.

4. Определив перечисленные выше факторы и используя шпунтовую обойму, можно конструктивно улучшить работу осно-

вания, увеличивая несущую способность фундамента и снижая его осадку.

Библиографический список

1. **Осадки** фундаментов при реконструкции зданий : учеб. пособие / С. И. Алексеев. – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2009. – 82 с.

2. **ГОСТ 12248–2010.** Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 71 с.

3. **ГОСТ 20522–96.** СП 22.13330–2011. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – Москва : ИПК Изд-во стандартов, 1997.

4. **Механика грунтов** / Н. А. Цытович. – Москва : Госстройиздат, 1963. – 636 с.

5. **Статика** сыпучей среды / В. В. Соколовский. – Москва : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1960. – 240 с.

6. **СП 22.13330–2011.** Основания зданий и сооружений. – Москва, 2011.

7. **РД 31.31.24–81.** Рекомендации по проектированию причальных сооружений, возводимых по способу «стена в грунте». – Москва, 1981.

8. **СНиП 2.06.05–84.** Плотины из грунтовых материалов. – Москва, 1991.

УДК 528-482

Н. Н. Богомолова

Петербургский государственный университет путей сообщения

ПРЕДРАСЧЕТ ТОЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЕФОРМАЦИЙ ВЫРАБОТКИ ПРИ СООРУЖЕНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Предложен алгоритм расчета требуемой точности геодезических работ при наблюдениях за деформациями зоны выработки во время сооружения транспортных тоннелей. Рассмотрены вопросы назначения точности при наблюдениях за деформациями в горизонтальной и вертикальной плоскости. Представлены результаты расчетов и выводы.

геодезический мониторинг деформаций, транспортные тоннели, назначение точности.

Введение

Увеличение темпов роста освоения подземного пространства в России в последние годы связано с совершенствованием отечественных технологий тоннелестроения. Лишь в рамках реализации программы по подготовке к зимним Олимпийским играм в Сочи строится более 40 км тоннелей. Строительство проходит в сложных геологических условиях, связанных с высокой тектонодинамической активностью, сейсмичностью и экзогенными проявлениями.

Согласно [1], изучаемая нами территория находится в восьмибалльной зоне сейсмической интенсивности по карте ОСР-97-А. Эти факторы существенно влияют на развитие и активизацию оползневых процессов, что представляет потенциальную угрозу безопасности ведения работ при строительстве транспортных тоннелей. Необходимость ор-

ганизации безопасного строительного процесса в строго регламентированный срок объясняет актуальность разработки методики мониторинга деформаций при строительстве тоннелей.

Как правило, в зоне выработки реакция грунтового массива на производство проходческих работ проявляется в виде деформационных процессов, протекающих в зоне лба забоя, внутри выработки и в конечной обделке тоннеля, отстающей от забоя на установленную проектом величину.

Следует отметить, что современная гео-техническая аппаратура (тензодатчики, экстензометры, наклонометры и пр.) позволяет реализовывать мониторинг деформаций впереди забоя, обеспечивая сбор данных о грунтовых характеристиках, опережающих проходку, без применения геодезических средств измерений. Поэтому основные этапы работы при реализации наблюдений за