



УДК 551.343.74

Научно-экспериментальное обоснование основ проектирования и сооружения интермодального комплекса, интегрированного в международный аэропорт Пулково

В. Н. Кавказский

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Кавказский В. Н.* Научно-экспериментальное обоснование основ проектирования и сооружения интермодального комплекса, интегрированного в международный аэропорт Пулково // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 573–583. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-573-583

Аннотация

В статье рассматриваются перспективы развития железнодорожной инфраструктуры для улучшения транспортной доступности международного аэропорта Пулково. Анализируется проект создания двухпутной электрифицированной линии Лигово — аэропорт Пулково — Шоссейная, которая позволит интегрировать аэропорт в систему пригородно-городских перевозок Санкт-Петербурга. Особое внимание уделено инженерным решениям, включая тоннельные конструкции и подземный терминал, а также проблемам проектирования интермодальных узлов в условиях действующего аэропорта. **Цель:** Оценка устойчивости временной крепи и прогнозирование осадок перронного покрытия аэропорта при строительстве тоннелей под действующей инфраструктурой с учетом нагрузок от широкофюзеляжных воздушных судов (на примере Airbus A380-800). **Методы исследования:** В ходе исследования применялся комплекс взаимодополняющих методов, позволяющих всесторонне оценить поведение системы «перрон — грунтовый массив — крепь» при различных видах нагрузок: натурные испытания, численное моделирование, физическое моделирование, аналитические методы. **Практическая значимость:** Разработаны основы для проектирования и строительства тоннелей на территории аэропортов. Разработаны конкретные инженерные решения по креплению выработок под перронами с гарантией осадок ≤ 40 мм, обоснована эффективность технологии ADECO-RS для сложных гидрогеологических условий, определены оптимальные параметры временной крепи (96 композитных труб + набрызг-бетон 150 мм).

Ключевые слова: Железнодорожная инфраструктура, интермодальный транспорт, аэропорт Пулково, транспортная доступность, тоннельные решения, тоннелестроение, аэропортовая инфраструктура, геомеханическое моделирование, осадки, ADECO-RS.

Аэропорт Пулково — ключевой транспортный узел Северо-Западного региона, однако его связь с городом ограничена автомобильной магистралью. В статье исследуется проект интеграции аэропорта в железнодорожную сеть Санкт-Петербурга для повышения транспортной мобильности и создания интермодального пере-

садочного узла. Главной проблемой транспортной доступности аэропорта Пулково является его зависимость от единственной автомобильной магистрали — Пулковского шоссе. Это приводит к заторам в часы пик и при повышенном пассажиропотоке — рискам задержек из-за ДТП или ремонтных работ. Ограничение пропускной

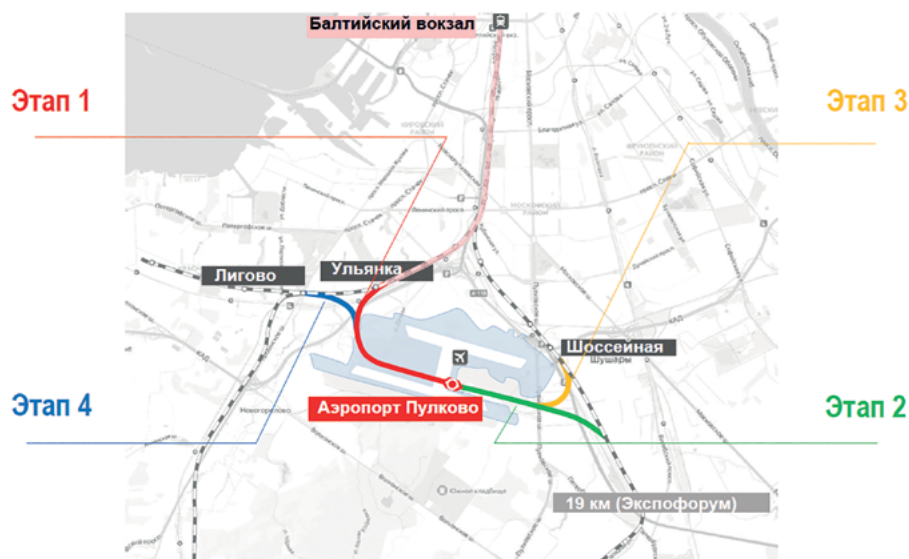


Рис. 1. Схема трассы с указанием этапов сооружения (авторский коллектив под руководством М. А. Бадридзе, 2023; схема предоставлена для использования в данной статье)

способности снижает удобство для пассажиров и логистическую эффективность. Для решения проблемы рассматриваются проекты внеуличного рельсового транспорта, которые обеспечат: высокую скорость сообщения, независимость от дорожной ситуации, интеграцию с городской и пригородной транспортной системой. Наиболее перспективным решением для организации транзитного движения через аэропорт Пулково признано строительство двухпутной электрифицированной линии железнодорожной линии Лигово — Аэропорт Пулково — Шоссейная. Схема трассы с указанием этапов сооружения представлена на рис. 1.

В соответствии с проектным решением протяженность вновь проектируемой линии составила 13,16 км. Для исключения влияния на штатное функционирование аэропорта утвержден и согласован план размещения пассажирского железнодорожного терминала и прилегающих к нему участков в тоннельном варианте, а значительной части соединительной линии — в выемке, с применением подпорных стен. Проект подразумевает сооружение 19 тоннелей и подземного пассажирского терминала на территории аэропорта.

Определен наиболее сложный участок сооружения терминала — проходка тоннелей под перроном аэропорта (рис. 2).

Несмотря на мировой опыт интеграции железнодорожного и авиационного транспорта (Хитроу, Франкфурт-на-Майне, Чанги), российская практика столкнулась с уникальными вызовами: отсутствие нормативной базы для проектирования подземных железнодорожных терминалов в аэропортах, дефицит технологических решений для строительства в условиях действующего аэропорта, неразработанность методик оценки взаимного влияния инфраструктур [1].

Строительство под действующим аэропортом требует принципиально новых решений из-за экстремальных ограничений по допустимым деформациям (максимальные осадки в зоне перрона 40 мм), сложных гидрогеологических условий (водонасыщенные линзы песка), непрерывной эксплуатации аэропорта во время строительства. В связи с перечисленным предложен и обоснован способ проходки тоннелей под перроном аэропорта методом ADECO-RS («Анализ контролируемых деформаций в горных породах и грунтах») [2–5].

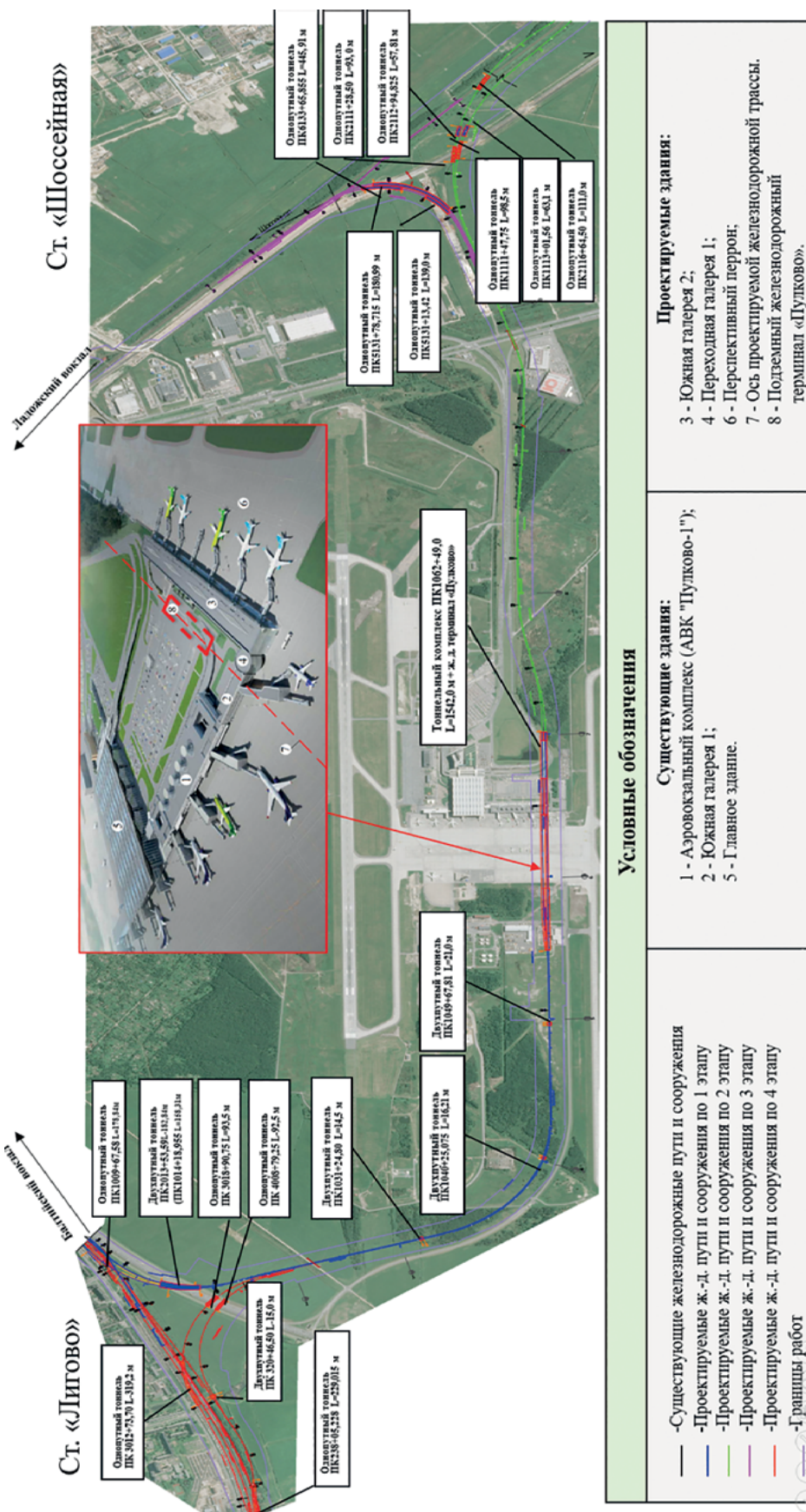


Рис. 2. План трассы железнодорожной линии с местами расположения тоннелей и терминала Пулково (рисунок выполнен автором по материалам проектных решений ОАО «РЖД», АО «ИЭРТ», АО «Ленгипротранс», ПГУПС)

Инженерно-геологическое строение представлено дислоцированными и недислоцированными твердыми глинами кембрийской системы с прослоями песчаников различной мощности.

Применение данного метода требует проведения комплекса исследований, включающих: натурные испытания, исследования на математических моделях и верификацию результатов с данными физического моделирования с учетом воздействия нагрузки от широкофюзеляжного воздушного судна в условиях длительного воздействия. Для этих целей разработана программа теоретических и экспериментальных исследований применения технологии проходки тоннелей горным способом под перроном без снижения пропускной способности аэропорта [6].

В международном аэропорту Домодедово проводились натурные испытания несущих конструкций проходных тоннелей под перроном. Целью испытаний было исследование воздействия воздушных судов на заглубленные тоннели. Особое внимание уделялось анализу нагрузок от самолетов «Аэробус» А300-600 и А380-800 на конструкции тоннелей. Тестирование конструкций производилось на шести секциях, ослабленных технологическими отверстиями. В качестве нагрузки использовались аэродромные плиты ПАГ-18 общей массой 120,6 т. Нагружение осуществлялось поэтапно с шагом 20% от расчетной нагрузки [7, 8].

В результате испытаний обоснован коэффициент динамичности 1,25 и зафиксированы максимальные деформации 1,3 мм (16% от допустимых 8 мм). Установлены факторы влияния на аэродромное покрытие: конфигурация шасси (количество и расположение колес), положение ВС относительно оси тоннеля, тип открытия перрона, продолжительность нагрузки, динамические воздействия при маневрировании.

Эти данные послужили основой для дальнейших исследований и оценки состояния покрытия

аэропорта Пулково. Оценка долговечности аэродромного покрытия аэропорта Пулково осуществлялась с использованием рейтинговой системы ACR/PCR и коэффициента совокупного износа (CDF). Этот подход соответствует международным стандартам (ICAO, FAA) и применяется для управления инфраструктурой аэродромов [9].

Конструкция покрытия состоит из верхнего слоя (цементобетон Вtb4.8, F150, $h = 0,37$ м), нижнего слоя (цементобетон $E_b = 21\,000$ МПа, $h = 0,21$ м). Основание выполнено из двух слоев щебня общей толщиной $h = 1,0$ м.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы: основная нагрузка на перронное покрытие приходится от интенсивно эксплуатируемых узкофюзеляжных воздушных судов (до 210 рейсов/сутки); максимальную нагрузку на покрытие оказывают широкофюзеляжные пассажирские суда «Аэробус А330», «Боинг 777» и грузовой «Боинг 747F»; для обслуживания «Аэробус 380-800» требуются специальные условия и усиленное покрытие в местах стоянки.

Коэффициент совокупного износа CDF аэродромных покрытий аэропорта составил 0,33, что свидетельствует об их хорошем состоянии (рис. 3). Остаточный ресурс составляет около 67% от нормального срока службы. При сохранении текущей нагрузки прогнозируемый срок достижения критического уровня износа ($CDF = 1$) составляет 12–15 лет. Таким образом, техническое состояние перронного покрытия можно считать исправным.

Анализ результатов моделирования напряженно-деформированного состояния системы «перрон — грунт — крепь — обделка» проведен численным моделированием в COMSOL Multiphysics для оценки влияния модуля деформации грунта ($E = 16, 28, 38$ МПа), расположения воздушного судна (А380-800) относительно оси тоннеля, параметров временной крепи (количество труб, набрызгбетонное покрытие).

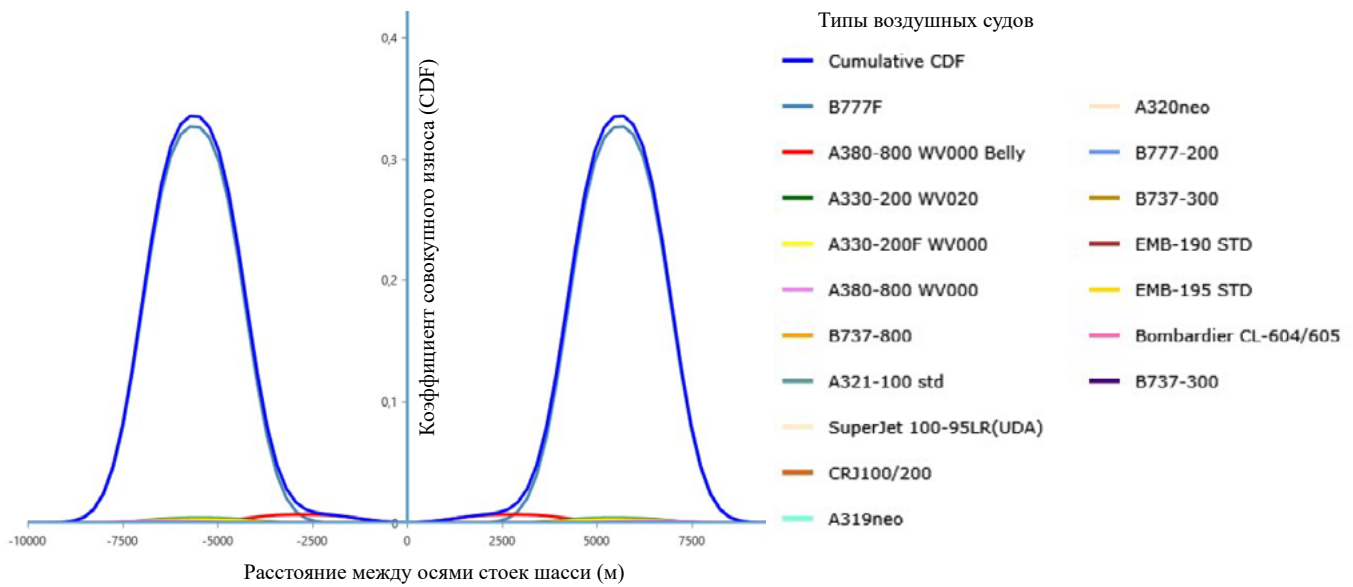


Рис. 3. Зависимости коэффициента совокупного износа CDF аэродромного покрытия для различных типов воздушных судов (график выполнен автором)

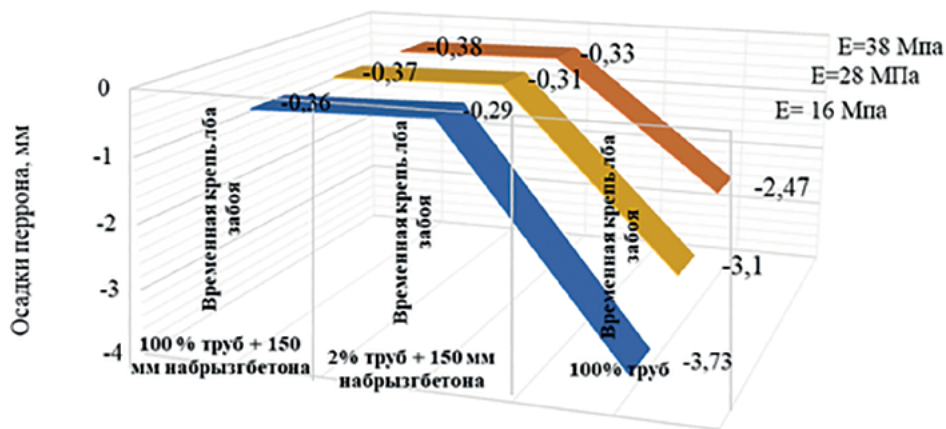


Рис. 4. Зависимости осадок плиты перрона от параметров временной крепи при различных свойствах грунта (график выполнен автором)

Моделирование проходки тоннеля проведено численным моделированием в Midas GTS NX с использованием двух геотехнических моделей поведения грунта: Hardening Soil (учет нелинейного деформирования) и Mohr-Coulomb (идеальная упругопластичность) [10].

В ходе исследований сделаны ключевые выводы. Изменение модуля деформации грунта (16–38 МПа) не влияет на осадки плиты перрона. Наибольшая эффективность крепи достигается при 96 трубах опережающего крепления и набрызгбетонном покрытии (150 мм) (рис. 4).

Влияние положения воздушного судна A380 при разных углах позиционирования (0°, 45°, 90°) по отношению к оси тоннеля не оказывает существенного влияния. Разница в осадках составила ≤ 1 мм, а крепь остается стабильной.

Результаты моделирования проходки позволили установить, что модель Hardening Soil точнее определяет осадки, чем Mohr-Coulomb: 13,23 мм (Hardening Soil) и 2,17 мм (Mohr-Coulomb). Максимальные осадки после проходки составили 23 мм (без нагрузки), 26 мм (с нагрузкой от A380). Проходка второго тоннеля (+16 м

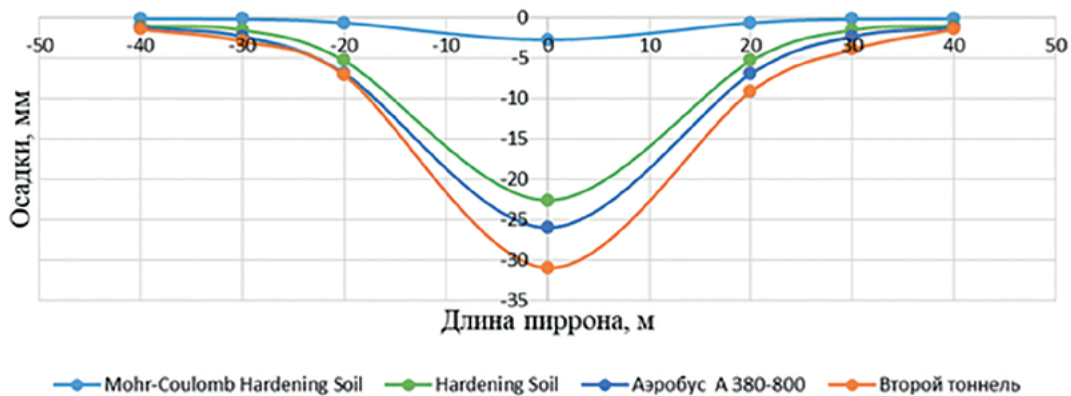


Рис. 5. Осадки перрона, вызванные проходкой, дополнительной нагрузкой от воздушного судна, проходкой второго тоннеля (график выполнен автором)

Таблица 1. Физико-механические характеристики эквивалентных материалов

№ п/п	Наименование материала	Параметр	Натура	Модель	
				расчетные	полученные
1	Протерозойские глины	E , МПа	28	1,16	1,5
		C , кПа	100	4,13	6
		φ , град.	23	23	23
		γ , кН/м ³	23	23	19
2	Арки временной крепи	E , МПа	753	0,023	0,023
3	Композитные трубы	E , МПа	18,88	0,025	0,025

от первого) добавляет 5 мм осадок (рис. 5). Суммарные осадки составили 31 мм, что ниже допустимых (40 мм).

Для верификации данных математических моделей проведены исследования геомеханической системы методом физического моделирования из эквивалентных материалов, целью которых являлся анализ напряженно-деформированного состояния временной крепи и устойчивости забоя выработки под перроном и оценка влияния проходческих работ на величины осадки бетонного покрытия перрона при длительном воздействии широкофюзеляжного воздушного судна «Аэробус А380-800».

Нагрузка в модели с масштабom 1:20 (линейные размеры модели в 20 раз меньше натурy) при весе самолета 592 тс и коэффициенте динамичности $K_d = 1,25$, определенная по формуле:

$$F_{\text{модели}} = F_{\text{натурy}} \left(\frac{l_{\text{модели}}}{L_{\text{натурy}}} \right)^2, \quad (1)$$

где $\frac{l_{\text{модели}}}{L_{\text{натурy}}} = \frac{1}{20}$ — линейный масштаб, составила

18,14 кН.

Для эквивалентных материалов приняты следующие условия подобия:

– для модуля деформации

$$E_{\text{модели}} = \frac{\gamma_{\text{модели}}}{\gamma_{\text{натурy}}} \cdot \frac{l_{\text{модели}}}{L_{\text{натурy}}} E_{\text{натурy}}; \quad (2)$$

где γ — удельный вес;

– для сцепления материала, моделирующего грунт:

$$C_{\text{модели}} = \frac{\gamma_{\text{модели}}}{\gamma_{\text{натуры}}} \cdot \frac{l_{\text{модели}}}{L_{\text{натуры}}} C_{\text{натуры}}; \quad (3)$$

– для угла внутреннего трения φ :

$$\varphi_{\text{модели}} = \varphi_{\text{натуры}}; \quad (4)$$

– для удельного веса γ :

$$\gamma_{\text{модели}} = \gamma_{\text{натуры}}$$

$$\frac{\gamma_{\text{модели}}}{\gamma_{\text{натуры}}} = \frac{l_{\text{модели}}}{L_{\text{натуры}}} = 20 \frac{\text{модели}}{\text{натуры}} = \frac{l_{\text{модели}}}{L_{\text{натуры}}} = 20. \quad (5)$$

Физико-механические характеристики материалов, эквивалентных моделируемым грунтам и элементам конструкции, приведены в табл. 1.

Для моделирования длительного воздействия в эксперименте с использованием теории подобия определен временной масштаб. Поскольку при определении осадок доминируют гравитационные силы, используется число Фруда Fr , вычисляемое по формуле:

$$Fr = \frac{v^2}{g L}, \quad (6)$$

где v — скорость;

g — ускорение свободного падения;

L — характерный размер.

В качестве условия подобия принято:

$$Fr_{\text{модели}} = Fr_{\text{натуры}}. \quad (7)$$

Для масштабирования времени с использованием числа Фруда определяется временной масштаб ($t_{\text{модели}} = t_{\text{натуры}}$):

$$\frac{t_{\text{модели}}}{t_{\text{натуры}}} = \sqrt{\frac{L_{\text{модели}}}{L_{\text{натуры}}}}. \quad (8)$$

При масштабе длины 1:20 он составляет:

$$\frac{t_{\text{модели}}}{t_{\text{натуры}}} = \sqrt{\frac{1}{20}} \approx \frac{1}{4,47}. \quad (9)$$



a



б

Рис. 6. Общий вид стенда:

a — максимальная нагрузка 3,6 т (35,3 кН);

б — состояние выработки при максимальной нагрузке (фото выполнено автором)

Таким образом, 1 сутки при моделировании эквивалентен $\approx 4,47$ суток в натуре.

Общий вид стенда, использованного при моделировании, приведен на рис. 6.

В рамках каждого этапа проводился мониторинг параметров напряженно-деформированного состояния контура выработки и лба забоя с использованием тензометрических датчиков и геодезических систем.

Эксперимент длился 20 циклов в течение 140 суток (7 дней/цикл) в соответствии с масштабом модели, что соответствует 625 суткам (1,7 года) в натуре при коэффициенте масштабирования времени 4,47.

Величины осадок дневной поверхности при длительном воздействии широкофюзеляжного воздушного судна «Аэробус А380-800», определенные по осадкам арок.

Прогнозируемые осадки (среднее значение — 553 мм) накапливаются за 1,7 года под воздействием нагрузки, эквивалентной удвоенной массе самолета (1480 т).

Данный сценарий является маловероятным в реальных условиях и был реализован исключительно в лабораторных условиях для оценки

эффективности работы временной крепи при экстремальных нагрузках.

Для оценки критического времени, при котором будут превышены нормативные значения, равные 40 мм, рассмотрена нагрузка от веса воздушного судна «Аэробус А380-800». При груз в модели достиг значений, равных весу воздушного судна, через 10 циклов (10,4 месяца в натуре), при этом осадки в среднем составили 253 мм. Динамика осадок при длительном воздействии воздушного судна «Аэробус А380-800» представлена на рис. 7.

На основе представленных данных эксперимента можно сделать следующие **выводы**:

Разработанная математическая модель взаимодействия элементов системы «перрон — грунтовый массив — временная крепь» при действии нагрузок от веса воздушного судна может быть использована для прогноза значений осадок поверхности аэродромного покрытия.

Предложенные технология проходки тоннеля и конструкция временной крепи демонстрируют свою применимость в условиях наличия нагрузок, обусловленных весом тяжелых воздушных судов типа «Аэробус А380-800».

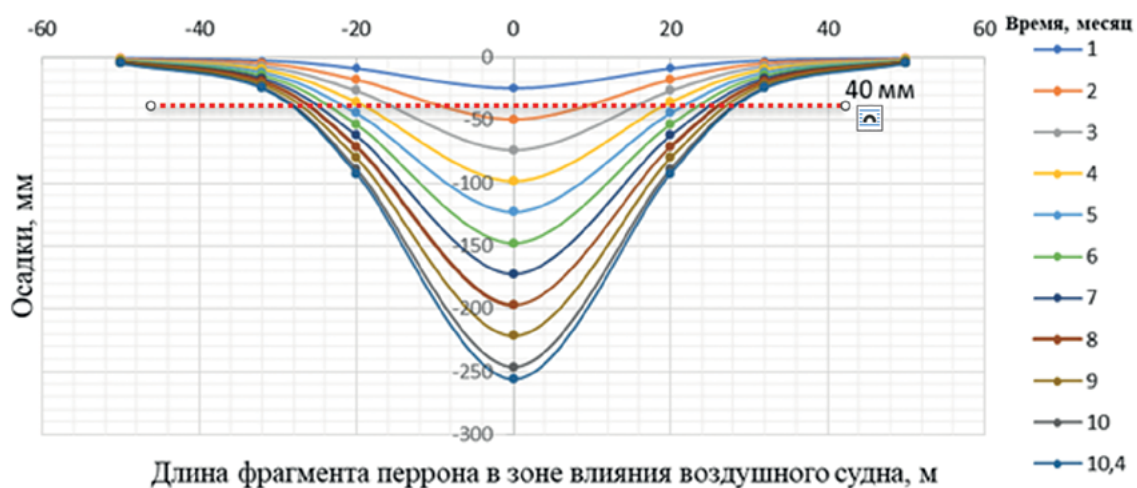


Рис. 7. Зависимости осадок перрона от времени воздействия (10,4 месяца) при действии веса воздушного судна «Аэробус А380-800» (график выполнен автором)

Кратковременное нахождение воздушного судна над выработкой, например, при рулении или стоянке, не приводит к критическим деформациям. Превышение нормативных осадок (40 мм) происходит только при достаточно продолжительном воздействии (более 1,5 месяца).

Полученные результаты позволяют выполнить долгосрочный прогноз деформаций грунтового массива. Накопленные за 10,4 месяца осадки, составляющие 254 мм, указывают на необходимость обязательного учета временного фактора при проектировании; регулярного мониторинга деформаций в зонах с постоянной нагрузкой; применения компенсирующих мер (усиление крепи и ограничение времени стоянки судов).

Полученные данные подтверждают эффективность предложенной технологии крепления выработки даже при учете динамичности и цикличности нагрузок.

Список источников

1. Кавказский В. Н. Анализ мировых тенденций развития интермодальных пересадочных узлов на базе международных аэропортов / В. Н. Кавказский // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 21. — Вып. 1. — С. 22–31. DOI: 0.20295/1815-588X-2024-01-22-31.
2. Коньков А. Н. Оценка влияния опережающей крепи кровли и лба забоя на устойчивость выработки при проходке автодорожного тоннеля в городе Сочи / А. Н. Коньков, Т. В. Иванес, В. И. Хомутов, В. Н. Кавказский // Промышленное и гражданское строительство. — 2012. — № 6. — С. 23–25.
3. Lunardi P. Design and Construction of Tunnels: ADECOR-S Approach / P. Lunardi. — 2008.
4. Меркин В. Е. О комбинированных обделках транспортных тоннелей из набрызг-бетона с напыляемой гидроизоляцией (по материалам семинара в Норвегии) / В. Е. Меркин // Метро и тоннели. — 2011. — № 3. — С. 16–17.
5. Чеканов П. В. Тоннельный переход между Северным и Южным терминальными комплексами в аэропорту Шереметьево / П. В. Чеканов // Подземные горизонты. — 2016. — № 11. — С. 68–73.
6. Ledyayev A. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport “Domodedovo” / A. Ledyayev, E. Davidenko, V. Kavkazskiy // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia. — 2021. — Pp. 28–36.
7. Афонин Д. А. Оперативный геодезический контроль деформаций призабойной зоны при инновационных технологиях проходки туннелей / Д. А. Афонин, В. Н. Кавказский, А. А. Никитчин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2022. — Т. 19. — № 3. — С. 432–443.
8. Меркин В. Е. Управление геотехническими рисками в подземном строительстве / В. Е. Меркин, М. Г. Зерцалов, Д. С. Конюхов // Метро и тоннели. — 2013. — № 6. — С. 36–39.
9. ICAO. Aerodrome Design Manual. — 2018.
10. Баклашов И. В. Геомеханика: в 2 т. / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия, А. Н. Шашенко, В. Н. Борисов. — М.: Горная книга, 2004. — Т. 1: Основы геомеханики. — Т. 2: Геомеханические процессы.

Дата поступления: 30.06.2025

Решение о публикации: 10.07.2025

Контактная информация:

КАВКАЗСКИЙ Владимир Николаевич —
канд. техн. наук, доц.; kavkazskiy_vn@mail.ru

Scientific and Experimental Foundation for the Design and Construction of an Intermodal Complex Integrated into Pulkovo International Airport

V. N. Kavkazsky

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kavkazskiy V. N. Scientific and Experimental Foundation for the Design and Construction of an Intermodal Complex Integrated into “Pulkovo” International Airport // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 573–583. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-573-583

Summary

The paper examines the prospects for developing railway infrastructure to improve the accessibility of transport to and from Pulkovo International Airport. The creation of an electrified double-track Ligovo — Pulkovo Airport — Highway line is being discussed as a project. The integration of the airport into St. Petersburg’s suburban and urban transportation system is planned. Special attention is paid to engineering solutions, such as tunnel structures, an underground terminal, and intermodal nodes within an operating airport. **Purpose:** To assess the stability of the temporary support and to forecast the setting of the airport apron surface during the construction of tunnels under the existing infrastructure, taking into account the loads from wide-body aircraft such as Airbus A380-800). **Methods:** A set of complementary methods was used to comprehensively assess the behavior of the “apron — soil mass — support” system under various loads, including field tests, numerical modelling, physical modelling, and analytical methods. **Practical significance:** The foundations for the design and construction of tunnels on the airport territory have been developed. Specific engineering solutions have been found for fixing workings under the aprons with their setting of not more than 40 mm. The ADECO-RS technology for difficult hydrogeological conditions has been proven effective, and the temporary support optimal parameters have been determined (96 composite pipes + 150 mm spray concrete).

Keywords: Railway infrastructure, intermodal transport, Pulkovo airport, transport accessibility, tunnel solutions, tunnelling, airport infrastructure, geomechanical modelling, setting, ADECO-RS.

References

1. Kavkazskiy V. N. Analiz mirovykh tendentsiy razvitiya intermodal’nykh peresadochnykh uzlov na baze mezhdunarodnykh aeroportov [Analysis of global trends in the development of intermodal transfer hubs based on international airports]. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2025, vol. 21, Iss. 1, pp. 22–31. DOI: 0.20295/1815-588X-2024-01-22-31. (In Russian)
2. Kon’kov A. N., Ivanov T. V., Khomutov V. I., Kavkazskiy V. N. Otsenka vliyaniya operezhayushchey krepki krovli i lba zaboya na ustoychivost’ vyrabotki pri prokhozke avtodorozhnogo tonnelya v gorode Sochi [Assessment of the

influence of the leading roof and face lining on the stability of the workings during the excavation of a road tunnel in the city of Sochi]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel’stvo* [Industrial and civil engineering]. 2012, Iss. 6, pp. 23–25. (In Russian)

3. Lunardi P. Design and Construction of Tunnels: ADECOR-S Approach, 2008.

4. Merkin V. E. O kombinirovannykh obdelkakh transportnykh tonneley iz nabryzg-betona s napylyaemoy gidroizolyatsiyey (po materialam seminar v Norvegii) [On combined linings of transport tunnels from shotcrete with sprayed waterproofing (based on the materials of the seminar in Norway)]. *Metro i tonneli* [Metro and tunnels]. 2011, Iss. 3, pp. 16–17. (In Russian)

5. Chekanov P. V. Tunnel'nyy perekhod mezhd Severnym i Yuzhnym terminal'nymi kompleksami v aeroportu Sheremet'evo [Tunnel crossing between the Northern and Southern terminal complexes at Sheremetyevo Airport]. *Podzemnye gorizonty* [Underground horizons]. 2016, Iss. 11, pp. 68–73. (In Russian)
6. Ledyayev A., Davidenko E., Kavkazskiy V. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport “Domodedovo”. International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia, 2021, pp. 28–36.
7. Afonin D. A., Kavkazskiy V. N., Nikitchin A. A. Operativnyy geodezicheskiy kontrol' deformatsiy prizaboynoy zony pri innovatsionnykh tekhnologiyakh prokhodki tunney [Operational geodetic control of deformations of the bottomhole zone during innovative tunnel boring technologies]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, vol. 19, Iss. 3, pp. 432–443. (In Russian)
8. Merkin V. E., Zertsalov M. G., Konyukhov D. S. Upravlenie geotekhnicheskimi riskami v podzemnom stroitel'stve [Geotechnical risk management in underground construction]. *Metro i tonneli* [Metro and tunnels]. 2013, Iss. 6, pp. 36–39. (In Russian)
9. ICAO. Aerodrome Design Manual, 2018.
10. Baklashov I. V., Kartoziya B. A., Shashenko A. N., Borisov V. N. *Geomekhanika: v 2 t. T. 1: Osnovy geomekhaniki. T. 2: Geomekhanicheskie protsessy* [Geomechanics: in 2 volumes. Volume 1: Fundamentals of Geomechanics. Volume 2: Geomechanical Processes]. Moscow: Gornaya kniga Publ., 2004. (In Russian)

Received: June 30, 2025

Accepted: July 10, 2025

Author's information:

Vladimir N. KAVKAZSKY — PhD in Engineering, Associate Professor; Kavkazskiy_vn@mail.ru