

УДК 624.151.1:042.7

Создание вибростабильных оснований для экспериментальных стендов в МГТУ им. Н.Э. Баумана

Смирнов Владимир Александрович^{1,2} belohvost@list.ru
SPIN-код: 5262-8988

¹ООО “Динамические Системы”, Москва, Россия

²НИУ МГСУ, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача обеспечения вибростабильных оснований для размещения высокоточного и прецизионного оборудования в новых корпусах МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для размещения такого типа оборудования установлены жесткие ограничения по допускаемым уровням виброскоростей колебаний основания в диапазоне частот 1...100 Гц от 3,25 до 0,78 мкм/с (кривые VC-D – VC-G). Решена задача комплексной виброизоляции нового корпуса как от внешних, так и от внутренних источников колебаний. Предложена концепция каскадной системы виброизоляции со взаимосвязанными параметрами. Внешнее динамическое воздействие от, в первую очередь, транспортных нагрузок снижает система виброизоляции по боковой поверхности подземной части здания, выполненная из подобранных под нагрузку слоёв вибродемпфирующих материалов. Для снижения низкочастотных колебаний, вызванных микросейсмической активностью, разработана схема повышения изгибной жесткости подземной части здания за счет применения фундаментной плиты коробчатого сечения — повышения толщины фундаментной плиты и обеспечения её совместной работы с перекрытием –1 этажа за счет увеличения сечения и вовлечения в работу пилонов, вместо колонн. Снижение вибрации и переизлучаемого структурного шума внутри здания от инженерного и технологического оборудования производится за счет установки виброактивных установок на виброизоляторы. Приведены результаты измерений вибрации до начала строительства, на различных этапах строительно-монтажных работ, а также итоговые уровни вибрации, доказывающие эффективность комплексной системы виброизоляции — при вводе сооружения в эксплуатацию.

Ключевые слова: виброизоляция, высокоточное оборудование, VC-кривые, микросейсмическая активность, техногенная вибрация, инженерное оборудование

Development of vibration-stable foundations for experimental test stands at Bauman Moscow State Technical University

Smirnov Vladimir Aleksandrovich^{1,2} belohvost@list.ru
SPIN-code: 5262-8988

¹“Dynamicheskije Sistemy” LLC, Moscow, Russia

²NRU MGSU, Moscow, Russia

Abstract. This paper addresses the challenge of providing vibration-stable foundations for housing high-accuracy and precision equipment within the new buildings of the N.E. Bauman Moscow State Technical University (MSTU). To accommodate this type of equip-

ment, strict limits have been established regarding permissible vibration velocity levels of the foundation within the 1...100 Hz frequency range, ranging from 3.25 to 0.78 $\mu\text{m/s}$ (corresponding to VC-D through VC-G curves). A comprehensive vibration isolation solution was developed for the new building to mitigate oscillations originating from both external and internal sources. A concept for a cascaded vibration isolation system with interrelated parameters is proposed. External dynamic impacts — primarily those resulting from vehicular traffic loads — are attenuated by a vibration isolation system installed along the lateral surfaces of the building's underground section; this system consists of layers of vibration-damping materials specifically selected to suit the anticipated loads. To mitigate low-frequency oscillations induced by microseismic activity, a structural scheme was devised to enhance the flexural stiffness of the building's underground section. This scheme involves utilizing a box-section foundation slab — specifically, increasing the slab's thickness and ensuring its composite action with the basement (–1) floor slab — by enlarging structural cross-sections and employing load-bearing pylons rather than standard columns. Vibration and re-radiated structural noise generated internally by engineering and technological equipment are attenuated by mounting these vibration-generating units on dedicated vibration isolators. The paper presents vibration measurement results recorded prior to the commencement of construction, at various stages of construction and installation works, as well as the final vibration levels observed upon the building's commissioning, thereby demonstrating the effectiveness of the comprehensive vibration isolation system.

Keywords: vibration isolation, high-precision equipment, VC curves, microseismic activity, technogenic vibration, engineering equipment

Введение. За последние два десятилетия размещение высокоточного исследовательского и производственного оборудования в университетских и научных комплексах вышло за рамки задачи проектирования лишь специализированного здания в узком понимании этого слова. Электронная микроскопия, метрология, оптические и рентгеновские методы, а также экспериментальные стенды высокой разрешающей способности все чаще размещают в многофункциональных корпусах, где рядом сосуществуют учебные аудитории, инженерные помещения, коммуникационные зоны и лаборатории различных классов чувствительности. При этом именно уровень микросейсмических колебаний часто оказывается тем фактором, который определяет фактическую пригодность здания для такой тонкой работы. Исследования показывают, что даже безопасное и комфортное для людей здание может оказаться непригодным для прецизионного оборудования, потому что такая техника чувствительна даже к очень слабым вибрациям [1–5].

Для таких высокоточных объектов традиционная постановка задачи обеспечения выполнения условий 2 группы предельных состояний (ограничение колебаний) недостаточны по трем причинам. Во-первых, критерии комфорта человека и сохранности здания ориентированы на другие механизмы восприятия и повреждаемости. Во-вторых, высокоточное оборудование реагирует на спектральную структуру воздействия, а не только на единичный пик во временной реализации. В-третьих, работоспособность инструмента определяется не просто уровнем колебаний в единичной точке, а всей системой передачи: *источник* —

грунт — фундамент — несущая система — перекрытие — локальное основание — сам прибор (в том числе за счет наличия вторичных источников, например, переизлучаемого структурного шума). Поэтому для лабораторий и прецизионных стендов принята практика оценки по обобщенным вибрационным критериям VC , задаваемым в 1/3-октавных полосах по виброскорости, регламентированная в ГОСТ Р ИСО/ТС 10811-2. В публикациях 2005 [1] и 2011 [6] годов показано, что эти критерии полезны как для предварительного задания качества помещений, так и для окончательной проверки выполненного объекта, особенно когда состав будущего оборудования может изменяться.

Современные исследования [4, 5, 7–10] развивали данную проблематику по нескольким взаимосвязанным направлениям: совершенствование обобщенных вибрационных критериев и методов статистической обработки результатов измерений; изучение влияния заглубления зданий и устройства плит по грунту на снижение уровней колебаний; анализ динамической жесткости большепролетных перекрытий; оценка воздействия транспортной и строительной инфраструктуры; исследование роли инфразвуковых и низкочастотных акустических воздействий для микроскопии и электронно-лучевых систем; диагностика внутренних механических источников вибрации; а также, что принципиально важно, верификация проектных решений по данным натурных наблюдений на стадиях строительства и ввода объекта в эксплуатацию. В указанных публикациях данный подход приобретает завершенный методологический характер: проектирование высокоточных исследовательских производств рассматривается уже не как однократный расчет по нормативным табличным критериям, а как итерационный расчетно-экспериментальный процесс.

На этом фоне задача разработки вибростабильных оснований для размещения высокоточного оборудования в новом корпусе МГТУ им. Н.Э. Баумана представляет не только научный интерес, но и практический пример применения каскадной согласованной системы виброизоляции здания: снижение внешнего воздействия по пути распространения, повышение изгибной и пространственной жесткости подземной части, локальная виброизоляция инженерного и технологического оборудования и стадийный мониторинг от поверхности грунта до законченных помещений. Именно такая постановка и образует научный пробел, который закрывает настоящая статья: она рассматривает не отдельную меру, а взаимосвязанную систему решений, проверяемую по натурным данным на всех ключевых стадиях реализации.

Материалы и методы. Объектом исследования является строящийся корпус университетского исследовательского комплекса МГТУ им. Н.Э. Баумана, план –1 этажа которого представлен на рис. 1. На нем можно увидеть зоны уровня $VC-G/F$ на –1 этаже, также в здании имеются зоны уровня $VC-E/F$ на 1 этаже и $VC-C$ на 2 этаже. При этом зачастую в непосредственной близости от зон с повышенными требованиями к вибрации, расположены зоны с наличием источников вибрации: от пешеходной активности до инженерных помещений и металлообработки.

Критериальная база исследования опирается на семейство ВС-кривых, соответствующие международной практике проектирования высокоточных производств [1–3, 6]. Критерии (кривые) VC (Vibration Criteria) — это принятые в международной инженерной практике ориентиры для оценки пригодности помещений к размещению высокоточного и вибросочувствительного оборудования: электронных и оптических микроскопов, метрологических систем, лазерных установок, прецизионных станков и экспериментальных стендов. В отличие от обычных санитарных критериев, ориентированных на восприятие вибрации человеком, ВС-кривые оценивают не комфорт, а способность оборудования стабильно выполнять заданные функции при очень малых колебаниях основания. Поэтому анализ ведется, как правило, по среднеквадратической виброскорости в 1/3-октавных полосах частот, что позволяет учитывать не только общий уровень вибрации, но и ее спектральный состав.

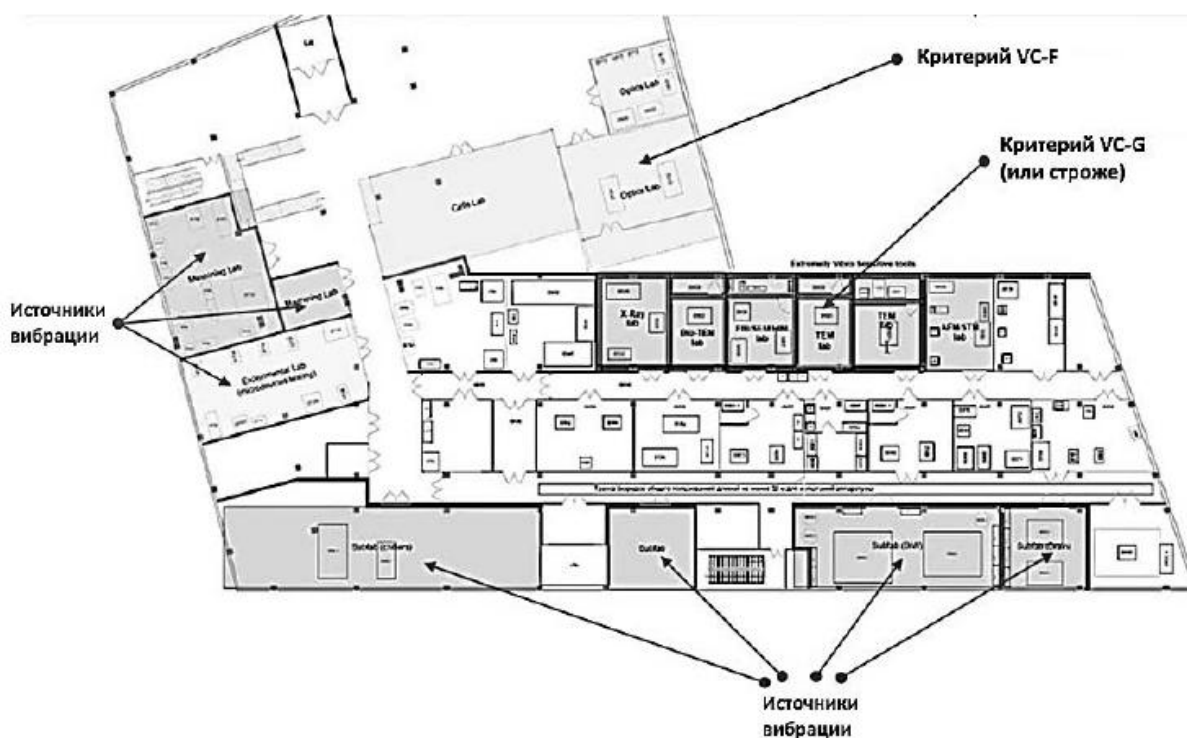


Рис. 1. Зоны расположения источников и приемников вибрации с требованиями по виброизоляции

Для каждой 1/3-октавной полосы частот i вибрацию оценивают по среднеквадратической виброскорости:

$$v_{\text{rms},i} = \sqrt{\int_{f_{1,i}}^{f_{2,i}} G_v(f) df},$$

где $G_v(f)$ — спектральная плотность виброскорости, а $f_{1,i}, f_{2,i}$ — границы полосы.

Чем «строже» класс — от VC-A к VC-G (по рис. 2), — тем ниже допустимый уровень вибрации и тем более чувствительное оборудование может быть размещено в помещении. Например, здание может быть полностью безопасным для людей и несущих конструкций, но оказаться непригодным для прецизионной техники, поскольку такая техника реагирует уже на колебания порядка долей или единиц микрометров в секунду.

Для оценки передачи между уровнями системы виброизоляции применимы коэффициент передачи $T_i = \frac{v_{\text{rms},i}^{\text{out}}}{v_{\text{rms},i}^{\text{in}}}$ и ослабления: $A_i = 20 \log_{10} T_i$.

Программа вибрационного мониторинга была построена как последовательная многостадийная система натуральных наблюдений, охватывающая весь цикл формирования объекта — от открытой площадки до готовых помещений с заданными классами вибрационной чувствительности. Такая постановка была принципиально необходима, поскольку внешний вибрационный фон на рассматриваемой территории представляет собой случайный нестационарный процесс, формируемый совокупностью разнородных источников: городским транспортом, строительной активностью на прилегающих участках, локальными технологическими воздействиями и естественным микросейсмическим фоном. В этих условиях разовое кратковременное обследование не могло дать надежного представления ни о реальной вибрационной обстановке, ни о механизмах передачи колебаний в системе «грунт — ограждающие конструкции котлована — фундамент — подземная часть — надземная часть». Именно из-за этого помимо V_{rms} , оцениваемого по критерию VC, для прогноза вибрационного фона использованы статистики V_{mean} , V_{95} , V_{99} , V_{max} , а на промежуточных стадиях — также $V_{\text{mean}} + \sigma$ и $V_{\text{mean}} + 2\sigma$, что соответствует современной практике различения среднего фона и эпизодических превышений [1].

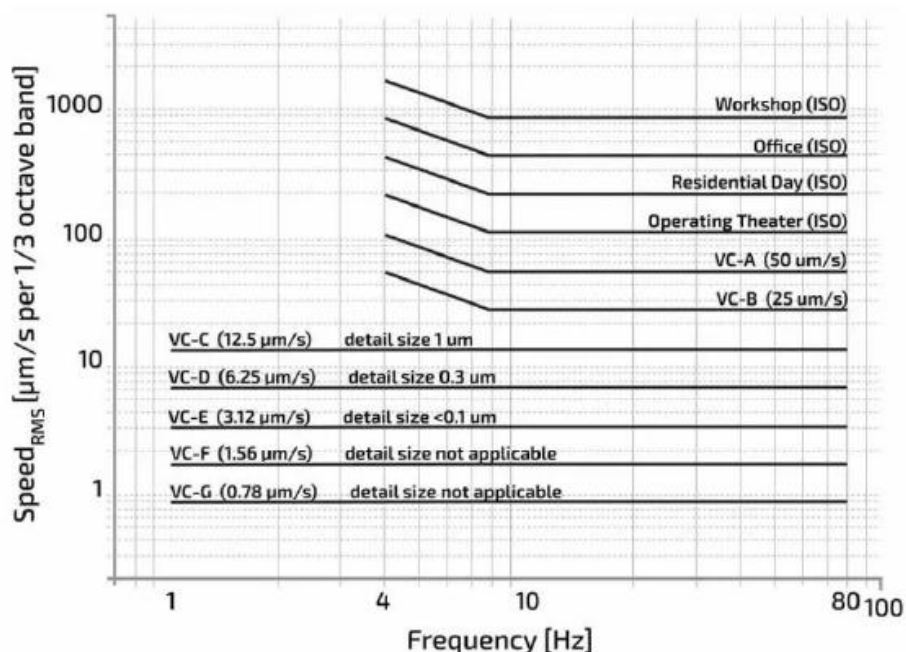


Рис. 2. Набор VC-кривых

Измерения носили длительный и поэтапный характер. Отдельные серии наблюдений, приведенные на рис. 3, были приурочены к ключевым технологическим этапам строительства: состоянию открытого котлована, периоду после его разработки, устройству пионерной плиты, формированию подземной части, возведению вертикальных и горизонтальных конструкций подвала, последующему возведению надземной части, а также вводу в работу инженерного оборудования. На стадии исходного состояния наблюдения выполнялись на грунте в августе, сентябре и ноябре 2022 года, а также в январе 2023 года, что позволило зафиксировать исходный внешний фон до начала формирования законченной подземной и надземной конструктивной системы. На стадии разработки котлована измерения проводились на его основании в августе, сентябре и ноябре 2022 года; тем самым оценивалось, как изменяются условия распространения колебаний после снятия верхних слоев грунта и раскрытия котлована. После устройства пионерной и затем фундаментной плиты наблюдения были продолжены уже на элементах формирующейся фундаментной системы — начиная с сентября 2022 года, далее в ноябре 2022 года, январе и марте 2023 года. Дополнительно в ноябре 2022 года и январе 2023 года выполняли измерения на конструкциях типа «стена в грунте», что имело особое значение для анализа путей боковой передачи вибрации из грунтового массива в подземную часть сооружения.

Таким образом, измерительная программа фиксировала не только абсолютные уровни вибрации, но и эволюцию самой динамической схемы объекта по мере изменения его массы, жесткости, пространственной работы и характера контакта с основанием.

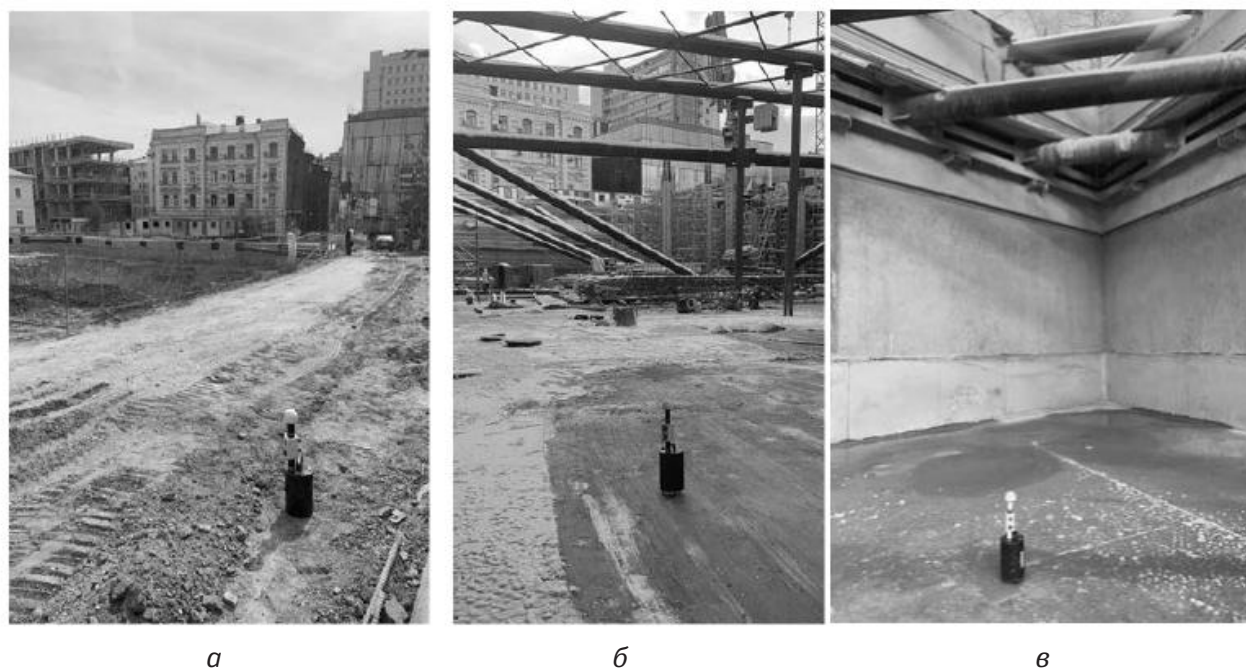


Рис. 3. Фотофиксация измерений вибрации на различных этапах строительного процесса

Наблюдения выполняли в нескольких контрольных точках и, где это было необходимо, по трем взаимно перпендикулярным направлениям X, Y и Z, что позволяло оценивать как вертикальную, так и горизонтальные составляющие отклика. Финальный этап мониторинга был ориентирован уже не на отдельные конструктивные элементы, а на реальные целевые помещения: зоны уровня VC-F на -1 этаже, VC-E/F на 1 этаже и VC-C на 2 этаже. Тем самым контроль переносился с уровня строительных конструкций на уровень эксплуатационной пригодности помещений для размещения чувствительного научного и экспериментального оборудования.

Следует подчеркнуть, что высокая жесткость требований по вибрации для экспериментальных стендов и прецизионного оборудования потребовала учитывать все существенные особенности взаимодействия грунтового массива, фундаментной системы и формирующегося сооружения. Речь шла не только о регистрации фоновых уровней, но и о выявлении реальных путей распространения вибрации по основанию, фундаментной плите, ограждающим подземным конструкциям и несущему каркасу. Поэтому результаты каждого этапа не рассматривались изолированно: они использовались для последующей актуализации расчетной модели, уточнения принятых представлений о жесткости и передаточных свойствах конструктивной схемы, а также для корректировки проектных решений по виброизоляции, вибродемпфированию и локальной защите инженерного оборудования. Иными словами, программа измерений выполняла не только контрольную, но и активную проектно-верификационную функцию, обеспечивая обратную связь между расчетом, строительной реализацией и фактическим вибрационным состоянием объекта.

Измерения выполняли высокочувствительными малошумящими сейсмическими акселерометрами PCB Piezotronics 393B04, предназначенными для регистрации микровибраций. Для данного датчика производителем заявлены чувствительность 1000 мВ/г ($\pm 10\%$), диапазон измерений ± 5 g peak, рабочий частотный диапазон 0,06–450 Гц по критерию $\pm 5\%$, расширенный диапазон 0,02–1700 Гц по уровню ± 3 дБ, собственная резонансная частота не ниже 2500 Гц, а также широкополосное разрешение порядка 0,000003 g rms; масса датчика составляет 50 г, что делает его пригодным для длительных измерений слабых колебаний на строительных и лабораторных основаниях. Производитель отдельно указывает, что сочетание высокой чувствительности и низкого собственного шума позволяет использовать данную модель для задач измерения микровибрации.

Регистрацию сигналов осуществляли с использованием многоканальной станции сбора данных LMS SCADAS Mobile-I. Для платформы SCADAS Mobile дистрибьютор Siemens указывает частоту дискретизации до 204,8 кГц на канал, 24-разрядное аналого-цифровое преобразование типа sigma-delta, динамический диапазон до 150 дБ, возможность построения распределенных многоканальных конфигураций, подключение по высокоскоростному Ethernet и бесшумную работу без принудительной вентиляции, что особен-

но важно при измерениях слабых вибрационных воздействий в чувствительной среде.

Продолжительность регистрации в каждой точке принималась, как правило, не менее 2 ч. В ряде серий датчики оставлялись на 3–4 ч, а в отдельных случаях — до суток, когда требовалось оценить суточную изменчивость вибрационного фона городской территории и отделить устойчивую фоновую составляющую от эпизодических транспортных и строительных событий. Такая длительность наблюдений позволяла получить не только мгновенные или усредненные оценки, но и статистически содержательные характеристики случайного процесса, включая временные реализации, спектрограммы, распределения амплитуд, перцентильные оценки и полосовые значения виброскорости. Это соответствовало принятой в проекте задаче: использовать результаты измерений не только для фиксации текущего состояния, но и для сопоставления прогноза и факта, последующей корректировки расчетных моделей и уточнения состава дополнительных мероприятий по виброизоляции.

Оценку измеренных уровней вибрации выполняли по виброскорости в 1/3-октавных полосах частот. При регистрации исходного сигнала в виде виброускорения переход к виброскорости осуществляли интегрированием во временной или, предпочтительно, в частотной области, где комплексный спектр виброскорости определяли по соотношению $V(f) = \frac{A(f)}{i 2\pi f}$, а спектральную плотность виброскорости — по формуле $S_{vv}(f) = S_{aa}(f)/(2\pi f)^2$. Для 1/3-октавной полосы с центральной частотой f_c нижнюю и верхнюю границы принимали равными $f_1 = f_c/2^{1/6}$ и $f_2 = f_c 2^{1/6}$. Полосовое среднеквадратическое значение виброскорости вычисляли как $V_{rms}(f_c) = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S_{vv}(f) df}$. При длительных наблюдениях запись разбивали на временные окна, для каждого из которых определяли полосовые значения $V_k(f_c)$, после чего рассчитывали энергетически усредненную оценку $V_{rms}(f_c) = \sqrt{M^{-1} \sum_{k=1}^M V_k^2(f_c)}$, а также статистики верхних уровней $V_{95}(f_c)$ и $V_{99}(f_c)$ как 95-й и 99-й перцентили выборки $\{V_k(f_c)\}$. Максимальный уровень $V_{max}(f_c)$ принимали как максимум полосовых RMS-значений по всем временным окнам наблюдения. Такой подход позволял корректно различать средний энергетический фон, верхнюю статистически значимую часть распределения случайного процесса и редкие эпизодические превышения.

Для прогнозирования виброшумового режима в помещениях объекта использовали расчетную модель, разделенную по частотным диапазонам. Для средних и высоких частот основным являлся линейно-спектральный подход, позволяющий быстро оценивать передаточные свойства и работать с полосовыми критериями. Для низкочастотной области, где критичны пространственная работа основания, большие длины волн и совместное деформирование подземной части, допускалось применение либо линейно-спектрального анализа с уточненными моделями, либо прямого интегрирования уравнений

движения. Такая постановка в целом соответствует международной практике [10], где низкочастотная зона требует большей осторожности в интерпретации и сильнее зависит от геометрии, жесткости и модели контакта с грунтом. Общий вид расчетной модели приведен на рис. 4.

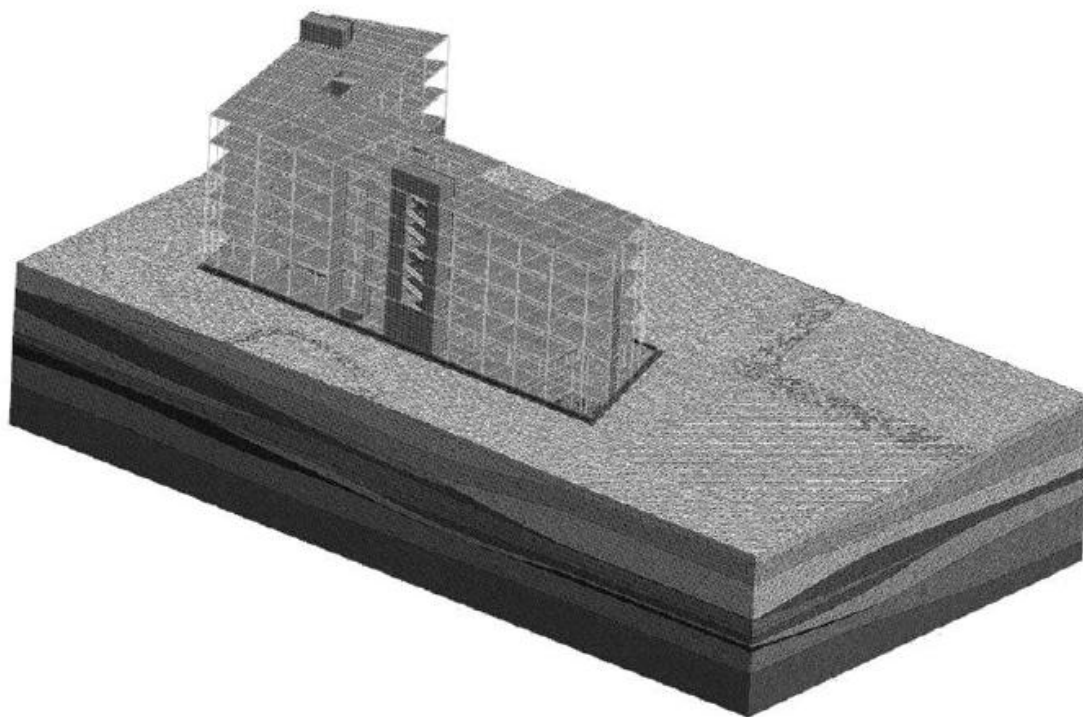


Рис. 4. Расчетная модель объекта

Для снижения уровней внешней вибрации до установленных требований использовали каскадную согласованную (по динамическим характеристикам каждого каскада) систему виброизоляции. Для внешних воздействий — виброизоляция по пути распространения, в том числе по боковой поверхности подземной части, с применением вибродемпфирующих матов (рис. 5, а); для низкочастотной области — повышение изгибной и пространственной жесткости подземной части за счет совместной работы фундаментной плиты, перекрытия –1 этажа и вертикальных несущих элементов; для внутренних источников — локальная виброизоляция инженерного оборудования, плавающие полы и меры по разрыву жестких связей в коммуникациях (рис. 5, б).

Результаты. Некоторые результаты измерений приведены на рис. 6. На ранней стадии и на этапе измерений в котловане доминировала вертикальная компонента в полосах порядка 6,3...20 Гц; при этом средние уровни находились в области диапазона VC-F и выше, а эпизодические максимумы существенно превосходили как энергетически усредненный уровень, так и более жесткие критерии. В котловане, отдельные максимумы в полосах 8...50 Гц достигают десятков микрометров в секунду, а для одной из точек порядка 10^2 мкм/с, что характерно для нестационарных строительных собы-

тий и подчеркивает необходимость различения фоновой среды и временных возмущений. Т.е. если бы оценка велась только по единичным пикам, вывод о пригодности площадки был бы чрезмерно пессимистичным; если бы только по среднему фону — напротив, были бы потеряны риски технологических сбоев во время строительства.



Рис. 5. Некоторые элементы каскадной системы виброизоляции:

а — виброизоляция по поверхности СВГ; б — виброизоляция инженерного оборудования с применением плавающих полов

После разработки котлована средний уровень в вертикальном направлении по отдельной точке демонстрировал максимум порядка $1,7...1,8$ мкм/с в полосах $12,5...16$ Гц, то есть был близок к границе VC-F, тогда как центильные и особенно максимальные оценки оставались заметно выше: V_{95} и V_{99} в тех же полосах подходили к VC-E/VC-D, а V_{max} превышал даже VC-C. Физически это означает, что частичное изменение граничных условий площадки само по себе не решает задачу; более того, в стадии открытого котлована возможно перераспределение путей распространения и локальное усиление отдельных полос.

Сравнение результатов измерений на дне котлована и пионерной плите показало, что она не дает гарантированного широкополосного снижения уровней вибрации. Вибрация на плите в диапазоне примерно $1...16$ Гц местами сопоставима с уровнями на основании котлована или выше них. То есть низкочастотные колебания нельзя снизить одной лишь плитой определенной жестко-

сти и массы. Реальный эффект возникает тогда, когда формируется полноценно работающий подземный контур жесткости: объединение фундаментной плиты, вертикальных несущих элементов и перекрытия подвала.

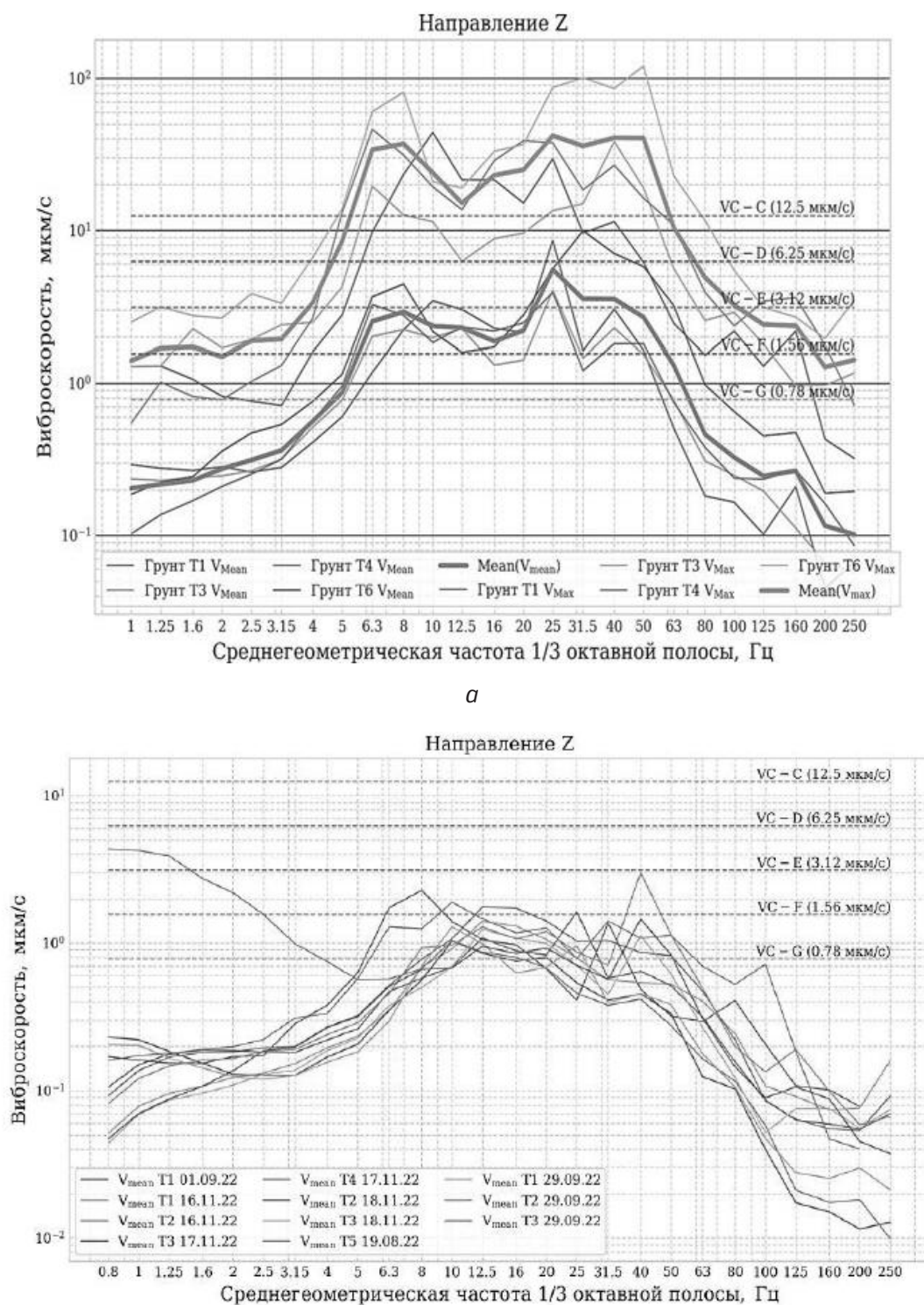


Рис. 6 (начало). Результаты измерений в точке:
а — на грунте; б — на поверхности котлована

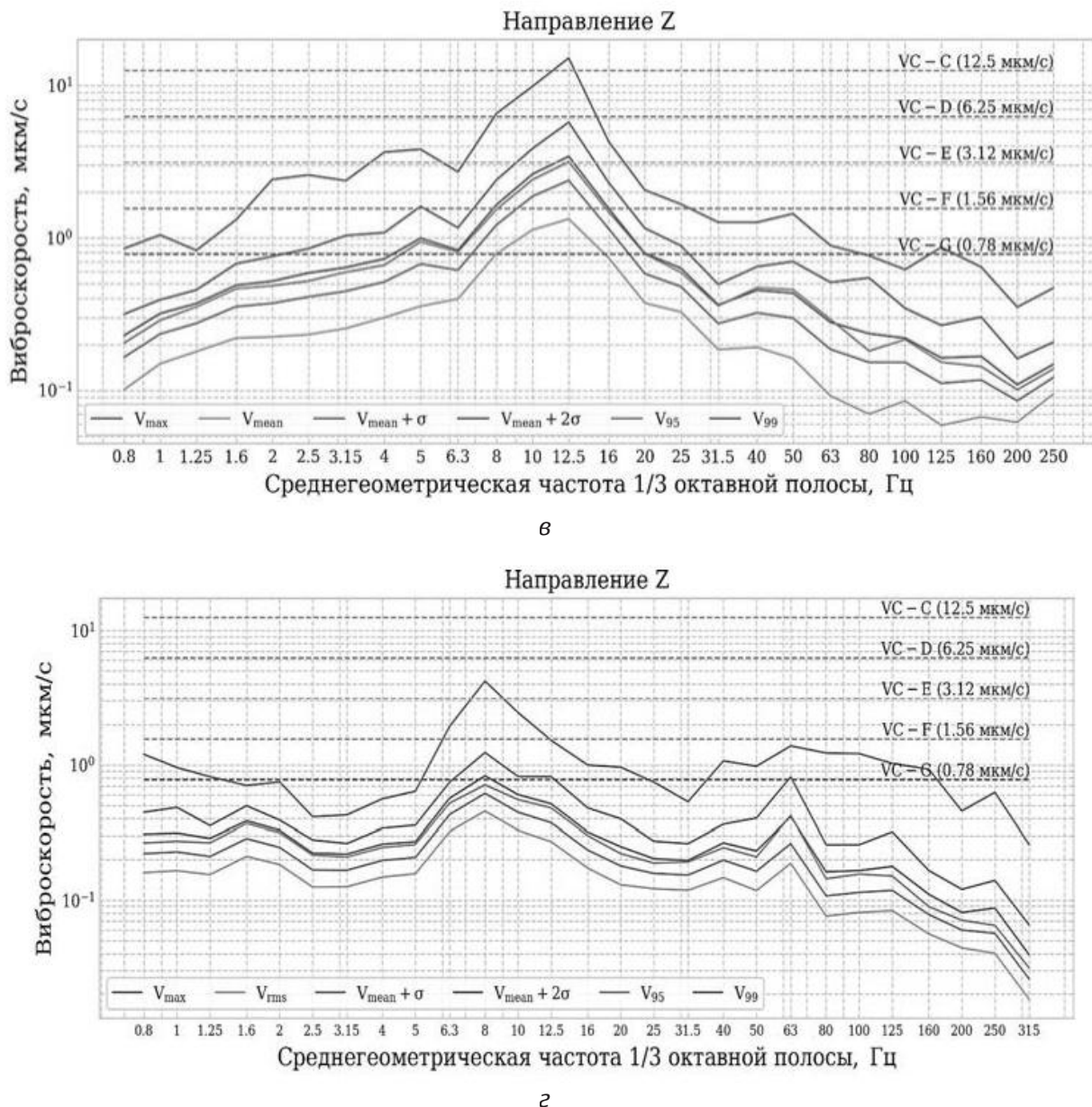


Рис. 6 (окончание). Результаты измерений в точке:
 а — на фундаменте; б — на конструкциях здания

На стадии устройства подземной части средние значения виброскоростей колебаний в зоне 10...12,5 Гц оставались порядка 1,1...1,3 мкм/с, т. е. находились ниже VC-E, но еще не формировали устойчивого запаса для наиболее жестких зон. При этом V_{95} и V_{99} в этих же полосах доходили примерно до 3,9...5,7 мкм/с, а $V_{\max}$ — до порядка 15 мкм/с на 12,5 Гц. Иными словами, конструктивная система уже начала работать в более организованной динамической схеме, но прослеживалось влияние незавершенного контура, особенно в моменты случайных строительных событий на площадке (бурение, сверление, падение).

После возведения вертикальных и горизонтальных конструкций подвала, картина улучшилась: для вертикальной компоненты средний уровень виброс-

коростей в полосах 10...16 Гц снизился примерно до 0,92...1,02 мкм/с, что уже лежит ниже VC-F; V_{95} в этих полосах находился ориентировочно на уровне 2,0...2,2 мкм/с, то есть между VC-F и VC-E; $V_{\max}$ уменьшился до порядка 6...7 мкм/с, тяготея к области VC-D. По данным измерениям можно отметить «начало» совместной работы конструкций подземной части, а также повышение эффективности системы виброизоляции по стене в грунте.

На стадии возведения надземной части здания средние уровни продолжали снижаться. Они составляли порядка 0,46 мкм/с на 8 Гц, 0,33 мкм/с на 10 Гц и 0,27 мкм/с на 12,5 Гц уверенно ниже VC-F, а центильные оценки V_{95} остаются ниже или около границы VC-G/VC-F, за исключением узкой зоны около 10 Гц. При этом максимумы все еще достигают нескольких микрометров в секунду, что естественно для строящегося объекта, но уже не меняет основной тенденции: завершение надземной части приводит к логичному повышению массы сооружения, а развитие пространственной системы сопровождается дальнейшим выравниванием и снижением энергетически значимого отклика.

При запуске инженерного оборудования вибрация в контролируемой точке не увеличился до уровней, несовместимых с целевыми требованиями. При инженерном запуске, V_{rms} в вертикальном направлении в полосах 8...12,5 Гц составляет примерно 0,65...0,76 мкм/с, то есть остается ниже VC-F, а $V_{\max}$ находится в диапазоне порядка 1,8...2,4 мкм/с, близком к VC-E, но ниже VC-D. Таким образом, был подтвержден принятый подход локальной изоляции оборудования: инженерные системы не стали доминирующим фактором, хотя отдельные полосы по максимумам потребовали и продолжают требовать внимания при балансировке, подвеске и развязке коммуникаций.

Итоговые измерения в целевых помещениях показывают достижение проектной дифференциации по классам. В зоне VC-F на -1 этаже средние и энергетически усредненные уровни по направлениям X, Y и Z находятся ниже ординат VC-F, а по ряду полос — и ниже VC-G; эпизодические максимумы выше средних, но не отменяют выполнения критерия для типового режима. В зоне VC-E/F на 1 этаже измерения также показывают выполнение уровня не хуже VC-F при средних значениях и приемлемое поведение в горизонтальных направлениях. В зоне VC-C на 2 этаже выполнение критерия обеспечено с заметным запасом по средним уровням; при этом в одной из горизонтальных компонент на очень низких частотах наблюдается повышенный максимум, что следует трактовать как эпизодическое событие, а не как характеристику фоновой эксплуатационной среды.

Таким образом, по измеренным значениям можно проследить последовательный переход от стадии высокой строительной возмущенности и частотно-локализованных максимумов к тихой эксплуатационной среде, в которой целевые помещения соответствуют заявленным классам VC. При этом наиболее показательным является не «среднее снижение в децибелах» как абстрактная величина, а изменение физики отклика по мере формирования объекта: от открытого котлована и незамкнутой плиты к жесткой простран-

ственной несущей системе здания и далее — к зданию с виброактивными внутренними источниками.

Обсуждение. Полученные результаты подтверждают, что для зданий с помещениями классов VC-F, VC-E/F и VC-C вибрационная защита должна рассматриваться не как отдельное локальное мероприятие, а как иерархически организованная система, включающая защиту по пути распространения, формирование требуемых динамических свойств несущей и фундаментной систем, а также локальную изоляцию внутренних источников.

С инженерной точки зрения определяющим для рассматриваемого объекта является низкочастотный диапазон, в котором длины волн в грунте и сооружении сопоставимы с характерными размерами подземной части, а реакция системы формируется уже не локальным элементом, а пространственной работой основания и несущего объема. Исследования показывают, что заглубление, плиты по грунту и подземное размещение могут заметно изменять вибрационную среду по сравнению со свободным полем, однако этот эффект определяется не одной лишь массой или толщиной плиты, а сочетанием глубины, контактных условий, жесткости и геометрии всей подземной системы.

Отсюда вытекает и следующая принципиальная позиция: в задачах уровня VC-F и строже виброизоляция по пути распространения не должна пониматься упрощенно, как «добавление демпфирующего слоя». Эффективность таких решений определяется тем, насколько они меняют условия ввода энергии в подземную часть, перераспределяют деформации и ограничивают возбуждение конструкций в чувствительных полосах частот. В мировой практике [2, 10, 11] путь распространения рассматривается совместно с выбором площадки, заглублением, конфигурацией подземной части, расположением чувствительных помещений и допустимой трассировкой инженерных сетей.

Не менее значимым является вклад внутренних механических и аэродинамических источников. Исследования [1, 3, 8] показывают, что даже при хорошем внешнем фоне локальные превышения критерия могут формироваться удаленными вентиляционными элементами, воздуховодами, трубопроводами, заслонками и иными связанными с инженерией компонентами; при этом источник может располагаться на значительном расстоянии от чувствительного помещения, а передача осуществляться по жестким или слабо развязанным коммуникационным путям. Для чувствительных лабораторий дополнительно критичны низкочастотный шум и инфразвуковые пульсации систем вентиляции, которые способны возбуждать как сам прибор, так и его внутренние или внешние системы изоляции. Поэтому инженерное оборудование в таких объектах следует рассматривать не как вторичный фактор, а как равноправную часть общей вибрационной постановки. В практическом выражении это требует обязательной виброизоляции машин, развязки труб и воздуховодов, исключения жестких коротких шунтирующих связей и проверки не только конструктивной, но и эксплуатационной конфигурации инженерных систем.

Существенное значение имеет и методология интерпретации измерений. Для вибросочувствительных объектов принципиально недостаточно ограничиваться разовыми кратковременными замерами или единичным пиковым показателем. В современной практике данные представляют в виде 1/3-октавных спектров среднеквадратической виброскорости, а для нестационарных сред используют энергетически усредненные и центильные характеристики, позволяющие различать стандартную фоновую вибрацию, статистически устойчивый повышенный фон и эпизодические возмущения. Публикации по данной теме подчеркивают, что корректная оценка требует, как минимум предпроектного обследования, длительной регистрации, привязки к стадиям реализации и повторной проверки после ввода инженерии. Для рассматриваемого объекта это положение реализовано последовательно: мониторинг охватывал грунт, котлован, плитные и ограждающие элементы, подземную и надземную части, запуск инженерных систем и итоговые помещения.

В этом смысле проектная логика объекта МГТУ им. Н.Э. Баумана хорошо согласуется с международной тенденцией [1, 6, 9] последних двух десятилетий: процесс проектирования и строительства комплекса рассматривается как итерационный расчетно-экспериментальный процесс, а не как одноразовая проверка по нормативной кривой. Вначале формируется целевой набор критериев для помещений, далее выполняется комплекс натурных измерений, затем разрабатывается конструктивная и инженерная концепция, после чего следуют стадийные измерения, уточнение модели и окончательная эксплуатационная верификация. Такой цикл особенно важен для университетских корпусов, где в одном здании сосуществуют помещения с разной чувствительностью, а функциональное наполнение может меняться в течение жизненного цикла объекта. Именно по этой причине для подобных зданий целесообразно проектировать не «минимально допустимую» среду под текущий набор приборов, а управляемый динамический ресурс здания, сохраняющий возможность последующего размещения более чувствительных стендов и установок

Заключение. Проведенное исследование показало, что создание вибростабильных оснований для экспериментальных стендов в условиях плотной городской застройки должно рассматриваться как задача системного управления передачей вибрации на всех уровнях — от грунтового массива и подземной части здания до локальной изоляции внутренних инженерных источников. Для объекта МГТУ им. Н.Э. Баумана расчетно-экспериментально подтверждено, что требуемое качество вибрационной среды достигается не отдельным техническим приемом, а многокаскадной схемой виброизоляции, включающей отсечение внешнего воздействия по пути распространения, повышение изгибной и пространственной жесткости подземной части, а также виброизоляцию инженерного оборудования, плавающие полы и упругое подвешивание коммуникаций.

Натурный вибрационный мониторинг, охвативший стадии от открытой площадки и котлована до запуска инженерных систем и итоговых измерений в целевых помещениях, показал, что определяющее значение для таких объ-

ектов имеет низкочастотная область, где эффективность решений зависит прежде всего от совместной работы фундаментной плиты, вертикальных элементов и перекрытия подземной части. Полученные данные свидетельствуют, что по мере формирования пространственной жесткой подземной системы и последующей настройки внутренних источников вибрации происходит последовательный переход от строительной, нестационарной вибрационной среды к эксплуатационной обстановке, соответствующей заданным классам вибрационной чувствительности в помещениях размещения высокоточного оборудования.

Практическая значимость работы состоит в том, что она подтверждает применимость для российских университетских и исследовательских объектов той методологии, которая в мировой практике используется при проектировании высокоточных производств: объектно-ориентированное обследование площадки, стадийный мониторинг, расчетная модель с последующей актуализацией по натурным данным и финальная верификация в целевых помещениях. Научная ценность исследования заключается не в предложении изолированного частного решения, а в демонстрации воспроизводимого инженерного подхода, при котором проектирование вибростабильных оснований становится итерационным расчетно-экспериментальным процессом с обратной связью между прогнозом, строительной реализацией и фактическим вибрационным состоянием объекта.

Представленный подход может быть непосредственно использован при проектировании лабораторных корпусов, стендовых зданий, метрологических центров и иных объектов с высокочувствительным оборудованием при соблюдении трех обязательных условий: ранней постановки целевых вибрационных критериев для помещений, длительного стадийного мониторинга в процессе строительства и обязательной увязки конструктивных и инженерных решений с результатами натурных измерений. В этом состоит основной инженерный итог работы: вибростабильность подобных объектов должна проектироваться как свойство всей системы здания, а не как локальная характеристика отдельного помещения или отдельного прибора.

Список источников

- [1] Amick H., Gendreau M., Busch T., Gordon C. Evolving criteria for research facilities: vibration. Proceedings of SPIE Conference 5933: Buildings for Nanoscale Research and Beyond, San Diego, CA, 2005.
- [2] Смирнов В.А. Особенности проектирования высокоточных производств в условиях сложившейся городской застройки. *ACADEMIA. Архитектура и строительство*, 2024, № 4, с. 145–153. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2024-4-145-153>
- [3] Смирнов В.А. Сравнительная оценка требований, предъявляемых к помещениям размещения высокоточных производств. *Жилищное строительство*, 2024, № 10, с. 61–66. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-10-61-66>

- [4] Smirnov V. Numerical Estimation of Precision Equipment Vibration Isolation System. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 176, pp. 363–370.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.333>
- [5] Mondrus V.L., Smirnov V.A. Optical tables vibration isolation during precision measurements. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 111, pp. 561–568.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.043>
- [6] Ungar E.E., Amick H., Zapfe J.A. Vibration Considerations for Sensitive Research and Production Facilities. Chapter 13 in *Structural Dynamics of Electronic and Photonic Systems*. Wiley, 2011. <https://doi.org/10.1002/9780470950012.ch13>
- [7] Amick H., Gendreau M., Xiong B., Simos N. Effects of frequency and depth on attenuation of ambient ground vibration. *Proceedings Noise-Con*, Baltimore, Maryland, 2010.
- [8] Lank S., Gendreau M. Control of infrasonic noise from mechanical ventilation systems in sensitive imaging laboratories. URL: <https://colingordon.com/research/control-of-infrasonic-noise-from-mechanical-ventilation-systems-in-sensitive-imaging-laboratories/> (accessed 15.04.2026).
- [9] Xiong B., Sokol M. Case Study – Vibration Source Investigation in Large Semiconductor Fab Facility. *Proceedings NOISE-CON 2019*, San Diego, CA, 2019.
- [10] Lank S., Amick H. Simplified Parametric Modeling to Predict Vibration Attenuation Provided by On-Grade Slabs. *Inter Noise*, Washington, DC, 2021.
- [11] Montgomery J., Clare D., Amick H., Haswell P., DiBattista J., Medhekar M. Use of vibration criteria in the selection of building systems for nanoscale research facilities. *Proceedings of SPIE Conference 5933: Buildings for Nanoscale Research and Beyond*, San Diego, CA, 2005.