

УДК 624.131.542

Рубан Н.Н., н.с., Солодянкин А.В., д.т.н., проф.,  
*Государственное ВУЗ "Национальный горный университет", г. Днепропетровск,  
Украина*

## **ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАЩИТНОГО ЭКРАНА ДЛЯ ОХРАНЫ СООРУЖЕНИЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ**

Обеспечение надежной и безопасной эксплуатации различных зданий и сооружений всегда имело первоочередное значение. В последнее время при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов все большее внимание уделяется вопросам их технической защиты от динамических воздействий.

Динамическим (в частности, вибрационным) нагрузкам подвержены практически все упругие тела – здания и сооружения, мосты, основания и фундаменты объектов, грунтовые массивы, которые передают механические волны на значительные расстояния. Динамические воздействия возникают в результате колебаний технологического оборудования, железнодорожного транспорта, общественного транспорта городов (в первую очередь – рельсового), строительных машин и механизмов (трамбовки, оборудование для забивки свай, шпунтов), от взрывных работ, строительства и эксплуатации объектов подземного транспорта и т.п.

От механических колебаний (вибраций) снижаются прочность, устойчивость и долговечность объектов и конструкций, ухудшаются санитарно-гигиенические условия пребывания людей внутри зданий, нарушается режим работы приборов и автоматических систем, контролирующих технологические процессы промышленных производств.

Вибрация может вызывать сильные уплотнения и нарушения структуры грунтов, что в свою очередь приводит к изменению водопроводности и влажности пород, их теплового и водного режима. В результате снижается сопротивление всего массива внешним воздействиям, что может стать причиной возникновения или активизации процессов, способных изменить форму дневной поверхности, а также снизить несущую способность грунтов оснований зданий и сооружений, построенных в пределах зоны влияния динамических воздействий [1].

Для повышения безопасности жизнедеятельности человека и защиты объектов от воздействия динамических нагрузок применяют ряд способов и технологий, которые можно разделить на следующие группы.

1. Конструктивная защита фундаментов и элементов зданий и сооружений от действия динамических (вибрационных) воздействий.

2. Расположение объектов за границей зоны опасного влияния динамических воздействий.

3. Применение защитных барьеров (экранов) между источником динамических нагрузок и охраняемым объектом.

**Целью** исследования является обоснование параметров охранной конструкции существующего сооружения, подверженного воздействию вибродинамических нагрузок, с точки зрения эффективности его работы в качестве защитного экрана.

Решение различных инженерных задач с учетом большого количества влияющих факторов аналитическими способами весьма сложно, а иногда и невозможно. На современном этапе комплексное расчетное обоснование проектов строительства, эксплуатации и реконструкции объектов разного назначения в сложных инженерно-геологических условиях, стало возможным с использованием современных программных комплексов, основанных на различных численных методах.

Для выполнения численных исследований использовался программный продукт FLAC 2D, использующий в расчетах метод конечных разностей.

Динамический анализ выполнен на примере здания, сооруженного на просадочных грунтах, подверженного воздействию динамическим нагрузкам от движущегося транспорта (рис. 1).

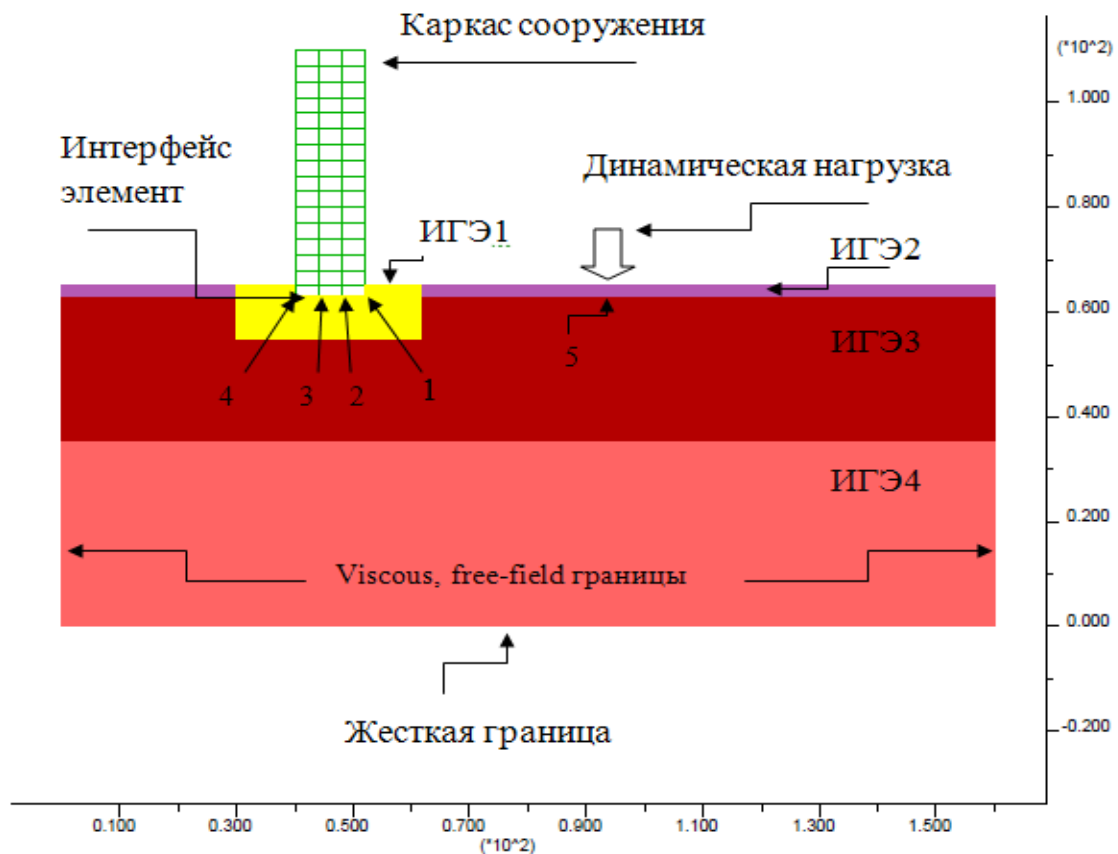


Рис. 1. Расчетная схема к решению задачи о воздействии динамической нагрузки на здание

При моделировании системы «сооружение-обводненный лессовый массив» в зоне действия динамических нагрузок использовалась простая

модель, состоящая из нескольких горизонтальных слоев просадочного грунта, которые подстилает мощный слой скальных пород. Физико-механические свойства грунтов принимались типичными для условий г. Днепропетровска по данным ДнепроГИИТИЗ (табл. 1). Дополнительно в основание сооружения был введен слой уплотненного грунта, что подразумевает устранение просадочных свойств перед началом строительства.

Таблица 1

Физико-механические свойства грунтового массива

№ ИГЭ	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль деформации, Е, Па	Коэффициент Пуассона, $\nu$	Сцепление, с, Па	Угол внутреннего трения, $\varphi$ , град	Толщина слоя, м
ИГЭ1	2000	$35 \cdot 10^6$	0,3	$18 \cdot 10^4$	35	10
ИГЭ2	1800	$20 \cdot 10^6$	0,3	$5 \cdot 10^3$	16	2
ИГЭ3	1770,0	$20 \cdot 10^6$	0,3	$5 \cdot 10^3$	26	28
ИГЭ4	3100,0	$42 \cdot 10^9$	0,1	-	-	35

Учитывая случаи негативного воздействия динамической нагрузки от транспорта на высотные здания, расположенные в непосредственной близости от источников, в расчетную схему (см. рис. 1) включены следующие элементы.

1. Источник динамической нагрузки – трамвай, железнодорожный состав. Существует несколько способов задания динамической нагрузки в программе FLAC 2D: с помощью изменения напряжения, силы, скорости или ускорения, приложенных к точке или площадке.

Согласно [2] наибольшее влияние на уровень вибрации от движущегося транспорта будут иметь нагрузка на ось вагона и скорость движения транспорта. Есть также и много других факторов, но они имеют локальные значения и варьируются в зависимости от места исследований.

В данном исследовании рассматривается упрощенная схема задания динамической нагрузки [2], генерирующей волны напряжений в грунте. Гармоническими колебаниями нагрузка на ось вагона передается на рельс, шпалы и затем в грунт.

Для рельсового транспорта нагрузка на ось вагона может варьироваться в значительных пределах от нескольких тонн для трамвая и нескольких десятков тонн для грузового состава. В настоящих исследованиях принята нагрузка на ось поезда 240 кН, которая равномерно распределена по ширине шпалы 3 м (в рассматриваемом случае нагрузка прикладывается к точкам сетки (0,5 x 0,5 м) и соответственно нагрузка будет составлять 34 кН на точку).

Динамический коэффициент, согласно исследованиям [3-5] будет зависеть от скорости движения поезда, и согласно рис. 2 [6], для движения железнодорожного транспорта в городских условиях будет составлять 1,0.

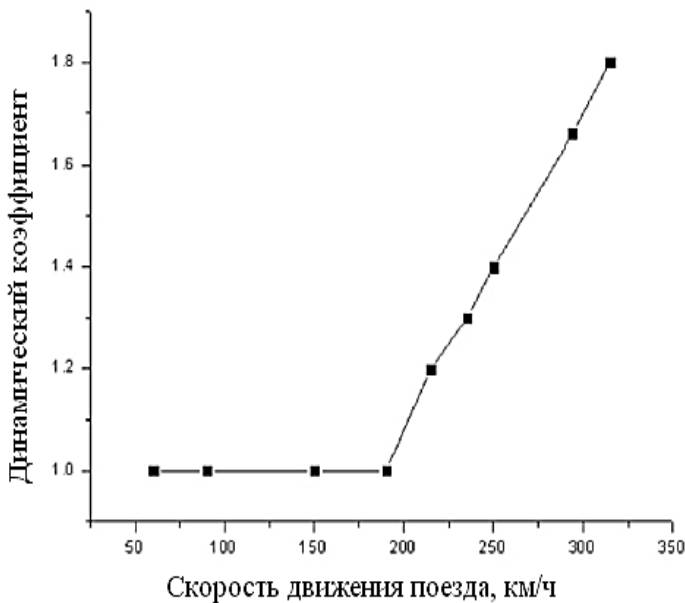


Рис. 2. Динамический коэффициент амплитуды силы в зависимости от скорости движения поезда

2. Объект динамических воздействий – 15-этажное здание на плитном фундаменте. Расчет на динамические воздействия выполнялся с учетом сил инерции.

3. Основание фундамента здания. С учетом того, что строительство на лессовых грунтах выполняют, предварительно устранив их просадочные свойства, расчетная схема включает уплотненное основание сооружения (ИГЭ1, см. рис. 1), мощность которого принята равной глубине сжимаемой толщи. Взаимодействие основания и сооружения было реализовано с помощью

доступного в ПК FLAC интерфейс элемента, позволяющего ввести дополнительные параметры – коэффициенты жесткости основания, и критерий прочности Мора-Кулона для предотвращения сдвига по подошве фундамента.

4. Среда распространения колебаний от динамической нагрузки рассматривается как грунтовый массив, сложенный лессовидными суглинками (ИГЭ2, ИГЭ3), которые подстилают скальные породы (ИГЭ4).

Результаты численного моделирования при статических расчетах и после приложения динамической нагрузки показывают, что поведение системы «сооружение-грунтовый массив» меняется кардинальным образом – проявляются неравномерные деформации, горизонтальные смещения, образуется крен (рис. 3 и 4).

Это требует при проектировании и строительстве объектов строгого соблюдения безопасных расстояний до транспортных линий. Для охраны уже существующих зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки, необходима разработка различных способов охраны, например, защитных экранов.

Защитные экраны представляют незаполненные траншеи, либо траншеи, заполненные материалом с различными свойствами, эффективность которых зависит от конкретных условий применения.

Для того, чтобы исключить деформации сооружения при проведении инженерно-строительных работ по возведению защитного экрана, расстояние от защитного экрана к охраняемому объекту  $L$  принято 10 м. Это расстояние находится вне зоны деформаций от собственного веса сооружения а также позволяет размещать необходимое технологическое оборудование для возведения охранной конструкции. Ширина барьера принята  $b=0,5$  м.

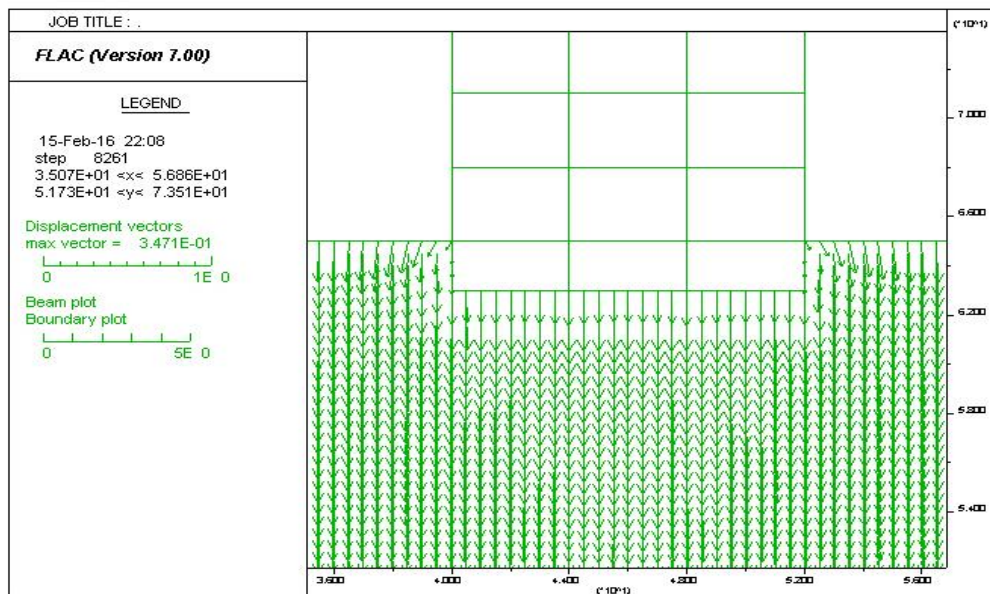


Рис. 3. Направление вектора перемещений от собственного веса здания

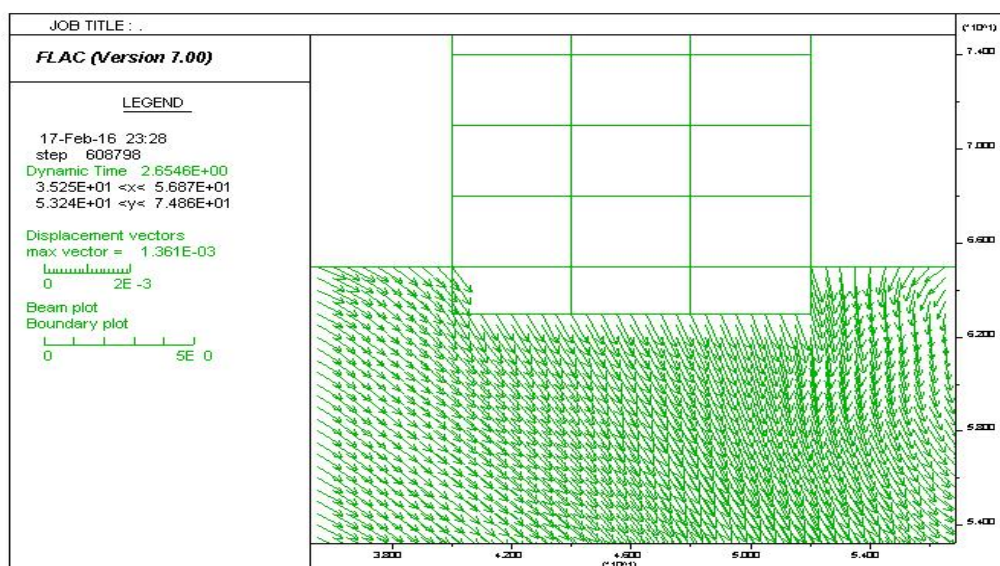


Рис. 4. Направление вектора перемещений при динамической нагрузке

Исследуемыми параметрами защитного экрана были приняты модуль деформации  $E$ , глубина экрана  $H$  (рис. 5). В качестве заполнителей для защитного экрана были рассмотрены материалы с модулем деформации от 5 до 50 тыс. МПа (табл. 2).

Защитный экран, в зависимости от используемого материала, может поглощать энергию сейсмических волн в грунте или отражать, изменяя их направление, создавая безопасную зону для охраняемого сооружения (рис. 6).

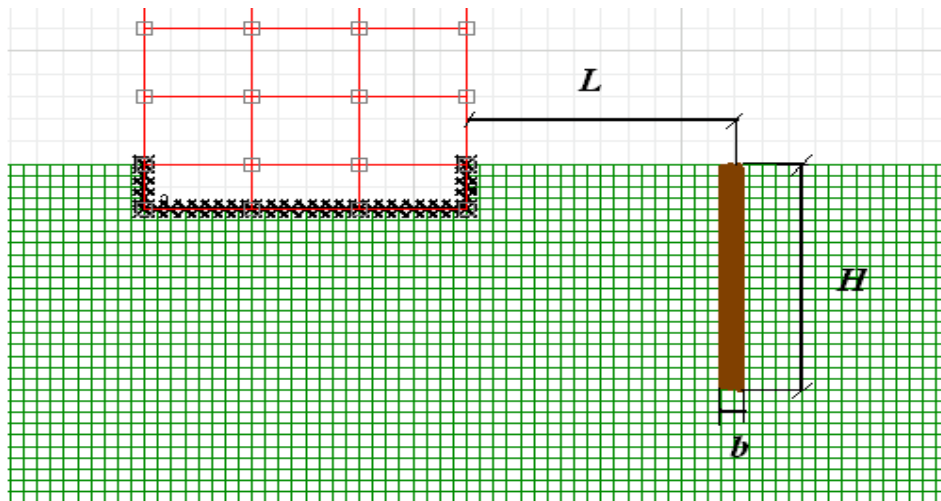


Рис. 5. Расчетная схема к обоснованию параметров защитного экрана

Таблица 2

Физико-механические характеристики защитного экрана

Материал	Модуль деформации $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона, $\nu$	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Резиновая крошка	5	0,49	460
Керамзит	7000	0,4	350
Грунтоцементный раствор 1	15000	0,35	1800
Грунтоцементный раствор 2	25000	0,3	2000
Бетонная смесь	50000	0,2	2400

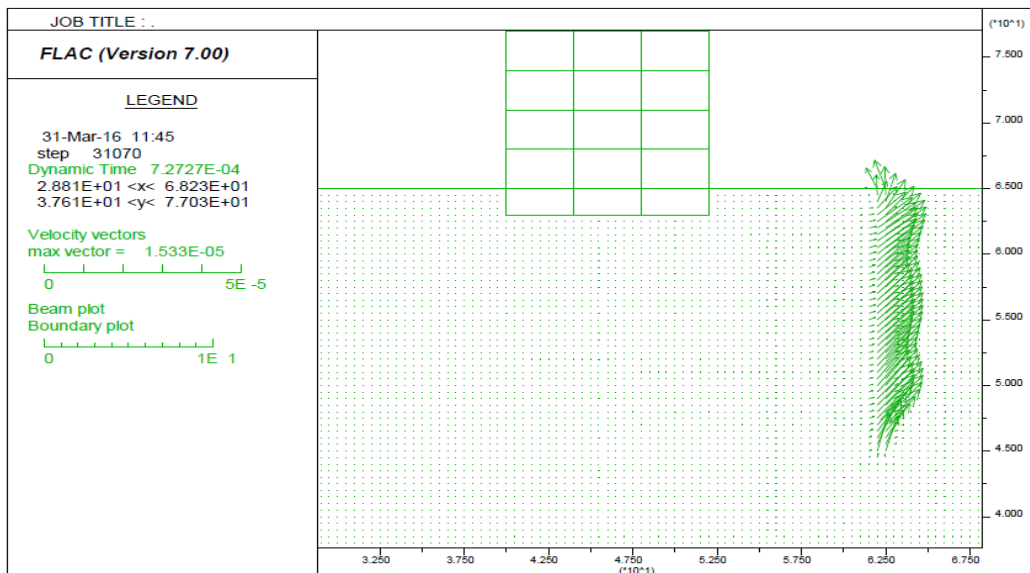


Рис. 6. Направление вектора скорости частиц грунта при взаимодействии с защитным экраном

Результаты исследований для различных параметров защитного экрана приведены на рис. 7-9. Оценка эффективности проводилась по величине

максимальных деформаций, крену, значениям виброускорений в основании сооружения.

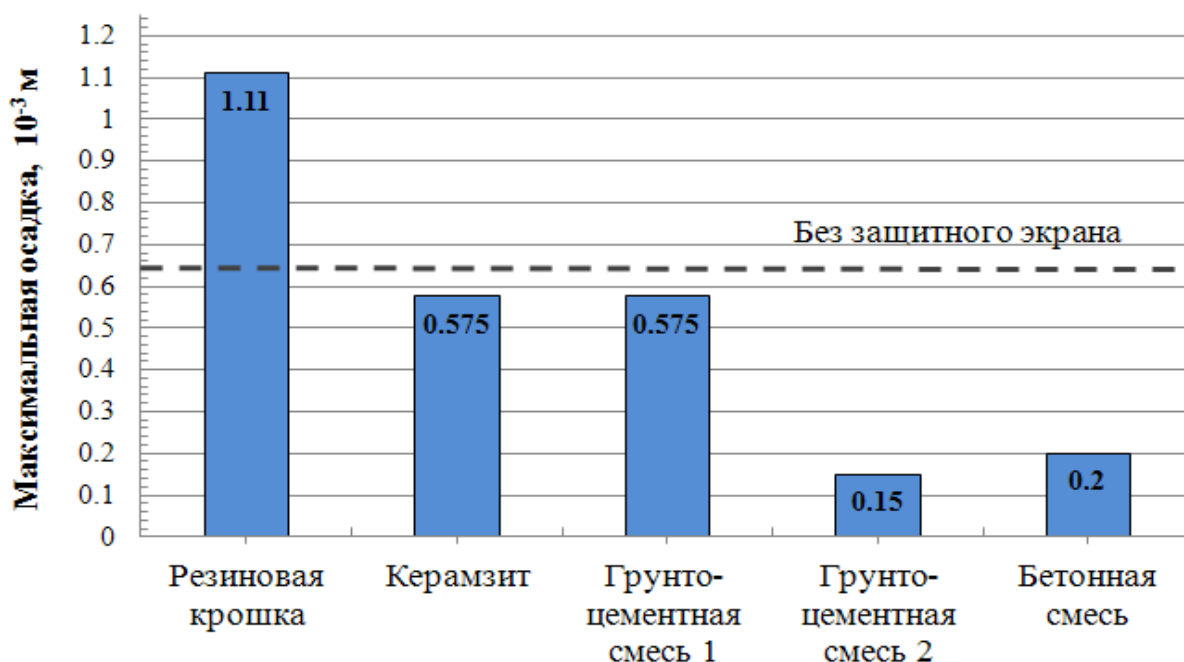


Рис. 7. Изменение максимальных деформаций для различных материалов защитного экрана

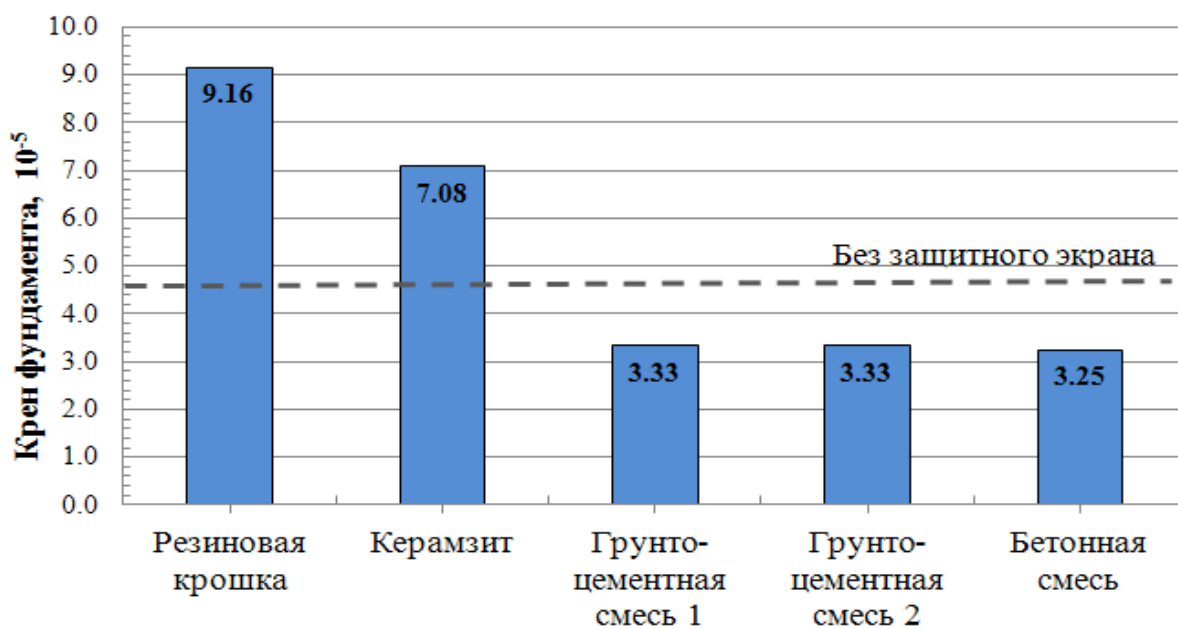


Рис. 8. Изменение величины крена фундамента для различных материалов защитного экрана

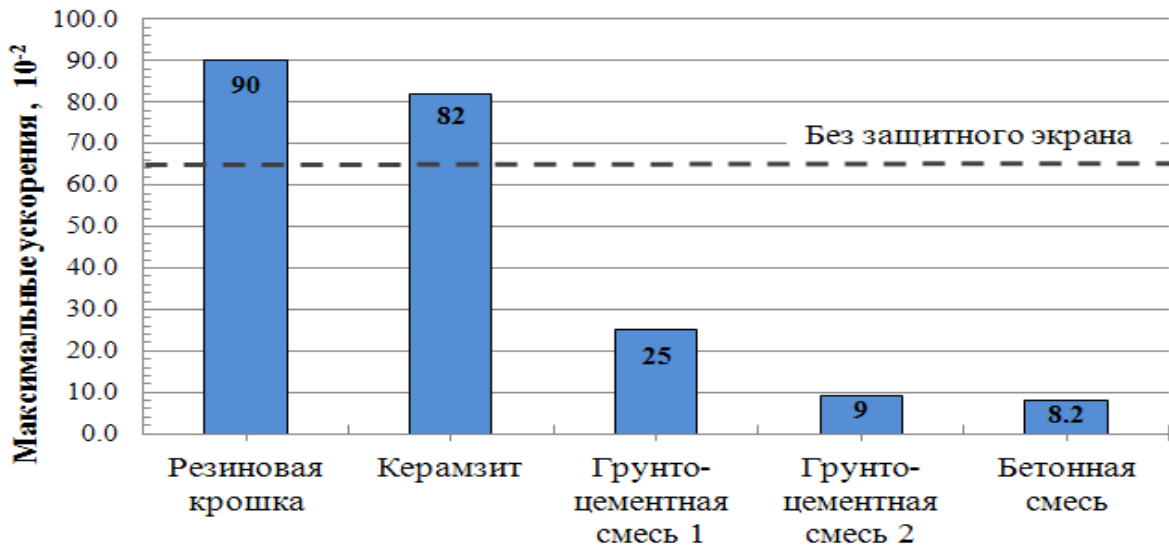


Рис. 9. Изменение величины максимального виброускорения в основании сооружения для различных материалов защитного экрана

Результаты расчета наиболее эффективной глубины защитного экрана показаны на рис. 10 и 11.

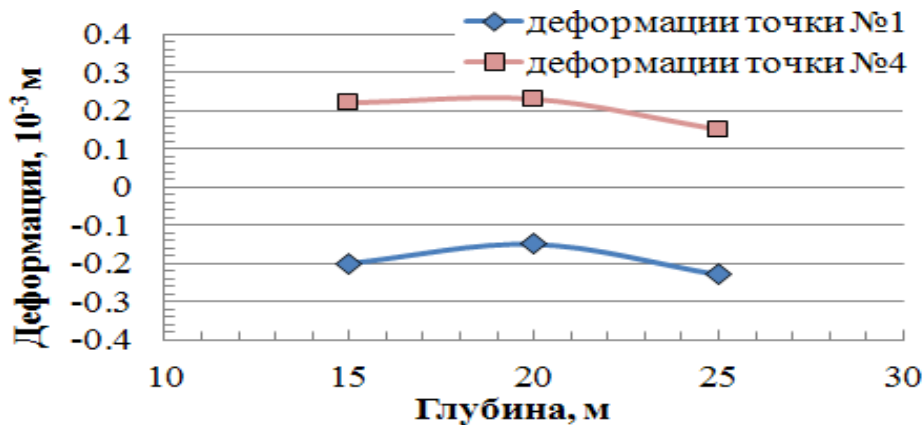


Рис. 10. Максимальные деформации сооружения при различной глубине защитного экрана



Рис. 11. Крен сооружения при различной глубине защитного экрана



Анализ результатов исследований показывает, что наиболее эффективным материалом для защиты здания от динамических воздействий является грунтоцементная смесь с модулем деформации  $E \geq 15000$  МПа.

Согласно рис. 10 и 11 оптимальная глубина защитного экрана – 20 м.

**Выводы.** Численные исследования показали, что применение в качестве защитного экрана таких низко модульных материалов, как резиновая крошка или керамзит не приводит к улучшению НДС основания сооружения, а наоборот, в связи с их деформативными свойствами приводит к увеличению деформаций. Соответственно их использование для защиты зданий и сооружений от динамических воздействий в просадочных лессовидных грунтах не рекомендуется.

Для просадочных лессовидных суглинков наиболее эффективным при динамических воздействиях является защитный экран с модулем деформации не менее 15 000 МПа, а необходимыми механическими свойствами могут обладать грунтоцементные смеси различных составов.

Для просадочных лессовидных суглинков наиболее эффективным при динамических воздействиях является защитный экран глубиной не менее 15 м.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кріль Т.В. Вібраційний вплив на геологічне середовище міст / Т.В. Кріль // Геологічний журнал. – 2008. – №2. – С. 91-99.
2. Nejati H.R., Ahmadi M., Hashemolhosseini H. Numerical analysis of ground surface vibration induced by underground train movement / H.R. Nejati, M. Ahmadi, H. Hashemolhosseini // Tunnelling and Underground Space Technology 29. – 2012. – P. 1-9.
3. Majka M., Hartnett M. Effects of speed, load and damping on the dynamic response of railway bridges and vehicles/ M. Majka, M. Hartnett // Computers & Structures 86. – 2008. – P. 556-572.
4. Gullers P., Andersson L., Lunden R. High –frequency vertical wheel-rail contact forces – field measurements and influence of track irregularities / P. Gullers, L. Andersson, R. Lunden // Wear 265. – 2008. – P. 1472-1478.
5. Lombaert G. The experimental validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibration / G. Lombaert, G. Degrande, J. Kogut, S. Francois // *Journal of Sound and Vibration* 297. – 2006. – P. 512-535.
6. Bratov V. Modelling the high-speed train induced dynamic response of railway embankment / V. Bratov, Y. Petrov, B. Semenov, I. Darienko // *Material Physics and Mechanics* 22. – 2015. – P. 69-77.