

# ОЦЕНКА РИСКА СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОСНОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ОЛИМПИЙСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В Г. СОЧИ

О.Р. ОЗМИДОВ

ГРУНТОВАЯ ЛАБОРАТОРИЯ  
ООО «МостДорГеоТрест»

В статье предложена комплексная методика оценки динамической устойчивости грунтов в условиях сейсмического возбуждения. Новизна предлагаемой методики заключается в применении спектрального анализа сигнала-отклика одно-массового осциллятора «испытуемый образец-нагрузочная рама динамического стабилметра». В основу метода положен принцип расширения спектра сигнала-отклика в область низких частот вследствие выраженного демпфирующего действия грунтов, склонных к сейсмическому разжижению. В качестве практического применения приведены результаты реализации предлагаемой методики на объектах олимпийского строительства в Имеретинской низменности (г. Сочи).

**Ключевые слова:** циклические трёхосные испытания, коэффициент вибрационной потери прочности, сейсмоосциллятор, акселерограмма колебаний, демпфирование вынужденных колебаний, спектральный анализ.

## ВВЕДЕНИЕ

Эффект разжижения грунтов, проявляющийся при наличии определенных предпосылок во время землетрясений, в ряде случаев является причиной катастрофических осадок грунтовых оснований, сопровождающихся массовыми разрушениями зданий и многочисленными человеческими жертвами.

Типичным примером сейсмического разжижения грунтов является землетрясение в Ашхабаде 1948 года. В результате резкого снижения несущей способности грунтовых оснований зданий и сооружений город был практически полностью стерт с лица земли. Погибло более 80 тысяч человек.

Территория города Сочи находится в зоне 9-балльной сейсмичности по шкале Медведева-Шпонхой-

## THE ASSESSMENT OF RISK OF SEISMIC LIQUEFACTION OF A SOIL DEPOSIT AT OLYMPIC CONSTRUCTION AT SOCHI CITY

O.R. OZMIDOV

The article offers the complex method of assessment of dynamic sustainability of soil under seismic excitation. The novelty of the described method is the application of spectral analysis of signal-response of single-mass oscillator «the soil specimen – the load frame of dynamic triaxial apparatus». In the foundation of the method there is a principle of expansion of signal-response in to the low frequency area as the result of notable damping action of soils that are addicted to seismic liquefaction. As the practical example, there are the results of the application of described method on objects of the Olympic construction in the Imeretinskaya lowland (the city of Sochi).

**KEYWORDS:** cyclic triaxial test, cyclic shear stress, cyclic shear strain, cyclic shear strength, vibration loss of strength factor, seismic oscillator, vibration accelerogram, damping of forced oscillations, spectral analysis of signal-response.

ра-Карника. С учетом особенностей грунтов многие участки характеризуются 10-балльной сейсмичностью. 10-балльное землетрясение по указанной шкале квалифицируется как «уничтожающее». Такие землетрясения характеризуются трещинами в земной коре до метра шириной, оползнями и обвалами со склонов, разрушением каменных построек, искривлением железнодорожных рельсов. Многочисленные тектонические разломы, выявленные в этом регионе, наличие крутых склонов, их избыточная обводненность способствуют проявлению масштабных оползней. В зоне морской абразии велика вероятность обвалов, сопряженных с разрушениями портовых сооружений. В Кавказском сейсмическом поясе за последние 100 лет произошло восемь землетрясений силой более 7 бал-

лов. Землетрясение в Спитаке, расположенном в этом регионе, потрясло весь мир. Тысячи людей оказались в один миг погребенными под обломками собственных домов. В 2000 году в г. Сочи произошло два землетрясения силой 3–4 балла. Эти факты указывают на необходимость исследования потенциала сейсмической разжижаемости грунтов, которые будут служить основанием для проектируемых олимпийских объектов.

В испытательной лаборатории «МостДорГеоТрест» контроль сейсмической разжижаемости грунтов проводится на стабилометрических установках GIESA UP 25 (Германия) в циклическом и вибрационно-кинематическом режимах. В процессе выполнения исследований по методу вибрационных трехосных сжатий выполняется спектральный анализ сигнала-отклика одномассового осциллятора «устройство нагружения – испытуемый образец» по каналу «акселерометр – АЦП – сигнальный процессор» с использованием программного средства «SPECTRO-S».

Целью работы является экспериментальная оценка возможности разжижения грунтов основания проектируемых инженерных сооружений способом циклических трехосных сжатий с использованием спектральных методов оценки сигналов-откликов.

Циклические испытания проводились в соответствии с методикой, рекомендованной мировым сообществом геотехников (Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soil. Solt Lake Sity, Jan, 5 – 6, 1996.) согласно ASTM D5311-96. Параметры прогнозируемого землетрясения были приняты в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ: интенсивность сейсмического воздействия  $I = 9$  баллов по шкале MSK-64, максимальное горизонтальное ускорение  $A_{max} = 0,33g$ .

Основные практические задачи данного исследования:

1. Выявление потенциально разжижаемых грунтов при заданных параметрах ожидаемых циклических воздействий на территории проектируемого строительства.
2. Локализация разжижаемых грунтов на площади и в разрезе исследуемых грунтовых толщ.
3. Выдача рекомендаций по снижению потенциала сейсмического разжижения грунтов основания проектируемого объекта.

## ПРИРОДА СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗЖИЖАЕМОСТИ ГРУНТОВ

В процессе динамического (циклического) воздействия в грунте накапливаются сдвиговые деформации и снижаются прочностные характеристики. Переупаковка частиц грунта в процессе циклического воздействия приводит к разрушению структурных связей и передаче внешнего давления на внутриспоровый флюид. В результате растет поровое, снижаются эффективные напряжения. При достижении поровым

давлением величины внешнего (обжимающего) давления элемент грунта переходит во взвешенное состояние. Коагуляционная структурная сетка разрушается, сопротивление грунта сдвигу резко снижается. Грунт разжижается и лишается способности нести внешнюю нагрузку.

В тот момент когда грунт переходит во взвешенное состояние, зерна грунта стремятся занять положение, соответствующее наиболее плотной тетраэдрической упаковке. При этом сокращается объем пор, что неизбежно приводит к возникновению напора поровой воды. Выдавливание поровой воды за пределы элемента грунтового массива, испытывающего разжижение, влечет за собой повышение порового давления в соседних элементах, которые разжижаясь инициируют в свою очередь разжижение последующих элементов. Таким образом, явление приобретает лавинный характер.

## ЦИКЛИЧЕСКИЕ ТРЕХОСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Методика определения параметров сейсмической разжижаемости грунтов разработана американскими естествоиспытателями Сидом и Идрисом в 1971 г. (Seed, 1971). Этот метод с незначительными усовершенствованиями (Idriss, 2004) используется в настоящие дни в большинстве геотехнических лабораторий. Испытанию образцов циклическими нагрузками предшествуют этапы подготовки образцов, их водонасыщения и анизотропной консолидации.

Сущность метода эквивалентных колебаний заключается в нагружении предварительно консолидированного образца циклическими нагрузками, величина которых рассчитывается для заданной магнитуды  $M$  по формуле Сиды и Идриса:

$$\tau_a = 0,65 \sigma_1 \frac{a_{max} r_d}{g}$$

где  $\tau_a$  – циклическое напряжение сдвига для магнитуды  $M$ ;  $\sigma_1$  – вертикальное (осевое) напряжение, которое рассчитывается с учетом взвешивающего эффекта грунтовых вод;  $a_{max}$  – максимальное горизонтальное ускорение в поверхностных слоях грунтов в условиях прогнозируемого землетрясения заданной магнитуды  $M$ ;  $g$  – ускорение свободного падения в гравитационном поле Земли;  $r_d$  – коэффициент редукиции (ослабления) напряжений с глубиной, учитывающий гибкость колонки грунта (поведению жесткого тела соответствует  $r_d = 1$ ).

Для глубины  $Z \leq 34$  м используется эмпирическая зависимость:

$$r_d = \text{Exp}[\alpha(z) + \beta(z)M],$$

где  $\alpha(z) = -1,012 - 1,126 \sin(0,085Z + 5,133)$ ;

$$\beta(z) = 0,106 + 0,118 \sin(0,089Z + 5,142) \text{ (Idriss, 2004)}.$$

Для заданного значения магнитуды (в эпицентре землетрясения) рассчитывается эквивалентное число циклов нагружения, соответствующее длительности

землетрясения магнитудой  $M$ . Испытания проводятся на частотах в диапазоне от 0,15 до 2 Гц в зависимости от коэффициента консолидации грунта, полученного на этапе консолидации.

Преобладающая частота сейсмического воздействия, которая используется для моделирования сейсмического воздействия в установке трехосного сжатия, вычислялась по эмпирической формуле:

$$I = 2,75(\lg A_{\max} - 0,5 \lg d),$$

где  $I$  – интенсивность сейсмического воздействия по шкале MSK-64;  $A_{\max}$  – пиковая амплитуда в галлах;  $d$  – продолжительность колебаний в секундах на уровне 0,5 от максимума.

Полученные значения  $d$  для землетрясений в 9 баллов при пиковой амплитуде ускорений 300–350 Галл свидетельствуют о том, что центральные частоты спектра прогнозируемого сейсмического возбуждения находятся в диапазоне 0,2–0,4 Гц.

Циклическое нагружение осуществлялось реверсивным низкофрикционным пневмоцилиндром, позволяющим создавать нагрузку до 5 кН. Опыт проходил в условиях диспозиции статических напряжений, заданных на этапе дренированной анизотропной консолидации образца и циклических напряжений, имитирующих сейсмическое возбуждение.

Рабочий цикл задавался управляющим компьютером и обеспечивался преобразователем циклических сигналов и блоком пневмоклапанов с сервоприводом (рис. 1).

Форма управляющего циклического сигнала задается в соответствии с ASTM D5311-92(2004).

Амплитуда задаваемого девиаторного напряжения рассчитывалась как удвоенное значение  $\tau_d$ . Во время выполнения рабочих циклов осуществлялась обратная связь через датчик силы, контроллер пневмопривода и управляющий компьютер. Основным контролирующим параметром в процессе проведения опыта является относительное поровое давление PPR, равное отношению давления  $U$ , регистрируемого датчиком порового давления, к гидростатическому давлению в камере стабилометра  $\sigma_3$ , регулируемому контроллером волюмометра (рис. 1).

В процессе выполнения опыта велся контроль относительного порового давления. Приближение PPR на последних расчетных циклах нагружения к асимптоте PPR=1 свидетельствует о возникновении условий для разжижения грунта. При этом давление внутри образца становится равным внешнему обжимающему давлению и грунт переходит во взвешенное состояние (рис. 2).

В мировой практике в качестве критерия сейсмического разжижения принимается значение PPR = 0,95 [6, 10]. В том случае, если PPR достигает единицы раньше завершения последнего расчетного цикла, можно констатировать факт сейсмической разжижаемости грунта в условиях землетрясения про-

гнозируемой магнитуды  $M$ . Процесс сейсмического разжижения грунта обычно сопровождается резким увеличением амплитуды циклической деформации грунта (рис. 3), сопряженным, как правило, с разрывом коагуляционной сетки грунта и, как следствие, разрушением его сплошности.

Используемая установка динамического трехосного сжатия позволяет измерять циклическую деформацию грунта в диапазоне 15 мм с разрешением 1 мкм. Показания датчиков порового давления и перемещения (деформации) регистрируются в электронном протоколе программы GEOLAB и представляются в графическом виде.

Непрерывное (с высокой частой дискретизации) снятие показаний с датчиков силы и гидростатического давления в камере позволяет отобразить траекторию нагружения образца в плоскости октаэдрических напряжений (рис. 4, 5):

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + 2\sigma_{33}),$$

$$q = (\sigma_{11} - \sigma_{33}),$$

где  $\sigma_{11}$  – эффективное вертикальное напряжение;  $\sigma_{33}$  – эффективное горизонтальное напряжение.

По виду траектории эффективных напряжений можно однозначно судить о потенциале разжижения грунта. В случае прогрессирующей циклической подвижности траектория эффективных напряжений приобретает вид «петли». Ширина петли пропорциональна приращению деформации в цикле. В случае затухания циклической подвижности петля выражается в отрезок линии. Пересечение траекторией эффективных напряжений оси  $X$  свидетельствует об инверсии знака касательных напряжений. В этом случае, как было указано выше, возможен лавинообразный переход испытуемого грунта в разжиженное состояние. Прохождение траектории эффективных напряжений через начало координат ( $p' = 0, q = 0$ ) отвечает моменту передачи всех полных напряжений на поровый флюид и исчезновению эффективных напряжений.

В таком состоянии грунт теряет способность противостоять сдвигу, т. е. переходит в стадию разжижения (рис. 5). Моменту разжижения грунта соответствуют смещение границы спектра вынужденных колебаний сейсмоциклатора в области низких частот.

Трансформация формы петель нагружения в плоскости октаэдрических напряжений к началу координат также позволяет сделать вывод о потенциале разжижения грунтов.

Увеличение площади петли нагружения свидетельствует о нарастании доли пластических деформаций и поглощении энергии образцом грунта. Поглощение кинетической энергии сопряжено с увеличением внутренней энергии системы «твердая фаза – поровый раствор», что неизбежно ведет к нарушению коллоидных связей внутри образца и, как следствие, снижению динамической устойчивости.

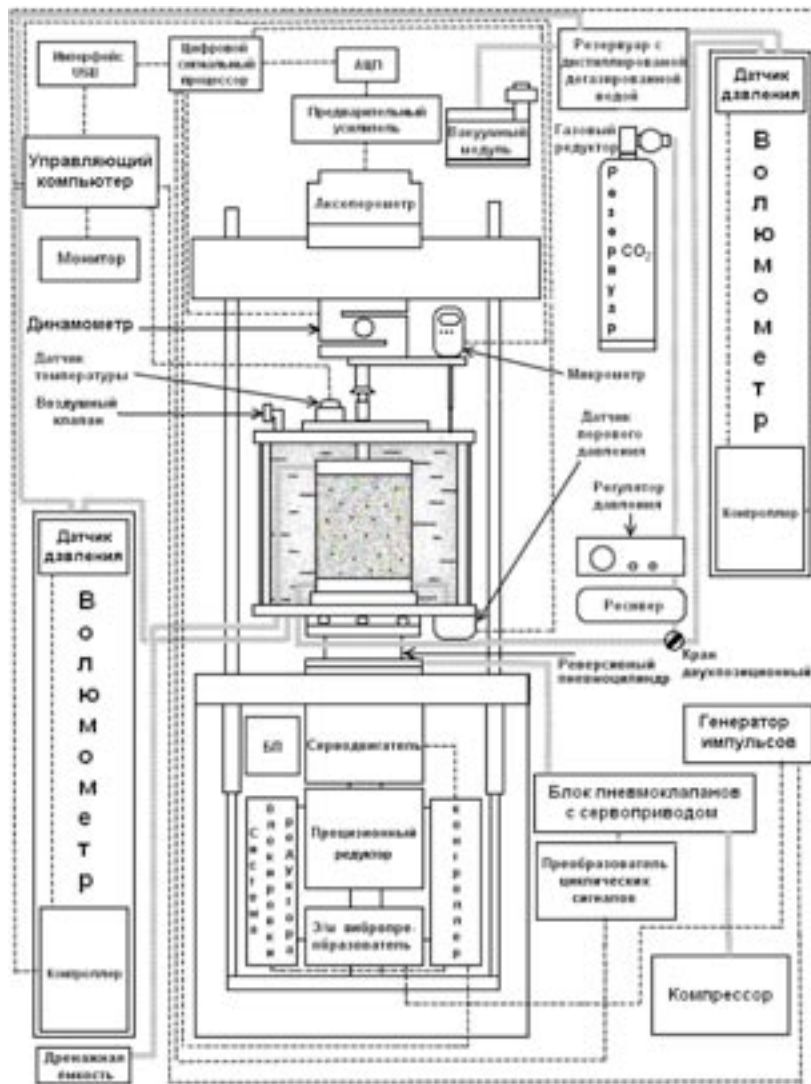


Рис. 1. Блок-схема динамической установки трёхосного сжатия

Дополнительным критерием, указывающим на склонность грунтов к разжижению, является величина удельной энергии, поглощенной грунтом в процессе динамического возбуждения. Удельная поглощенная энергия равна площади петли гистерезиса девиатора напряжений в осях ( $\sigma, \epsilon$ ) и определяется по формуле

$$\Delta W_{\text{уд}} = f \sigma d\epsilon,$$

где  $\sigma$  – девиатор напряжений,  $\epsilon$  – осевая деформация. На практике площадь петли определяется посредством построения графика  $\sigma = f(\epsilon)$  и последующей его обработки при помощи программного средства MDGT-E2. Удельная поглощенная энергия представляет собой энергию, поглощенную единицей объема грунта в процессе динамического возбуждения и выражается в  $\text{кДж}/\text{м}^3$ . Потенциально разжижаемый грунт поглощает большое количество энергии, увеличивая тем самым внутреннюю энергию и повышая подвижность элементов (частиц) системы. Прямым следствием поглощения энергии является увеличение порового давления.

Легко разжижаемые грунты характеризуются, как правило, значениями удельной поглощенной энергии, превышающими  $25 \text{ кДж}/\text{м}^3$ . Удельная поглощенная энергия находится в однозначной связи со спектральной характеристикой сигнала отклика, о которой шла речь выше.

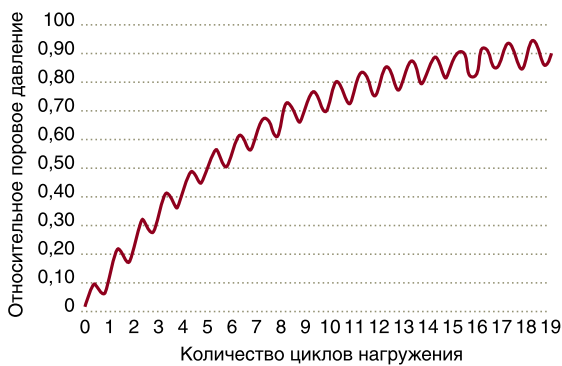


Рис. 2. График относительного порового давления

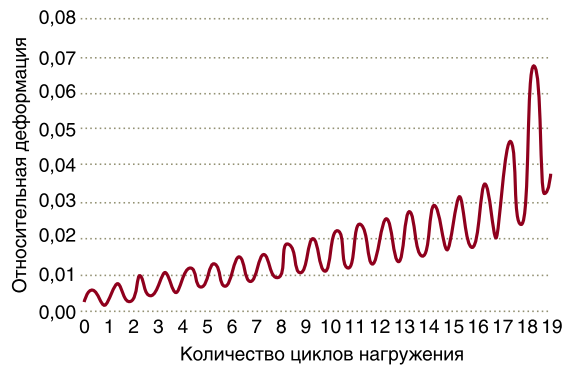


Рис. 3. График относительной деформации

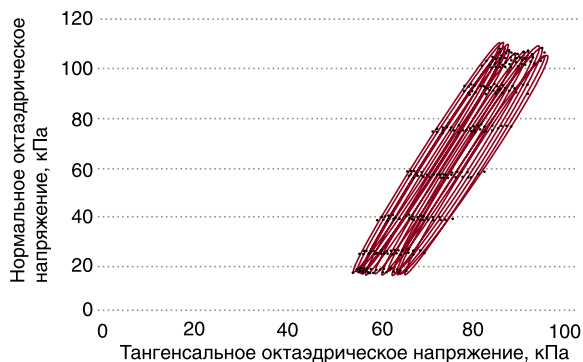


РИС. 4.

Диаграмма напряженного состояния (динамически устойчивый грунт)

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

По результатам циклических трехосных испытаний и стабилометрических виброиспытаний выявлены две структурные зоны потенциально разжижаемых грунтов:

#### Зона 1.

Зона представлена сапропелями минеральными и среднеминеральными.

Коэффициент вибрационной потери прочности  $K_c = 1,7-1,9$ . Относительное поровое давление PPR по результатам проведенных испытаний достигало значения 0,96, что свидетельствует о предкритическом состоянии грунта. Максимальная относительная вертикальная деформация, накопленная к моменту завершения последнего расчетного цикла вынужденных колебаний, составила 0,11–0,12.

Траектория нагружения в плоскости эффективных октаэдрических напряжений проходит вблизи начала координат (рис. 6). Факт пересечения траекторией нагружения оси тангенциального октаэдрического напряжения свидетельствует об инверсии эффективных напряжений в процессе циклического нагружения. Возникающие в результате инверсии растягивающие напряжения существенным образом снижают сдвиговую прочность, увеличивая тем самым вероятность разжижения грунта.

Для грунтов этой стратиграфической разности наблюдалось выраженное расширение спектра отклика сейсмоосциллятора в процессе проведения виброиспытаний (рис. 8) относительно исходного спектра (рис. 7).

Последний факт позволяет отнести данную стратиграфическую разность к категории условно динамически неустойчивых грунтов при сценарном землетрясении с магнитудой  $M = 7,5$  (период повторяемости 1000 лет).

В случае поднятия уровня грунтовых вод существующее неустойчивое равновесие может быть нарушено

О.Р. ОЗМИДОВ  
ОЦЕНКА РИСКА СЕЙСМИЧЕСКОГО  
РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО  
ОСНОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ОЛИМПИЙСКОГО  
СТРОИТЕЛЬСТВА В Г. СОЧИ

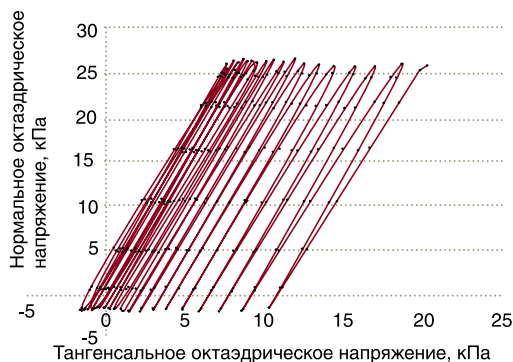


РИС. 5.

Диаграмма напряженного состояния (разжижение)

вследствие усиления взвешивающего эффекта и уменьшения эффективного напряжения в массиве грунта.

Приведенные обстоятельства позволяют сделать вывод о необходимости принятия мер по недопущению барражного эффекта и подтопления территории в процессе возведения и эксплуатации проектируемого объекта. По данным широкомасштабных исследований грунтов Имеретинской низменности, проведенных испытательной лабораторией ООО «МостДор-ГеоТрест» в 2009–2011 гг., в том числе на территории проектируемого Центрального Олимпийского стадиона, грунты этой стратиграфической разности наиболее подвержены действию циклических нагрузок. Выделенный таким образом инженерно-геологический элемент наиболее подвержен риску сейсмического разжижения.

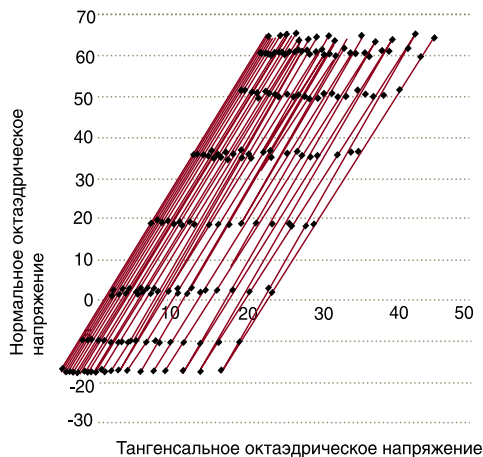


РИС. 6.

Диаграмма напряженного состояния (скв. ПТС21, гл. 6,4 м)

**Зона 2.**

Зона представлена песками пылеватыми, средней плотности, однородными.

Значительное содержание пылеватой фракции по данным гранулометрического анализа может свидетельствовать о повышенной степени риска сейсмического разжижения этих песков при наличии соответствующих условий.

Коэффициент вибрационной потери прочности грунтов этой зоны заключен в интервале 1,9–2,3. Относительное поровое давление PPR в отдельных случаях достигало значения 0,85. Трасектория нагружения проходит вблизи начала координат плоскости эффективных октаэдрических напряжений (рис. 9).

Существенного расширения результирующего спектра отклика в данном случае не наблюдалось. Несмотря на это, данную стратиграфическую разность следует также отнести к категории условно динамически неустойчивых грунтов, поскольку накопленная в процессе циклических испытаний относительная деформация достигала весьма высоких значений 0,08–0,13. Такие большие деформации указывают на то, что данный грунт может быть фактически разрушен даже до достижения момента сейсмического разжижения.

Необходимо иметь в виду, что в процессе диссипации накопленного порового давления после завершения сейсмического возбуждения может произойти дополнительная деформация массива грунта вследствие увеличения вертикального эффективного напряжения и сокращения пор грунта. Большое значение накопленной относительной вертикальной деформации, зарегистрированное в процессе проведения циклических трехосных испытаний, указывает на возможность значительных неравномерных осадок грунтового основания проектируемого объекта в

условиях прогнозируемого сейсмического толчка. С учетом мощности этой разности грунтов (более 2,0 м), полученной по результатам инженерных изысканий, суммарная осадка толщи песков в условиях сейсмического толчка может составить более 25 см.

**ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о высоком риске сейсмического разжижения грунтов геологического основания проектируемых олимпийских объектов. В связи с этим представляется целесообразным провести ряд превентивных мероприятий по повышению динамической устойчивости исследуемых грунтов в условиях прогнозируемого сейсмического события.

Из выражения (4) следует, что циклическое сопротивление грунта сдвигу пропорционально квадрату его плотности. Следовательно, для повышения сейсмической устойчивости грунтового основания необходимо повысить плотность слагающих его грунтов. Повышение плотности грунта снижает вероятность появления знакопеременных нагрузок в процессе динамического воздействия, что, в свою очередь снижает вероятность разжижения.

Уплотнение динамически неустойчивых грунтов, расположенных на небольшой глубине, целесообразно проводить открытым способом с одновременным контролем плотности грунтов методом стандартного уплотнения по ГОСТ 22733-2002.

Для повышения плотности грунтов глубокого заложения (глубже 2 м) можно рекомендовать метод «Геокомпозит» или метод «Напорной инъекторной цементации». Увеличению риска сейсмического разжижения грунтов также способствует повышение уровня грунтовых вод, которое может произойти в случае возникновения барражного эффекта от возво-

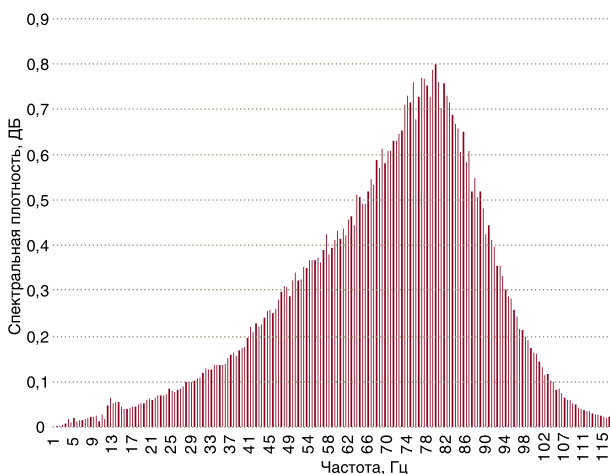


РИС. 7.

Исходный спектр

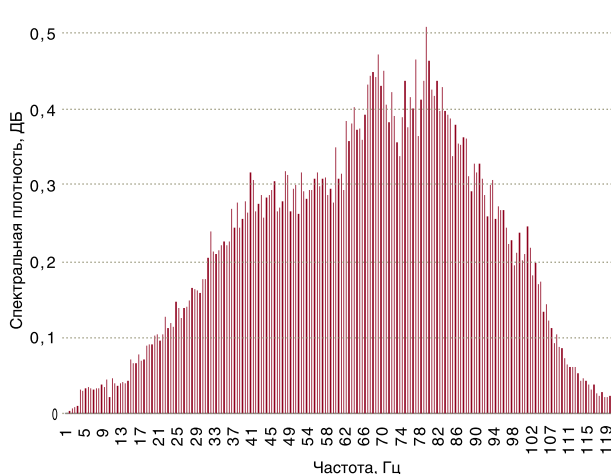


РИС. 8.

Результирующий спектр

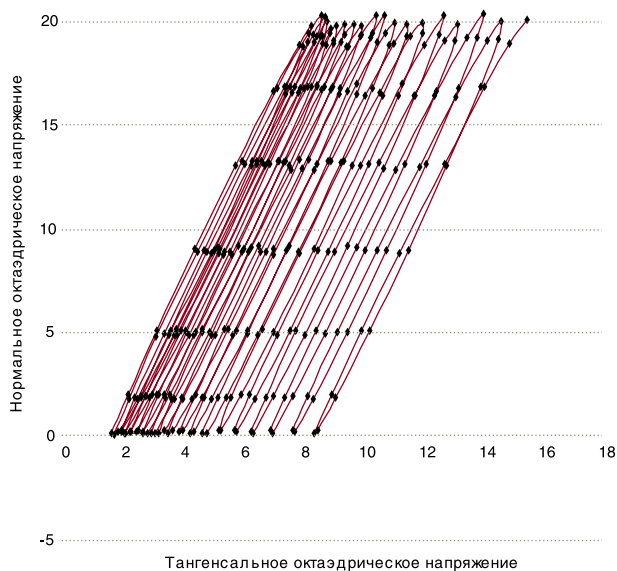


Рис. 9.

Диаграмма напряженного состояния. (скв. 1244авт, глубина 1,5 м)

димых фундаментов зданий, а также по причине ошибок в проектировании и эксплуатации ливневой канализации. Повышение уровня грунтовых вод снижает значение эффективного вертикального напряжения, что существенным образом смещает динамическое равновесие в сторону разжижения.

Таким образом, для снижения риска сейсмического разжижения динамически неустойчивых грунтов рекомендуется провести мероприятия по водопонижению и уплотнению грунтов с учетом их параметров, полученных в результате проведения испытаний методом циклических трехосных сжатий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **АБЕЛЕВ Ю.М.** Плывуны как основание сооружений и методы их исследования на месте постройки. М.: Госуд. изд-во строительной литературы, 1947. 127 с.
2. **БОДЫРЕВ Г.Г.** Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: изд-во ПГУАС, 2008. С. 361.
3. **ВОЗНЕСЕНСКИЙ Е.А., КОВАЛЕНКО, В.Г. КУШНАРЕВА Е.С., ФУНИКОВА В.В.** Разжижение грунтов при циклических нагрузках. М.: Изд-во МГУ, 2005.
4. **КОЖОБАЕВ К.А.** Закономерности изменения прочности деформируемости дисперсных грунтов при низкочастотных динамических воздействиях. Дисс. докт. геол.- мин. наук. Бишкек, 1995.
5. **КУШНАРЕВА Е.С.** Устойчивость водонасыщенных песков при динамическом воздействии. Дисс. канд. геол.-мин. наук. М.: Московский университет, 2008.

**О.Р. ОЗМИДОВ**  
ОЦЕНКА РИСКА СЕЙСМИЧЕСКОГО  
РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО  
ОСНОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ОЛИМПИЙСКОГО  
СТРОИТЕЛЬСТВА В Г. СОЧИ

6. **ИШИХАРА К.** Поведение грунтов при землетрясениях. СПб.: изд-во НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. 383 с.
7. **ОЗМИДОВ О.Р.** Теоретические и практические основы контроля устойчивости ограждающих дамб хвостохранилищ и шламонакопителей. ГЕОТЭК, 1993.
8. **ОЗМИДОВ О.Р.** Применение спектрального анализа при динамических трехосных испытаниях грунтов, склонных к сейсмическому разжижению // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. М., 2011. С. 22–30.
9. **ФЕОДОСЬЕВ В.И.** Сопrotивление материалов. М.: изд-во МГТУ им. Баумана, 2007.
10. ASTM D5311-2004 Standart Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil.
11. ASTM D 4767 Standard Test Method for Consolidated Unddrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soil, 2004.
12. ASTM 3999-91 (Reapproved 2003) Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Appartus.
13. BS 1377:1990, Part 2. Methods of Tests for Soils for Civil Engineering Purposes. Classification Tests.
14. **CHERN S.** Probabilistic analysis of pore pressure induced damaged potential for stuctures subjected to earthquake motions. Ph. D. Thes, Georgia Institute of Technology, Georgia, 1986.
15. **CHERN S.** Cyclic shear strength of sand in offshore environment. Chinese J. Mechanics. 1991. V. 7, N 2, June, P. 1–10.
16. **HALDAR A., TANG, W.H.** Statistical study of uniform cycles in earthquake motions // J. Geot. Engr. Division. ASCE. 1981. V. 107, No. GT5. P. 577–589.
17. Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soil. Salt Lake Sity, Jan., 5–6, 1996.
18. **SEED H.B., IDRIS, I.M.** Simplified procedure for evaluation soil liquefaction potential // Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE. 1971. V. 97, No. SM9. P. 1249–1273.
19. **YOUD T.L., IDRIS I.M., ANDRUS R.D. ET. AL.** Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of lique faction resistance of soils / J. Geot. and Geoenviron. Engineering. 2001. V. 127. N 10. P. 819–825.

**Озмидов Олег Ростиславович**,  
к. г.-м.н., д. ф.-м.н., профессор, зав. грунтовой лабораторией ООО «МостДорГеоТрест»  
☎ 129344, г. Москва, ул. Искры, д. 31, корп. 1,  
тел.: +7 (916) 999-80-11