

$\delta(x_1, x_2)$ и $H(\tau)$ – дельта-функция Дирака и функция Хевисайда [6, 7]. Материал пластины – композит из алюминиевой дробы в эпоксидной матрице [5].

Результаты расчетов здесь не приводятся в силу ограниченности места.

Список литературы

- 1 **Тарлаковский, Д. В.** Начально-краевые задачи для моментных упругих пластин / Д. В. Тарлаковский, Куок Чиен Май // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. научн.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д.: в 2 ч., Гомель, 24–25 ноябр. 2022 г. / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – Ч. 2. – С. 262–263.
- 2 **Михайлова, Е. Ю.** Обобщенная линейная модель динамики тонких упругих оболочек / Е. Ю. Михайлова, Д. В. Тарлаковский, Г. В. Федотенков // Ученые записки Казанского университета. Сер. Физико-математические науки. – 2018. – Т. 160. – Кн. 3. – С. 561–577.
- 3 **Михайлова, Е. Ю.** Общая теория упругих оболочек : учеб. пособие / Е. Ю. Михайлова, Д. В. Тарлаковский, Г. В. Федотенков. – М. : Изд-во МАИ, 2018ю – 112 с.
- 4 **До, Нгок Дат.** Нестационарный изгиб шарнирно опертой моментной упругой прямоугольной пластины – простейшая модель / Нгок Дат До, Д. В. Тарлаковский // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы XXIX Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. – Т. 1. – М. : ООО «ТРП», 2023. – С. 102.
- 5 **Ерофеев, В. И.** Волновые процессы в твердых телах с микроструктурой / В. И. Ерофеев. – М. : Изд-во МГУ, 1999. – 328 с.

УДК 539.3:624.131

ИЗМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛАБОСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ТЕХНОГЕННОМ ПОДТОПЛЕНИИ

Е. Ю. ТРАЦЕВСКАЯ

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь

В процессе эксплуатации инженерных сооружений происходят изменения состояния их естественных оснований, что обуславливает изменения физико-механических свойств грунтов, в том числе и динамических. В результате могут происходить неравномерные деформации зданий и сооружений. Одним из основных видов техногенных воздействий на геологическую среду являются вибродинамические нагрузки, возникающие при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. Такие нагрузки могут приводить к изменению физико-механических свойств грунтов оснований и тем самым влиять на состояние инженерных объектов.

При эксплуатации инженерных сооружений могут происходить нарушения водного и теплового балансов, химическое и электромагнитное загрязнения и изменения напряженно-деформированного состояния грунтов активной зоны. Эти изменения в свою очередь могут оказать влияние на динамические свойства грунтов.

Ранее проводились теоретические исследования физико-механических свойств дисперсных грунтов [1–7]. Экспериментальное определение характеристик устойчивости и пластичности различного вида грунтов отражено в публикациях [8–11].

Испытания грунтов проводились в лабораторных условиях. Были определены ускорения, возникающие в грунте при определенном ускорении возмущающей силы; вертикальные деформации грунтов необратимого характера при компрессионных испытаниях в статическом и динамическом режимах нагружения образцов. При виброкомпрессионном уплотнении грунта использовали металлическую обойму диаметром 152 мм и высотой 410 мм, жестко закрепленную на вибростоле вибрационного электродинамического стенда.

Статическое зондирование является одним из наиболее эффективных, перспективных и динамично развивающихся полевых экспресс-методов изучения состава, строения, состояния и механических свойств дисперсных грунтов. Этот метод применяют для количественной оценки характеристик физико-механических свойств грунтов (плотности, модуля деформации, угла внутреннего трения и сцепления грунтов и др.). К основным характеристикам относятся удельные сопротивления грунта под наконечником зонда (q_c , МПа) и на участке боковой поверхности зонда (f_s , кПа), показатель трения (R_f , %).

Амплитудно-частотный режим испытаний был выбран на основании обобщения опубликованных в литературе [1] и полученных при исследованиях данных. Амплитуда виброперемещений A_0 задавалась постоянной $0,3 \cdot 10^{-3}$ м (максимальные амплитуды, характерные для железнодорожного транспорта). Частота гармонических колебаний φ изменялась от 15 до 105 Гц (наиболее часто встречаемые значения для техногенных нагрузок) с интервалом, равным 10 Гц. Каждый эксперимент проводился в течение одного часа, а виброускорения, возникающие в грунте, обратимые и необратимые деформации измерялись в течение первых пяти минут, через 30 минут и в конце эксперимента. Образцы испытывали без статического пригружения.

Слабосвязным неводонасыщенным грунтам свойственны смешанные структуры. В них кулоновское трение между частицами меньше, чем в чистых песках, а коагуляционная сетка слабая и прерывистая. Ввиду неоднородности структурных связей, даже при небольших напряжениях в пределах упругих деформаций появляются необратимые деформации, т. е. предел упругости принимается условно [1]. В связи с низкой гидрофильностью таких грунтов их динамическая реакция зависит даже от небольших изменений влажности.

По действию вибродинамической нагрузки грунт из состояния равновесия переходит в неустойчивое состояние. Распределение нормальных напряжений меняется в течение цикла. На стадии разгрузки происходит ослабление и разрушение связей между структурными элементами, возрастает их подвижность. На стадии нагружения увеличиваются количество и площадь межчастичных контактов и происходит уплотнение грунта. В результате уменьшение сил сцепления при растяжении компенсируется увеличением числа контактов при сжатии настолько, что деформируемость уменьшается, т. е. процесс уплотнения имеет затухающий характер. При этом изменение значений модулей общей и упругой деформации носит затухающий характер, модули общей деформации приближаются к значениям модулей упругости, а жесткость α и соответственно собственная частота образцов грунта ω увеличиваются. Например, для супеси легкой ($W = 0,135$) при изменении коэффициента пористости от 0,83 до 0,59 при одном и том же ускорении динамического воздействия амплитуды перемещений уменьшились от $2,00 \cdot 10^{-3}$ м до $0,44 \cdot 10^{-3}$ м.

При приложении вибродинамической нагрузки грунт уплотняется, процесс уплотнения имеет затухающий характер. При этом изменение значений модулей общей и упругой деформаций носит также затухающий характер, модули общей деформации приближаются к значениям модулей упругости, а жесткость и соответственно собственная частота образцов грунта увеличивается. При увеличении влажности от максимальной гигроскопической влажности до влажности нижнего предела пластичности увеличивается сжимаемость грунта; жесткость, частоты собственных колебаний образцов, логарифмические декременты и коэффициенты нарастания амплитуды вне резонансной зоны уменьшаются. Явление резонанса с увеличением влажности проявляется более четко.

Следует отметить, что полученные механические характеристики грунтов использовались при расчетах композитных элементов конструкций, связанных с упругим основанием [12–15].

Список литературы

- 1 Трофимова, В. Т. Грунтоведение / В. Т. Трофимова. – М. : Изд-во Московского университета, 2005. – 1023 с.
- 2 Трацевская, Е. Ю. Особенности тектоники территории г. Гомеля в связи с оценкой устойчивости геологической среды / Е. Ю. Трацевская, А. Н. Галкин, И. А. Красовская // Литосфера. – 2003. – № 1 (18). – С. 78–85.
- 3 Трацевская, Е. Ю. Закономерности развития суффозионно-просадочных явлений на территории Белоруссии / Е. Ю. Трацевская, А. Н. Галкин // Инженерная геология массивов лессовых пород : труды Междунар. науч. конф. / под ред. В. Т. Трофимова, В. А. Королева. – М., 2004. – С. 108–109.
- 4 Трацевская, Е. Ю. Особенности формирования техногенного подтопления дисперсных грунтов / Е. Ю. Трацевская // Природные ресурсы. – 2008. – № 2. – С. 106–112.
- 5 Трацевская, Е. Ю. Современное динамическое состояние геологической среды г. Гомеля и его влияние на инженерно-геологические условия / Е. Ю. Трацевская, О. К. Абрамович // Литосфера. – 2008. – № 2 (29). – С. 129–137.
- 6 Трацевская, Е. Ю. Геологическая опасность развития подтопления грунтов и оценка экономических рисков при ее реализации / Е. Ю. Трацевская // Природные ресурсы. – 2009. – № 1. – С. 102–109.
- 7 Трацевская, Е. Ю. Влияние развития техногенного подтопления в дисперсных грунтах на надежность системы «основание-фундамент-здание» / Е. Ю. Трацевская // Экология урбанизированных территорий. – 2011. – № 2. – С. 71–76.
- 8 Трацевская, Е. Ю. Динамическая неустойчивость квазитиксотропных моренных грунтов / Е. Ю. Трацевская // Литосфера. – 2017. – № 1 (46). – С. 107–111.

9 Трацевская, Е. Ю. Характеристики пластичности супесчаных неводонасыщенных грунтов юго-востока Беларуси / Е. Ю. Трацевская // Литосфера. – 2018. – № 1 (48). – С. 12–17.

10 Трацевская, Е. Ю. Демпфирующие свойства слабосвязных трехфазных грунтов / Е. Ю. Трацевская // Литосфера. – 2019. – № 2(51). – С. 115–121.

11 Трацевская, Е. Ю. Экспериментальное исследование параметров автотранспортного вибродинамического воздействия на массивы грунтов / Е. Ю. Трацевская // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 1 (40). – С. 58–61.

12 Журавков, М. А. Математические модели механики твердого тела / М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов. – Минск : БГУ, 2021. – 535 с.

13 Zhuravkov, M. A. Mechanics of Solid Deformable Body / M. A. Zhuravkov, Lyu Yongtao, E. I. Starovoitov. – Singapore : Springer, 2022. – 317 p.

14 Абдусаттаров, А. Деформирование и повреждаемость упругопластических элементов конструкций при циклических нагрузениях / А. Абдусаттаров, Э. И. Старовойтов, Н. Б. Рузиева. – Ташкент : IDEAL PRESS, 2023. – 381 с.

15 Vakhneev, S. Damping of circular composite viscoelastic plate vibration under neutron irradiation / S. Vakhneev, E. Starovoitov // Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – 18(4). – P. 699–704.

16 Pronina, P. F. Study of the radiation situation in Moscow by investigating elastoplastic bodies in a neutron flux taking into account thermal effects / P. F. Pronina, O. V. Tushavina, E. I. Starovoitov // Periódico Tchê Química. – 2020. – Vol. 17, no. 35. – P. 753–764.

УДК 536.24

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

О. В. ТУШАВИНА

Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация

Рассматриваются перспективные способы тепловой защиты летательных аппаратов путем использования новых композиционных материалов (КМ) с помощью комбинирования как существующих, так и разрабатываемых материалов. Наиболее перспективными являются КМ на основе углеродных нитей (наполнителей КМ), пропитанных углеродными смолами или парами пиролитического графита. К таким ТЗМ относятся углерод-углеродные КМ и углерод-керамические КМ. Однако эти материалы быстро окисляются уже при температуре 700 К, хотя сублимирует углерод при температурах 3000–3500 К. Поэтому для защиты от окисления и эрозии должны быть разработаны пленочные композиции, состоящие из карбидов переходной (IV) группы материалов таблицы Д. И. Менделеева – карбидов кремния, бора, циркония, гафния и т. п. Если они в своем составе содержат кремний, то при его оплавлении жидкое стекло «залечивает» поры, образуемые при окислении основного ТЗМ, состоящего из углерод-углеродных или углерод-керамических КМ. Здесь рассматривается тепловая защита с использованием заградительной пленки. Другим направлением разработки тепловой защиты для высокоскоростных ЛА является проектирование тепловой защиты на основе анизотропных материалов с теплофизическими характеристиками (ТФХ), позволяющими отводить тепловые потоки и температуры от наиболее теплонапряженных лобовых частей фюзеляжей и несущих поверхностей в хвостовые части конструкции, а также использование материала с сильной зависимостью теплопроводности от температуры, что позволяет «запирать» таковые потоки и температуры на определенной глубине конструкции, хотя к границе может подводиться бесконечно большое количество теплоты.

В работе предложен и обоснован новый эффективный способ тепловой защиты носовых частей высокоскоростных ЛА путем использования теплозащитных анизотропных материалов с высокой степенью продольной анизотропии (отношение продольного коэффициента теплопроводности к поперечному), позволяющей «канализировать» тепловые потоки и температуры. Такой отвод существенно снижает температуру лобовых затуплений высокоскоростных ЛА, с одной стороны, и существенно повышает температуры хвостовых частей конусов (клиньев) – с другой, что влечет значительное уменьшение тепловых потоков к поверхности носовых частей высокоскоростных ЛА за счет уменьшения перепада температур от газа к телу. Обоснование такого способа тепловой защиты осуществляется на основе разработки комплексной математической модели сопряженного теплообмена между вязким газодинамическим потоком и анизотропным телом. Кроме этого, повышение температуры поверхности хвостовых частей конуса (клина) уменьшает плотность газа и увеличивает его динамическую плотность газа и увеличивает его динамическую вязкость, что ведет к уменьшению местных чисел Рейнольдса, к ламинаризации течения и к уменьшению тепловых потоков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант РНФ № 23-19-00684), выданного Московскому авиационному институту.