

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ SIMULIA ABAQUS

А.Н. ВЛАСОВ, *канд., техн. наук, Институт прикладной механики РАН*
Д.Б. ВОЛКОВ-БОГОРОДСКИЙ, *канд., физ.-матем. наук, Институт прикладной механики РАН*
М.Г. МНУШКИН, *канд., техн. наук, Институт геоэкологии РАН*
С.Н. ТРОПКИН, *ООО "ТЕСИС"*

В работе рассматриваются некоторые особенности геотехнического моделирования с помощью программного комплекса [SIMULIA ABAQUS](#) на примере двух задач: 1) определение зоны влияния строительства на окружающие здания и сооружения в условиях плотной городской застройки, 2) моделирование напряжённо-деформированного состояния в условиях совместной работы системы сооружение - свайный фундамент - грунтовое основание. Сложность задач геотехнического моделирования обуславливается в первую очередь нелинейностью физических процессов при деформировании грунтового основания и, как правило, весьма непростой инженерно-геологической обстановкой (переменные мощности слоёв, выклинивающиеся слои, наличие грунтовых вод). Дополнительную сложность привносит соединение разных, сильно отличающихся масштабом элементов в одной модели. При этом конечный результат, в силу физической нелинейности задачи, существенно зависит от траектории нагружения (основных этапов строительства). В этом плане, программный комплекс SIMULIA ABAQUS предоставляет весьма развитый аппарат для конечно-элементного моделирования, включающий удобный генератор гексаэдральной сетки, широкий спектр моделей упруго-пластического деформирования материалов, возможность работать с отдельными геометрическими частями области через механизм контактных пар и т.д. Однако при таком многообразии возможностей возникает проблема адекватного моделирования изучаемых процессов [1].

Следует также отметить, что грунт представляет собой пример сложного структурно-неоднородного материала, эффективные свойства которого сильно зависят от температуры (в районах вечной мерзлоты), насыщенности влагой и т.д.; они определяются, как правило, в результате лабораторных испытаний образцов. Поэтому актуальной задачей являются методы оценки эффективных физико-механических свойств структурно-неоднородных материалов, участвующих в геотехническом моделировании [2]. В работе развиваются свои собственные аналитические методы для расчёта эффективных механических и теплофизических характеристик по методу асимптотического усреднения Бахвалова [3]. Эти методы основаны на специальных высокоточных аппроксимациях решения вспомогательных задач [4-6]. Алгоритмы расчёта эффективных характеристик могут быть включены в ABAQUS через механизм создания скриптов с целью их использования при моделировании.

Зона строительства имеет сложную структуру, и здесь выделяются такие элементы, как область экскавации котлована, шпунтовое ограждение, стена в грунте, свайный фундамент, фундаментная плита, распорная система, подкосы, анкерные элементы, пригрузочные бермы, каркас здания вместе с несущими стенами, колоннами и т.д. Все эти элементы должны быть смоделированы в единой сетке и подключаются к расчету на определенном этапе, соответствующем траектории нагружения. Здесь активно используется технология ABAQUS'a по активации/деактивации элементов (*MODEL CHANGE).

С помощью этой технологии можно смоделировать, например, замену материала в определенной группе элементов. Это используется, в частности, при возведении стены в грунте или фундаментной плиты на определенном шаге расчета. Для этого выбранная группа элементов описывается дважды для разного материала, например для грунта и бетона, а затем убирается группа элементов, соответствующая грунту на месте фундаментной плиты, и активируется группа элементов, соответствующая бетону.

Отметим удобную возможность полного описания модели в [ABAQUS CAE](#) на уровне геометрии, включая подразбиение расчетной области на любые подмножества, полное задание свойств подмножеств, выделение любого числа шагов по параметру нагружения, большое число объемных, плоских и одномерных элементов, ассоциируемых с подобластями, с помощью которых можно смоделировать все необходимые геотехнические элементы в зоне строительства.

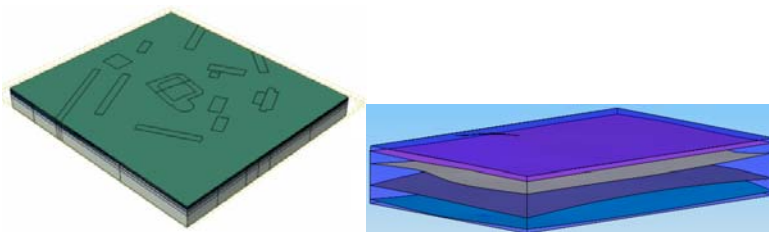


Рис. 1. Геологическая модель расчетной области

Для рассматриваемого класса задач моделирование начинается с построения геологической модели расчетной области (рис. 1), включающей в себя: 1) определение размеров расчетной области; 2) определение глубины расчетной области на основе оценки НДС (сжимаемая толщина [7]); 3) аппроксимация данных инженерно-геологических изысканий с помощью В-сплайнов или полигональных фасеток; 4) расчет начальной картины НДС в зоне строительства с учетом нагрузки от окружающей застройки.

В качестве модели грунта часто выбирается упругопластическая модель Друккера-Прагера [8], соответствующая ассоциированному закону пластического течения. Эта модель определяется пластическим потенциалом

$F(p, q) = q + \alpha p - k$, где $p = I_1(T_\sigma)$ – первый инвариант тензора напряжений; $q = \sqrt{J_2(D_\sigma)}$, где – второй инвариант девиатора напряжений; T_σ и D_σ – соответственно тензор и девиатор напряжений; α и k – параметры модели, которые могут быть определены из стандартных испытаний грунтов [8].

Следует отметить, что для рассматриваемого класса задач требуется высокий порядок аппроксимации, предполагающий разбиение расчетной области на гексаэдры. Это обуславливает специальный подход к генерации сетки в ABAQUS CAE, предполагающий построение “призматической” сетки с адаптацией к геометрическим элементам конструкции (см. рис. 2). Здесь используется механизм разбиения начальной геологической модели (рис. 1) на подобласти с помощью вертикальных поверхностей, соответствующих плоскому чертежу конструкции котлована, и управление шагом сетки с помощью задания характерного геометрического размера на ребрах получаемых в результате такого разбиения подобластей.

Особенности построения сетки связаны с необходимостью вычисления начального НДС в геологической модели расчетной области, что предполагает удаление части элементов конструкции на первом шаге. Однако в дальнейших шагах эти элементы реанимируются, и они должны быть заранее предусмотрены в конечно-элементном разбиении расчетной области.

Вне области строительства характерный шаг сетки составляет несколько метров или десятков метров, в области строительства характерный шаг сетки составляет доли метра. Рассматриваемый подход к построению конечно-элементного разбиения приводит к гексаэдральной сетке с хорошими вычислительными свойствами, однако порождает большое число конечных элементов, если учитывать инженерно-геологические слои грунта и дополнительные подразбиения горизонтальными плоскостями с целью выделить область фундаментной плиты и ограждения котлована.

Таким образом, массив грунта, разбитый на геологические слои, фундаментная плита, стена в грунте моделируются гексаэдральными элементами, шпунтовое ограждение – поверхностными элементами с приведенными характеристиками, где эффективная ширина B и эффективная плотность $\rho_{эф} = k \rho$ определяются по следующим формулам:

$$B = \frac{12\pi \left[D_0^4 - (D_0 - 2b)^4 \right]}{64l} + \frac{E_0}{E} b_0^3, \quad k = \frac{\pi \left[D_0^2 - (D_0 - 2b)^2 \right]}{4Bl},$$

где D_0 – диаметр трубы, используемой для шпунтового ограждения, b – толщина стенки трубы, b_0 – толщина забирочного материала, E_0/E – отношение модулей упругости забирочного материала и трубы, l – расстояние между трубами по стене. Анкерные элементы, распорная система и подкосы моделируются одномерными элементами со своими характеристиками.

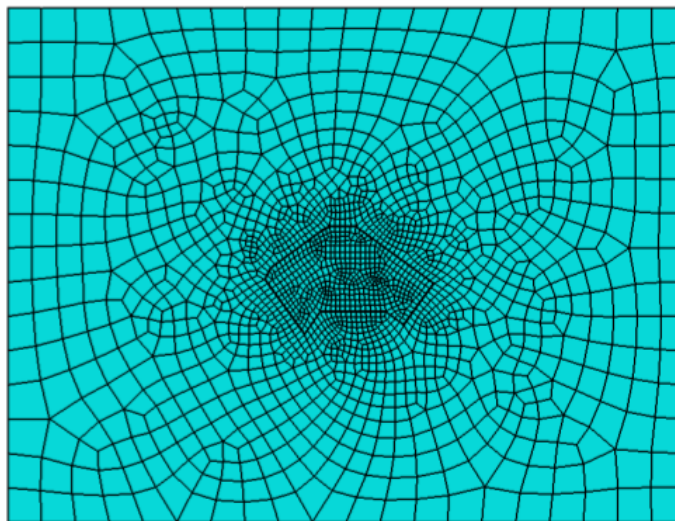


Рис. 2. Сетка с адаптацией к геометрическим элементам конструкции

Важным моментом, определяющим корректное поведение грунта в окрестности котлована, является задание контактных условий на границе между структурными элементами котлована (стена в грунте, шпунтовое ограждение) и грунтом. К сожалению, в ABAQUS’e отсутствуют контактные элементы специального вида (см. [9]), определяющие корректное контактное взаимодействие, однако имеется возможность введения контактных пар между отдельными частями модели. Использование контактных пар по всей поверхности структурного элемента, заглубленного в грунт, дает хорошие результаты, однако нам не удалось корректно использовать этот механизм в сочетании с механизмом активации/деактивации элементов, примыкающих к области контакта.

Поэтому в геотехнических расчетах использовался другой более надежный подход, связанный с выделением промежуточного анизотропного слоя в области контакта ограждения с грунтом (рис. 3), хорошо работающего на вертикальный сдвиг на стенках ограждения, а также на сжатие под стеной в грунте [10]. Введение дополнительного промежуточного слоя позволяет смоделировать корректное поведение грунта при экскавации котлована.

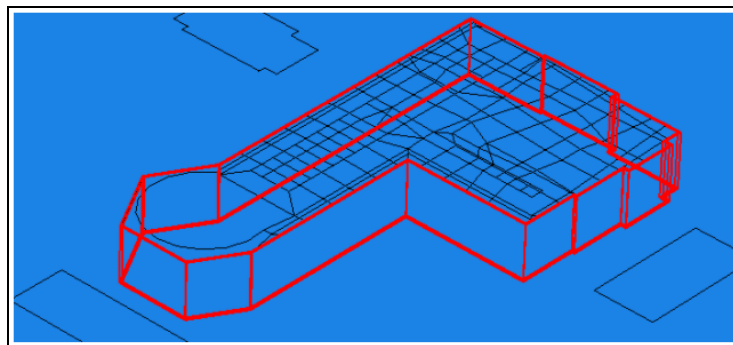


Рис. 3. Моделирование взаимодействия ограждения котлована и грунтового массива через промежуточный слой

В результате расчета зоны влияния строительства определяется картина НДС на разных этапах строительства, а также осадки (остаточные перемещения), крен окружающих строений и зона влияния строительства, которые сравниваются с нормативными, предельно допустимыми значениями.

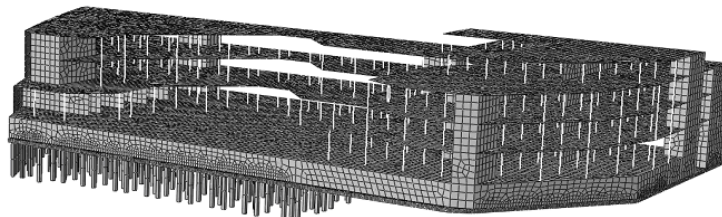


Рис. 4. Система сооружение – свайный фундамент - грунтовое основание

В отношении второй задачи, касающейся взаимодействия свайного фундамента и грунтового основания, вопрос заключался в оценке несущей способности свайного фундамента, который по предварительным оценкам работал на предельных нагрузках. Поэтому было важно детально смоделировать весь процесс совместной работы всей системы сооружение – свайный фундамент - грунтовое основание (рис. 4). Здесь в полной мере были использованы возможности ABAQUS CAE по реалистичному моделированию. Часть свай под второй половиной конструкции, которая еще не была окончательно спроектирована, была учтена путем оценки эффективных механических свойств свайного поля под фундаментом; все остальные сваи были введены детальным образом в модель вместе со всей конструкцией сооружения.

В результате расчёта НДС на разных этапах строительства была определена несущая способность свайного поля под фундаментом, а также области максимальных осадок (рис. 5). По результатам расчета было определено, какие сваи и на сколько оказались перегруженными, и были выработаны меры по укреплению фундаментной плиты.

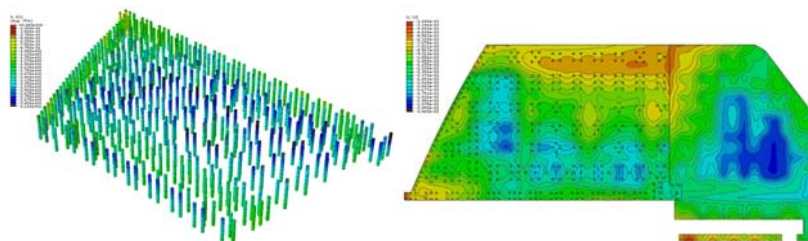


Рис. 5. Оценка несущей способности свайного поля под фундаментом

Приведенные примеры геотехнических задач демонстрируют необходимость оценки по ходу моделирования эффективных физико-механических (и теплофизических) характеристик структурно-неоднородных элементов модели. В работе развиваются аналитические методы для расчёта эффективных характеристик по методу асимптотического усреднения Бахвалова; эти методы основаны на специальных аппроксимациях решений вспомогательных задач на ячейке периодичности для функций быстрых переменных [2-6] с естественными условиями сопряжения на поверхности раздела материала Γ :

$$L_{\xi\xi} (N_i + \xi_i) = 0, \quad \xi \notin \Gamma, \quad L_{\xi\xi} = \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(\lambda_{ij} \frac{\partial}{\partial \xi_j} \right);$$

$$\left[N_i \right]_{\xi \in \Gamma} = \left[\lambda_{ij} \frac{\partial (N_i + \xi_i)}{\partial \xi_j} n_i \right]_{\xi \in \Gamma} = 0, \quad i_1 = 1, 2, 3.$$

В данном случае приведена постановка задачи по определению эффективных теплофизических свойств $\mathcal{K}_{i_1 i_2} = \langle \lambda_{i_1 i_2} + \lambda_{i_1 j} \partial N_{i_2} / \partial \xi_j \rangle$, аналогичные задачи решаются для определения механических свойств неоднородной среды. Метод предполагает регулярную периодическую структуру включений, однако в качестве представительного элемента объема неоднородного материала может быть выбрана ячейка с произвольным (случайным) расположением включений.

Для решения вспомогательных задач развивается аналитический метод блоков [4-6], в котором аппроксимация осуществляется на специальных системах функций, точно удовлетворяющих оператору задачи и условиям сопряжения на границе включений слоистой, цилиндрической или сферической формы с учетом дополнительного слоя. Каждый блок содержит не более одного включения, представительный элемент объема разбит на множество блоков, $\bar{G} = \bigcup \bar{B}_k$, $B_k \cap B_l = \emptyset$, $k \neq l$. В качестве механизма аппроксимации используется несколько обобщений метода наименьших квадратов на многоблочные структуры. Метод позволяет контролировать точность аппроксимации по невязке между решениями на границе блоков.

Построенные системы функций с учетом условий сопряжения на границах раздела фаз и дополнительного слоя, соответствуют решению обобщенной задачи Эшелби для уединенного включения в бесконечной матрице с произвольным полиномиальным поведением решения на бесконечности; как частный случай они содержат решение классической задачи Эшелби с однородным полем на бесконечности. Используя это обстоятельство можно использовать эти функции для оценки эффективных свойств в рамках самосогласованного метода усреднения [11].

Для эффективного модуля теплопроводности и для включений сферической формы эта оценка, в частности, дает следующее аналитическое выражение для эффективного модуля теплопроводности \mathcal{K} :

$$\frac{\mathcal{K}}{\lambda_3} = \frac{\left((1-c_0)(2+c_1) + (1+2c_0) \frac{(1-c_1)\lambda_2}{\lambda_3} \right) + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left((1-c_0)(1-c_1) + (1+2c_0) \left(\frac{1}{2} + c_1 \right) \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \right)}{\left(\left(1 + \frac{c_0}{2} \right) (2+c_1) + (1-c_0) \frac{(1-c_1)\lambda_2}{\lambda_3} \right) + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(\left(1 + \frac{c_0}{2} \right) (1-c_1) + (1-c_0) \left(\frac{1}{2} + c_1 \right) \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \right)},$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – соответственно модули теплопроводности для включения, промежуточного слоя и матрицы, c_0 – коэффициент объемного наполнения для включений (с учетом промежуточного слоя), $c_1 = (R_1/R_2)^3$ – относительное объемное наполнение промежуточного слоя во включении, R_1, R_2 – соответственно радиусы сферических границ раздела материала. Аналогичные оценки получены для механических характеристик (для объемного модуля упругости) и для цилиндрических и слоистых включений.

Формулы, полученные в рамках самосогласованного метода усреднения представляют собой удобный аппарат для оценки эффективных свойств, однако возникает вопрос о границах применимости этих формул. На этот вопрос можно дать точный ответ, сопоставляя эти формулы с результатом асимптотического усреднения по методу Бахвалова, особенно при больших концентрациях и нерегулярных распределениях.

Ниже, на рис. 6 представлены результаты расчёта эффективного модуля теплопроводности \mathcal{K} для периодической среды с включениями сферической формы по методу Бахвалова (сплошная линия) в сопоставлении с методом самосогласованного усреднения (штрихпунктирная линия) для случая $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_I$, $\lambda_3 = \lambda_M$. Как видим, расхождение может достигать большой величины ($\delta = 7\% - 25\%$) при больших концентрациях включений; отметим, что расхождение имеет такого же порядка величину при нарушении регулярности в расположении включений. На рис. 7 даны примеры расчёта теплопотока $p_{1j} = \lambda_{1j} \partial(N_1 + \xi_1) / \partial \xi_j$ блочным аналитико-численным методом в ячейке с нерегулярным распределением цилиндрических включений.

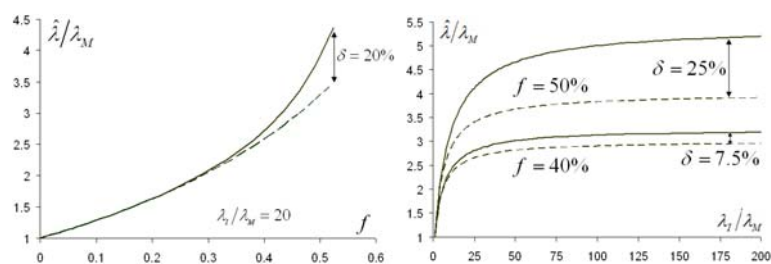


Рис. 6. Сопоставление эффективного модуля теплопроводности для асимптотического и самосогласованного метода усреднения

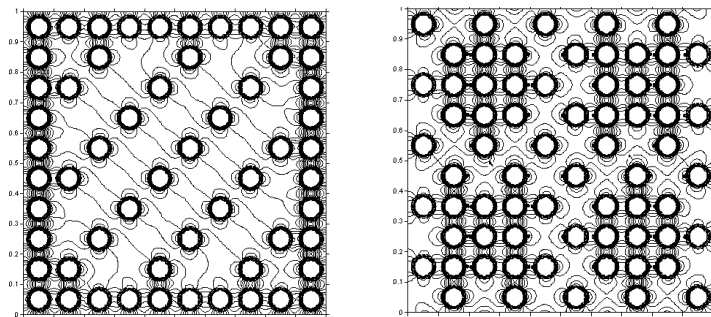


Рис. 7. Примеры распределения теплопотока в ячейке с нерегулярным расположением включений

В конце статьи дадим описание разрабатываемого авторами оригинального подхода к генерации КЭ сетки

для сложных областей, возникающих в геотехнических задачах (рис. 1-4). Этот подход основан на задании начальной грубой сетки и её коррекции (деформировании) с учётом поставленных граничных значений с помощью прямого отображения сетки, осуществляемого оператором Ляме:

$$\nabla^2 \bar{\xi}(P) + \frac{1}{1-2\nu} \nabla \operatorname{div} \bar{\xi}(P) = 0, \quad P \in G,$$

с граничными условиями:

$$\bar{\xi}(P') = \bar{h}(P'), \quad P' \in \partial G \cup \partial \Xi.$$

Алгоритм позволяет строить более оптимальную сетку, чем “призматическая” с помощью ABAQUS CAE (рис. 2), и заключается в следующих шагах:

1. Составляется расчётная область из независимых геометрических “фигур” вместе с необходимыми атрибутами.
2. Осуществляется грубая дискретизация расчётной области (рис. 8).
3. Осуществляется измельчение базовой сетки вместе с процедурой притягивания узлов к “фигурам” (на основе прямого отображения), в зону влияния которых она попадает.

Расчет прямого отображения может выполняться двумя способами: методом конечных элементов на имеющейся к данному моменту сетке, блочным аналитико-численным методом. На рис. 8 представлен пример построения сетки для цилиндрического включения со слоем.

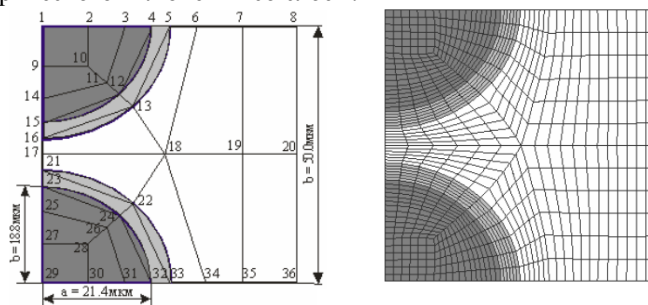


Рис. 8. Пример генерации конечно-элементной сетки.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность эффективного использования конечно-элементного комплекса [SIMULIA ABAQUS](#) при решении геотехнических задач. Однако, программные комплексы общего назначения несколько «тяжеловесны», и требуют в нестандартных ситуациях корректного использования слишком больших возможностей по моделированию, а также требуют некоторую доработку имеющегося арсенала для решения задач конкретной предметной области. В такой ситуации часто лучше пользоваться жёстко ориентированными на определенную предметную область программными комплексами или собственными разработками.

Л и т е р а т у р а

1. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Мнушкин М.Г., Тропкин С.Н. Моделирование задач геомеханики с помощью SIMULIA ABAQUS. // Труды международной научно-практической конференции “Инженерные системы - 2009”, Москва, 6-9 апреля 2009. Т. 1. – М. : Изд-во РУДН, 2009. – С. 97-111.
2. Власов А.Н. Саваторова В.Л., Талонов А.В. Описание физических процессов в структурно неоднородных средах. – М. : Изд-во РУДН, 2009. – 258 с.
3. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. – М.: Наука, 1984. – 352 с.
4. Волков-Богородский Д.Б. О вычислении эффективных характеристик композиционных материалов с помощью блочного аналитико-численного метода // “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред”. Материалы XII Международного симпозиума. Избранные доклады. – М.: МАИ, 2006. – С. 41-47.
5. Волков-Богородский Д.Б. Применение аналитических расчетов на основе метода блоков в связанных задачах механики сплошных сред // Труды Всероссийской научно-практической конференции “Инженерные системы - 2008”, Москва, 7-11 апреля 2008. – М. : Изд-во РУДН, 2008. – С. 123-138.
6. Волков-Богородский Д.Б., Сушко Г.Б., Харченко С.А. Комбинированная MPI+threads параллельная реализация метода блоков для моделирования тепловых процессов в структурно-неоднородных средах // Вычислительные методы и программирование. – 2010. – Т.11. – С. 127-136.
7. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М. : Госстройиздат, 1963. – 636с.
8. Друккер Д., Прагер В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование. // Определяющие законы механики грунтов. – М.: Мир, 1975. – С. 166-177.
9. Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н. Статика и динамика грунтовых плотин. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
10. Власов А.Н. Мерзляков В.П. Усреднение деформационных и прочностных свойств в механике скальных пород. – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. – 208с.
11. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М. : Мир, 1982. – 334с.