Учет реологических свойств грунтов при расчете осадок зданий

Accounting of the soil rheological properties in the building settlement calculation

к.т.н., В.А. Васенин

Ph.D, V.A.Vasenin

аспирант Астафьева Екатерина Дмитриевна
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Инженерно-строительный факультет,
+79217556681,
astafyeva.ekaterina@gmail.com

Post-graduate student Ekaterina Dmitrievna Astafyeva
Saint-Petersburg State Polytechnical University, Faculty of Civil Engineering,
+79217556681,
astafyeva.ekaterina@gmail.com

Ключевые слова: осадка фундаментов, слабые грунты, способы определения деформаций, модели работы грунта, Plaxis, Fem-models, реологические параметры.

На данный момент точность определения конечной осадки зданий и сооружений, возведенных на слабых глинистых грунтах, представляется чрезвычайно важной, поскольку осадки таких зданий развиваются десятилетиями и сложно предсказуемы.

В работе произведено сравнение наиболее распространенных инженерных и численных методов расчета конечной осадки зданий с результатами материалов длительных натурных наблюдений.

Получены количественные результаты осадок рассматриваемых зданий и сделаны выводы о применимости тех или иных теоретических методов расчета осадок.

Key words: foundation settlement, soft soils, deformation determination methods, soil models, Plaxis, Fem-models, rheological parameters.

Nowadays, accuracy of definition final the settlement of buildings and structures erected on soft clay soils is very important, because settlement of buildings developing for decades and difficult predictable.

Current work carried out comparison of the most common engineering and numerical methods for calculating the final settlement of buildings with the results of long-term field observations. Comparisons are based on monitoring of two historical buildings that are located in one area at the Saint-Petersburg.

The quantitative results are obtained and conclusions about the applicability of different theoretical methods for calculating the settlement are made. Also concluded need of long-term field observations, due to further development of rheological models could be more accuracy.

Васенин В. А., Астафьева Е. Д. Учет реологических свойств грунтов при расчете осадок зданий. /
Vasenin V. A., Astafyeva E. D. Accounting of the soil rheological properties in the building settlement calculation. ©

Слабые грунты достаточно широко представлены как основания зданий и сооружений в Санкт-Петербурге и других странах, а осадки оснований зданий и сооружений, возведенных на слабых грунтах, развиваются десятилетиями и зачастую неравномерны, что часто приводит к повреждениям конструкций и как следствие к внеплановым ремонтам.

Территория Санкт-Петербурга располагается в пределах северо-западной части Русской плиты, которая имеет двухэтажное строение [5]. Нижний этаж сложен кристаллическими породами – это граниты, гнейсы и другие магматические и метаморфические породы. В пределах города породы фундамента залегают на достаточно большой глубине 180-240 м. Кристаллический фундамент перекрыт отложениями осадочного чехла, которые составляют верхний этаж плиты. Осадочный чехол представлен отложениями, различающимися по возрасту, генезису, составу, состоянию и свойствам, что определяет различный подход к их инженерно-геологической оценке. Инженерно-геологические и гидрогеологические условия Санкт-Петербурга характеризуются большой неоднородностью и относительной сложностью. Вся толща четвертичных отложений может рассматриваться как неустойчивая [2], обладающая способностью к развитию пластических деформаций. Поэтому при тенденции строительства к повышению этажности (увеличению давления на основание) существует необходимость в точных инженерно-геологических расчетах.

Для обоснования применения тех или иных моделей механики грунтов необходимо проводить их верификацию. Верификация модели заключается в проверке соответствия простейшим лабораторным опытам и в проверке адекватности описания полевых испытаний (например, штамповых опытов) и самое главное, результаты расчета должны сопоставляться с серией натурных наблюдений. Принципиальная сложность сопоставления результатов расчетов с натурными наблюдениями состоит в том, что реальные деформации грунтов развиваются в течение длительного времени, а большинство методик расчета нацелено на получение конечных значений деформаций. Сравнение конечных деформаций с данными натурных наблюдений не вполне корректно, поскольку, как правило, в натурных наблюдениях фиксируется незавершенный процесс развития деформаций, а не конечный результат. Поэтому для сравнения данных расчетов и наблюдений необходимо выбирать расчетные модели, способные рассматривать развитие деформаций во времени.

Исходя из изложенного, актуально выполнить анализ применимости наиболее распространенных инженерных методов и расчетных моделей работы грунта, положенных в основу используемых на практике программ, для описания поведения грунтов характерных для Санкт-Петербурга. При этом важно строить анализ на сравнении с результатами натурных исследований, поскольку хорошо документированные результаты длительных наблюдений на реальных объектах являются необходимой базой для оценки достоверности методов расчета деформаций основания.

В связи с этим, цель работы заключается в том, чтобы на основе материалов длительных наблюдений за развитием осадки оснований зданий и сооружений, возведенных на площадках, сложенных слабыми грунтами оценить применимость тех или иных теоретических методов расчета конечной осадки оснований.

1.0 Анализ современной практики строительства зданий на слабых грунтах

Большой вклад в решение вопросов строительства зданий и сооружений на слабых грунтах внесли ленинградские ученые и строители, такие как Б. И. Далматов, Н. А. Цытович [16] Н. Н. Маслов [8],[9] П. Л. Шишко, Б.Д. Васильев, В.Ф. Райлян, С.С. Вялов [1] и др.

Ленинградская геотехническая школа, возглавляемая профессором Б.И. Далматовым, занималась натурным наблюдениям за осадками зданий. Также значительная работа по длительным наблюдениям за осадками зданий была проведена профессором С.Н. Сотниковым в 1987 году. Большой объем длительных натурных измерений осадок петербургских зданий выполнен Г.В. Левинтовым (ПКТИ), Г.М. Деянышевым («Георекonструкция»). Эти данные составляют фундаментальную базу для натурных наблюдений, которую можно использовать для проверки точности геотехнических прогнозов с применением различных методов расчета. Результаты длительных наблюдений представляют большой интерес для геотехники, поскольку документированных многолетних измерений осадок в России немного. К сожалению, в настоящее время наблюдения за осадками зданий в геотехнической практике редко ведутся более двух лет после окончания строительства.

Сравнение величин осадок оснований, определенных расчетом, с результатами натурных наблюдений является единственной возможностью оценки достоверности существующих методов расчета и определения характеристик сжимаемости грунтов.

В Санкт-Петербурге длительными наблюдениями за осадками занимались Цытович Н. А, Иовчук А. Т [15, 6] Сотников С.Н [11, 12] Лучкин М.А. [14]. В своих работах они занимались наблюдениями за

осадками и деформациями большого количества разноплановых зданий, возведенных в условиях сильно сжимаемых грунтов.

Сотников С.Н. в своей диссертации [11] привел сравнение осадок 140 объектов, расположенных по всему миру, посчитанных методом послойного суммирования с результатами длительных наблюдений.

Объекты наблюдений представляли собой жилые и промышленные здания различных типов (кирпичные, крупнопанельные, каркасные), сооружения, круглые в плане (дымовые трубы, башни, резервуары), сооружения прямоугольной формы, бетонные плотины и шлюзы. По инженерно-геологическим условиям все объекты наблюдений были разбиты на две группы: возведенные на слабых грунтах (илах, заторфованных супесях и др.) и на плотных грунтах (на морене, песках и др.). Как результат, им был приведен график сравнения осадки, посчитанной методом послойного суммирования с результатами многолетних наблюдений за зданиями по собранным им данным (см. рис.1.1). Однако достоверно неизвестно, являлись ли измеренные осадки конечными. Из графика видно, что осадка абсолютного большинства объектов на плотных грунтах составляет не более 25 см, на слабых – 55 см. Расчеты в большинстве случаев приводили к большим ошибкам. Так отклонение не более чем на 10% в обе стороны от линии, проведенной под углом 45 градусов соответствующей 100% совпадении результатов инженерного расчета с данными натурных наблюдений, было отмечено только в 11% случаев и только 6% результатов легли на эту прямую.

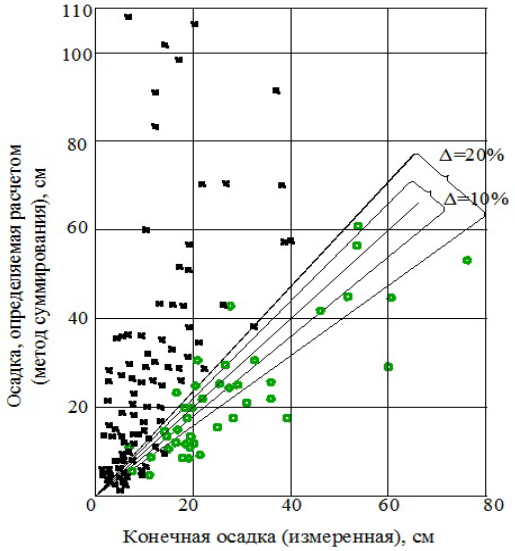

Рисунок 1.0 График зависимости осадки, посчитанной по методу послойного суммирования и осадки, полученной по результатам наблюдений различных авторов (в т.ч. зарубежных) - данные С.Н. Сотникова[6]. Крестики – здания и сооружения на плотных грантах, кружки – здания и сооружения на слабых грунтах

Раздельное рассмотрение собранных данных по двум указанным видам инженерно-геологических условий позволяет выявить, что для условий плотных грунтов в 76% случаев расчетная осадка оказалась больше измеренных. А для слабых грунтов это соотношение является обратным: в 72% случаев расчетная осадка оказалась меньше измеренной.

Тот факт, что для условий слабых грунтов расчет осадки часто приводит к заниженным результатам, был установлен многими специалистами на конкретных объектах (А.Т. Иовчуком, А.А. Собениным, А.А. Вило, И.Ф. Вотяковым, С.Н.Сотниковым и др.). Поэтому было предложено вводить поправочный коэффициент n=2 (Бакетов 1957г и др.) и n=1.5 (Польшин, Токарь). Однако подобные предложения развития не получили и в нормах отражены не были. Собранные С.Н. Сотниковым данные показали, что для условий слабых грунтов 20% ошибка получена была только в 38% случаев. В остальных случаях ошибка составила более 20%.

Лучкин М.А. в своей диссертации [7] выполнил сравнение данных натурных наблюдений за 15 зданиями на территории СПб (частично использованы результаты наблюдений С.Н. Сотникова) с результатами расчетов по методу послойного суммирования (СНиП 2.02.01-83), по методу линейно деформируемого слоя – методу Егорова, а также по методике, изложенной в СП 50-101-2004. Статистический анализ сопоставления данных расчетов по нормативным инженерным методам и данным натурных наблюдений за осадками 15 зданий позволил оценить точность этих методов. Наибольшую точность по результатам этого сопоставления позволяет получить метод послойного суммирования в редакции СНиП 2.02.01-83. В среднем по данному методу недооценка результатов

составила 30% . Методы Егорова и метод СП 50-101-2004 недооценивают осадку (для условий Санкт-Петербурга) в среднем соответственно на 80% и 180 %.

Анализ приведенных материалов показал, что погрешность определения конечных осадок инженерными методами может быть весьма велика. Для анализа возникающих погрешностей более подробно рассмотрим инженерные методы расчета конечных величин осадок.

Наибольшее распространение в отечественной практике проектирования среди инженерных методов получили:

1. Метод послойного суммирования;
2. Метод эквивалентного слоя (Цытович, 1934);
3. Метод линейно-деформируемого слоя (Егоров, 1949);
4. Метод ограниченной сжимаемой толщи (Далматов, 1964);
5. Метод послойного суммирования в СП 22.13330.2011.

Вычисление осадок зданий и сооружений возможно также с применением численных методов. Для исследования напряженно-деформируемого состояния оснований разработано множество программных продуктов. Численные методы определения осадок оснований во времени базируются на двух типах задач:

1. На основе решения задач фильтрационной компоненты;
2. На основе реологической модели работы грунтового основания.

Для решения задач первого типа в отечественной геотехнической практике применяется, как правило, расчетный комплекс Plaxis, а для решения задач второго типа программный комплекс FEM-Models. Наиболее часто для расчета осадок зданий отечественными инженерами применяется модель Hardening Soil, а также упруговязкопластическая модель. Первая позволяет оценить только конечные осадки, вторая – развитие их интенсивности во времени.

Для оценки достоверности инженерных и численных расчетов осадок необходимо иметь результаты длительных натурных наблюдений за зданиями и сооружениями. В качестве примера рассмотрим два исторических здания, расположенных в Московском районе города: дом Советов и сооружение испытательного гидролотка ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Выполним расчеты оснований данных объектов по рассмотренным нелинейным упругопластическим моделям механики грунтов, а также произведем основные поверочные инженерные расчеты.

1.1. Дом Советов

Дом советов представляет собой кирпичной здание, состоящее из четырех корпусов с соединительными переходами (см. рис. 1.1). Этажность всех корпусов кроме западного составляет 5 этажей, западного 8мь. Фундамент западного корпуса – плита 30х116 м с глубиной заложения 2 м на естественном основании.[3]

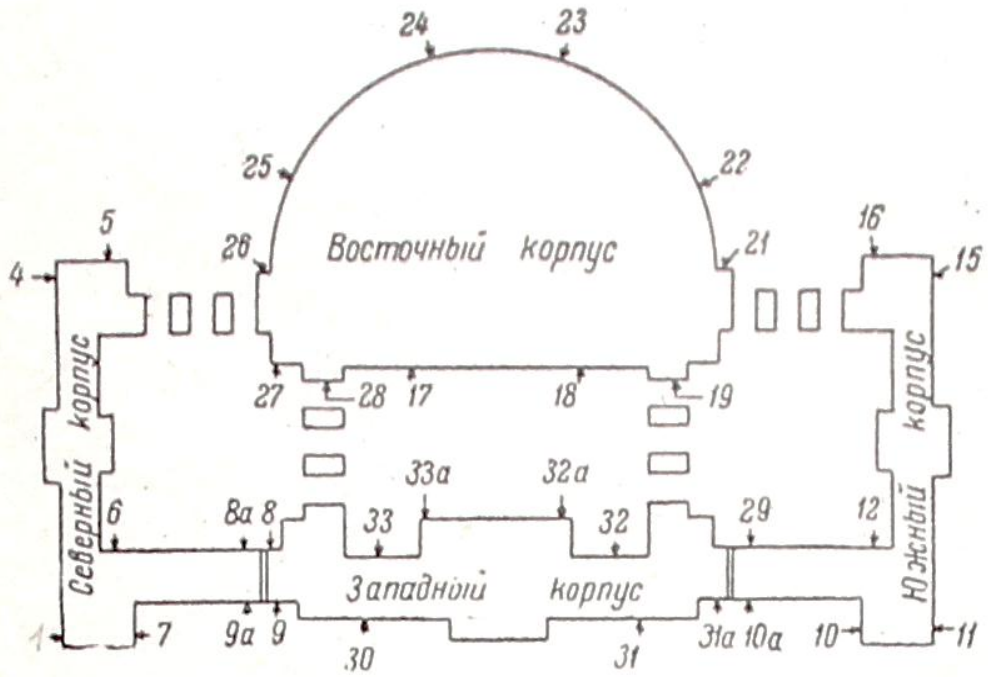

Рисунок 1.1. План 2-го этажа и схема расположения стенных реперов

1.2. Характеристика инженерно-геологических условий площадки

В инженерно-геологическом аспекте площадка сложена слабыми глинистыми грунтами с модулем упругости не превышающими 14 МПа на протяжении всей глубины сжимаемой толщи. Нормативные и расчетные значения физико-механических характеристик грунтов основания и геолого-литологический разрез приведены на рис. 1.2 и в таблице 1.

1.3. Наблюдения за осадками

Согласно записке 3-й архитектурной мастерской ЛенПроекта давление в основании корпусов было принято 125 кПа. Цитович Н.А. в своих расчетах 1939 г. «Исследования грунтов и расчет осадки фундаментов Володарского дома советов в г. Ленинграде» [15] принимал значение в 115 кПа. Это значение представляется сильно заниженным, так как рассматриваемое здание достаточно тяжелое, и западный корпус высотой 39-48,6 м должен создавать давление на основание равное 195-243 кПа (даже при весе 1 кубического метра здания порядка 0,5 т).

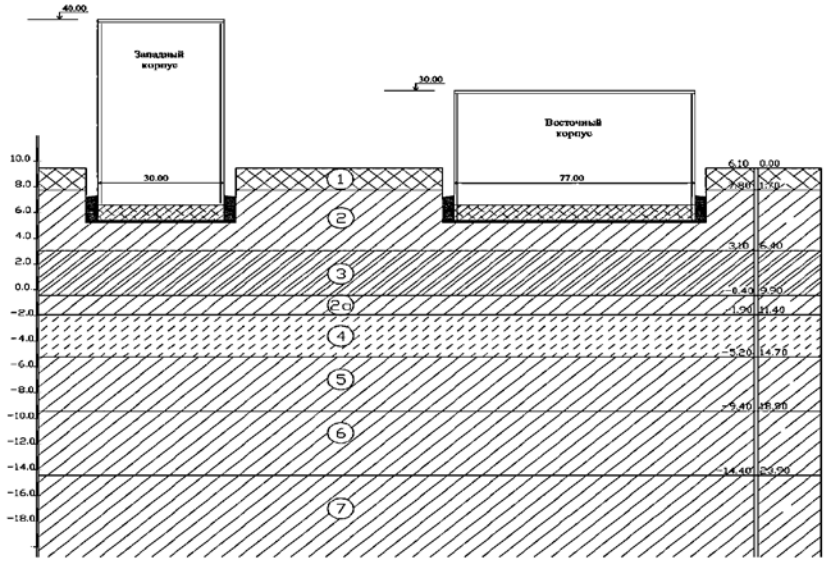

Рисунок 1.2. Геолого-литологический разрез по Западному и Восточному корпусу Дома Советов

Таблица 1. Нормативные и расчетные значения физико-механических характеристик грунтов основания

№ элемента	Наименование грунтов	Геологический индекс	Плотность грунта, г/см^3			Коэффициент пористости	Естественная влажность, д.е.We	Число пластичности	Показатель текучести IL/Cb	Прочностные характеристики						Модуль деформации, МПа кгс/см^2	Коэффициент фильтрации, м/сут $K_ф$
										Угол внутреннего трения, °	Сцепление, МПа кгс/см^2						
			ρ_n	ρ_I	ρ_{II}					φ_n	φ_I	φ_{II}	C_n	C_I	C_{II}		
1	2	3	4	5	6		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Насыпные грунты	t_{IV}	R_0 = 80кМПа (0.8 кгс/см^2)														0.02-2.0

2	Суглинки тугопластичные слоистые	*lg III*	1,98	1,99	1,99	0,722	0,26	0,11	0,27-0,03	5	8	8	0,031 0,31	0,007 0,07	0,031 0,31	6 60	0.05
2а	Суглинки текучепластичные слоистые	*lg III*	1,91	1,92	1,92	0,876	0,32	0,11	0,91 0,18	5	7	7	0,016 0,16	0,007 0,07	0,016 0,16	6 60	0,05
3	Суглинки ленточные текучие	*lg III*	1,78	1,82	1,80	1,132	0,41	0,15	1,20 0,55				0,009 0,09	0,008 0,08	0,009 0,09	5 50	0,02
4	Супеси пластичные	*g III*	2,17	2,18	2,18	0,408	0,14	0,06	0,30 0,33	5	7	7	0.018 0.18	0.012 0.12	0.018 0.18	10 100	0,2
5	Суглинки тугопластичные	*g III*	2,06	2,10	2,07	0,563	0,21	0,11	0,27 0,13	2	5	5	0.030 0.3	0.02 0.2	0.030 0.3	12 120	0,02
6	Суглинки полутвердые	*g III*	2,17	2,18	2,18	0,462	0,17	0,09	0,11 -0,16	4	7	7	0,036 0,36	0,024 0,24	0,036 0,36	14 140	0,02
7	Суглинки плотные	*g III*	2,10	2,12	2,12	0,629	0,18	0,09	0,07 -0,20	7	9	9	0,090 0,9	0.076 0.76	0,090 0,9	17 170	0,02

С целью проверки правильности выбора проектного решения по устройству основания проектируемого здания с момента начала его строительства в 1937 г были организованы систематические наблюдения за его осадками [4]. Для этого по периметру здания было установлено 38 (см. рисунок 1.1) стенных реперов и 9 грунтовых реперов на расстоянии 15-20 м от здания. Установленные реперы были привязаны к городской марке № 1769, которая была расположена на расстоянии около 1 километра (Московский пр. 204 во дворе). Систематические наблюдения за осадками здания производились вплоть до 1963 года, впоследствии основной объем марок был утрачен. Наиболее интересен с геотехнической точки зрения высокий западный корпус. Вблизи входа западного корпуса трестом ГРИИ в рамках общегородских нивелирных работ был установлен нивелирный репер №1413 и определены его абсолютные отметки по результатам нивелирных работ в 1966, 1976, 1985 и 2006 годах. Результаты этих работ позволили построить график абсолютной осадки наиболее высокого западного корпуса за период 1937-2006 г (см. рисунок 1.3).

На графике осадок западного корпуса можно выделить две характерные кривые:

1 кривая – характеризует развитие осадок основания здания за период 1937-1967 г. (30 лет), где окончательная осадка для этого периода составила 40 см.

2 кривая – развитие осадок здания за период 1967-2006 г (69 лет) вследствие влияния какого-либо техногенного процесса, где окончательная осадка составила 60 см. Вероятностными техногенными процессами могут являться подработка в процессе строительства транспортного узла и подземных коммуникаций станции Московская городского метрополитена или устройство инженерных сетей.

По нормам ТСН 50-302-2004 [23] для протяженных кирпичных зданий с каркасом во всех или нескольких этажах предельная осадка для плитного фундамента под все здание составляет 20 см, а предельная относительная разность осадок составляет 0,0015. Соответственно, полученная максимальная осадка западного корпуса, равная 40 см будет в 2 раза превышать допустимые величины. Учитывая вторую ступень графика осадок (на период 2007 г.), предельная величина осадок корпуса превысит допускаемую в 3 раза.

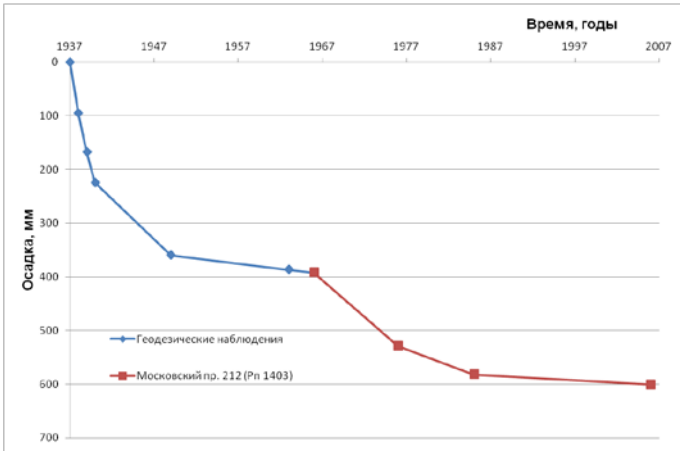

Рисунок 1.3. Графики осадки западного корпуса Дома Советов по результатам нивелирных работ

1.4. Основные поверочные расчеты основания здания

Для оценки возможности применения в данной геотехнической ситуации рассматриваемых методов инженерного расчета осадки, вычислим величину расчетного сопротивления грунта основания фундаментной плиты западного корпуса.

Для инженерной оценки правильности выбора проектных решений выполним основные инженерные расчеты наиболее нагруженного западного корпуса. Сравним результаты вычислений по инженерным методам с расчетной картиной распределения осадок. Инженерные расчеты будем вести в соответствии с требованиями современных норм – расчеты по несущей способности и по деформациям.

К инженерным методам определения осадки основания относятся:

Метод с использованием расчетной схемы в виде линейно деформируемого полупространства по СНиП 2.02.01-83* [20]

Метод с использованием расчетной схемы в виде линейно деформируемого полупространства по СП 22.13330.2011 [22]

Метод линейно-деформируемого слоя К.Е. Егорова [20].

Расчётное сопротивление грунта, определенное по формуле 1, составило 216,9 Па, а среднее давление под подошвой фундамента – 219 кПа.

$$R = \frac{\gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2}}{k} \cdot \left[M_\gamma \cdot k_z \cdot b \cdot \gamma_{II} + M_q \cdot d_1 \cdot \gamma'_{II} + \left(M_q - 1 \right) \cdot d_b \cdot \gamma'_{II} + M_c \cdot c_{II} \right] \qquad (1)$$

Соответственно среднее давление под подошвой фундамента приблизительно равно сопротивлению грунта основания. Следовательно, условно линейная взаимосвязь между нагрузкой и осадкой, допускаемая в инженерных методах вычисления осадки сохраняется.

В результате инженерных расчетов получены значения осадок для западного корпуса равные:

- 36,0 см при глубине сжимаемой толщи = 24,648 м *по СНиП 2.02.01-83*;*
- 30,1 см при глубине сжимаемой толщи = 15,6 м *по СП 22.13330.2011*;
- 35,8 см *по методу К.Е. Егорова*.

Ранее было отмечено, что по результатам наблюдений на 2007 г. западный корпус Дома Советов получил максимальную осадку порядка 60 см. Основной причиной осадки является деформация толщи слабых слоев глинистого грунта, при этом 1/3 доля от общей осадки основания обусловлена внешним техногенным воздействием – предположительно подработкой территории. В этом случае длительная собственная осадка здания составила бы порядка 42-44 см.

Исходя из полученных результатов инженерных расчетов видно, что рекомендуемые современными нормами методы недооценивают абсолютные осадки. Расхождение абсолютных осадок составляет:

- ~ 10 % *по СНиП 2.02.01-83*;*
- ~ 24,6 % *по СП 22.13330.2011*;
- ~ 10,5 % *по методу К.Е. Егорова*.

Для оценки развития осадок здания с учетом нелинейной работы основания применялись численные методы расчета. Расчеты выполнялись в двух программных комплексах Plaxis и Femmodels. Численные исследования развития осадки выполнялись для условий плоской, а также пространственной постановок. Вычисления производились исходя из различных возможных условий работы основания – по дренированной и недренированной схеме работы (без учета развития объемной части деформаций).

1.5. Расчет основания в программе Plaxis

Моделирование работы основания осуществлялось в плоской постановке. Для моделирования использовались 15-ти узловые элементы высокого порядка аппроксимации функции неизвестных смещений. Для вычислений была выбрана наиболее широко применяемая на сегодняшний день в городской геотехнической практике модель Hardening soil model (HSM) [24]. Выбор данной модели обусловлен тем, что в качестве основных ее параметров можно использовать результаты простых одометрических и сдвиговых испытаний (без проведения сложных одометрических испытаний по разным траекториям нагружения).

Расчетная схема задачи из условий плоской деформации массива достаточно протяженного западного корпуса приведена на рис. 1.4. Геологическое напластование соответствует данным инженерно-геологических изысканий (табл. 1).

На рис. 1.5 представлены основные результаты расчета. Из рисунка видно, что длительные осадки западного корпуса по дренированной схеме работы основания с параметрами, определенными из стандартных инженерно-геологических изысканий, составит порядка 40 см. Длительные осадки восточного корпуса по результатам данного расчета составят порядка 240 мм. Вычисленные осадки оказываются достаточно близкими к длительным наблюдаемым (см. рис. 1.3 – первая ступень).

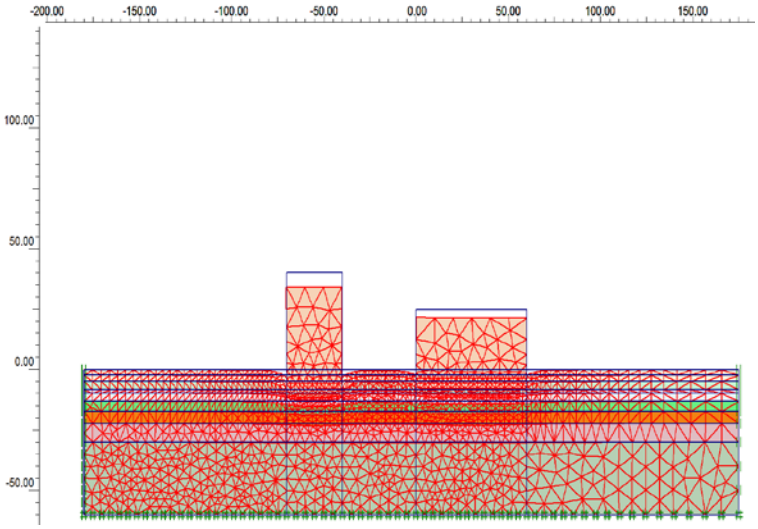

Рисунок 1.4. Деформированная схема. Развитие длительных осадок западного и восточного корпусов Дома Советов. Основание моделируется в плоской постановке 15-узловыми конечными элементами. Модель Hardening Soil Model

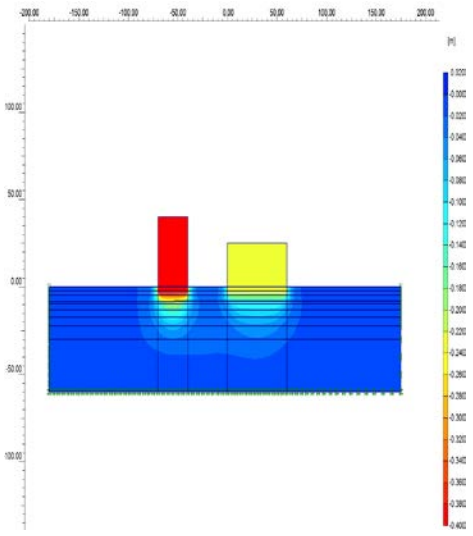

Рисунок 1.5. Изополя осадок западного и восточного корпусов Дома Советов. Расчет Hardening Soil model

1.6. Расчет основания в программе FEM-Models

Для моделирования работы основания в программном комплексе Femmodels были построены схемы в плоской и пространственной постановках. При этом грунтовое основание моделировалось нелинейными объемными конечными элементами со свойствами реологической модели, предложенной для моделирования работы слабых глинистых грунтов А.Г. Шашкиным.[17]

Здание моделировалось упругими конечными элементами с соответствующими жесткостными характеристиками и распределенными весовыми нагрузками. Граничные условия конечноэлементной области – отсутствие горизонтальных и вертикальных смещений.

Используемые расчетные схемы здания в плоской и пространственной постановках показаны на рисунках 1.6 – 1.7.

Грунтовое основание принималось в соответствии с данными инженерно-геологических изысканий (табл. 1). Номера слоев грунта на схемах соответствуют данным инженерно-геологических изысканий.

По результатам численных исследований:

Средняя длительная осадка наиболее нагруженного западного корпуса составила 40,0 см (см. рис.1.6);

Средняя длительная осадка южного корпуса составила 18,0 см (см. рисунок 1.7);

Средняя длительная осадка восточного корпуса составила 26,0 см (см. рисунок 1.7);

По результатам численных методов можно отметить, что осадка, вычисленная для условий плоской и пространственной задач, оказывается практически одинаковой, что свидетельствует о точности выполненных вычислений.

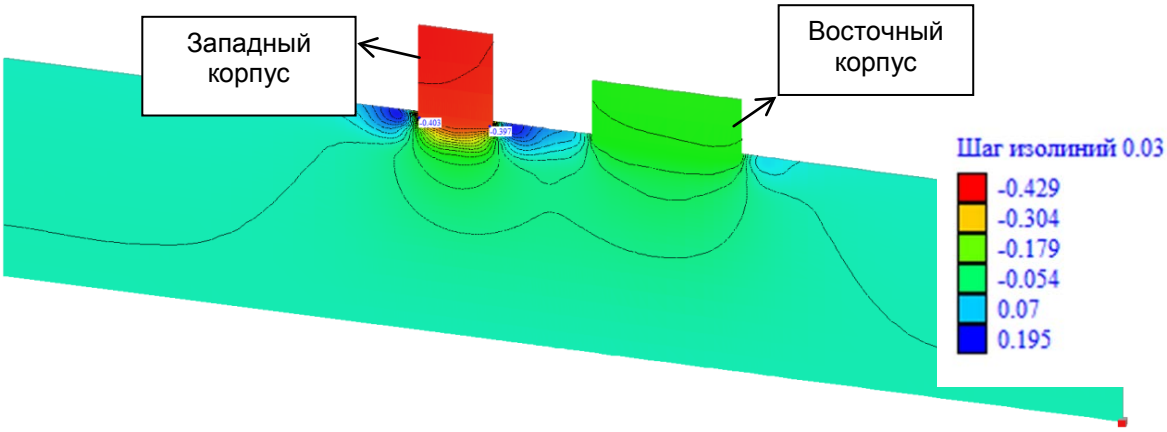

Рисунок 1.6. Осадка (м) западного и восточного корпусов Дома Советов. Плоская нелинейная задача

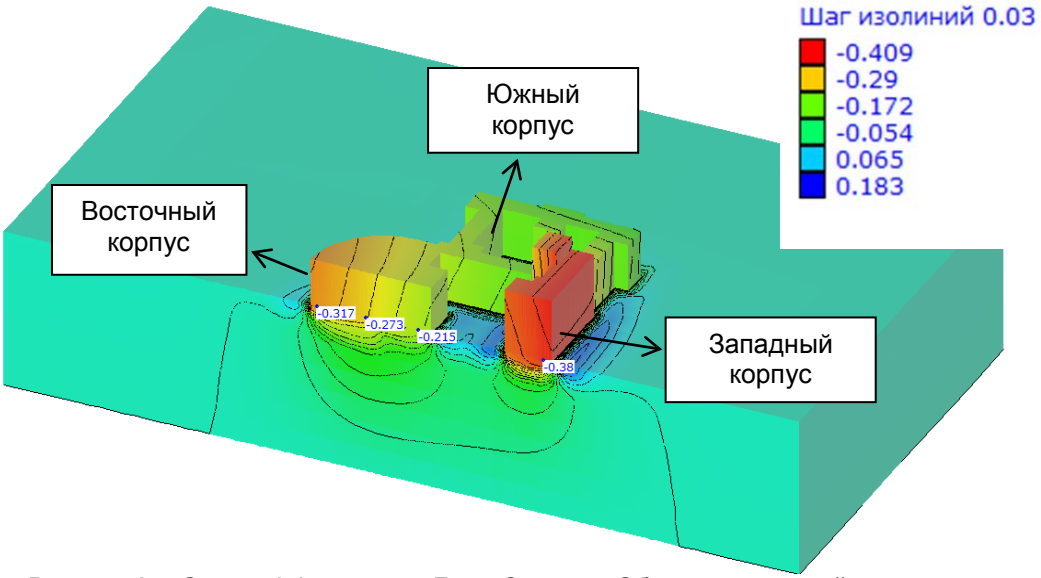

Рисунок 1.7. Осадка (м) корпусов Дома Советов. Объемная нелинейная задача. Представлена половина расчетной схемы

На рисунке 1.8 приведено наложение графиков развития осадки во времени западного корпуса Дома Советов на протяжении 70 лет по данным натурных наблюдений и результатам численного расчета с учетом моделирования работы основания упруговязкопластической моделью [18].

Из рисунка 1.8 видно, что численный прогноз точно соотносится с данными натурных наблюдений (до момента возможного техногенного воздействия вследствие которого с 1967 года осадка западного корпуса получила дальнейшее развитие).

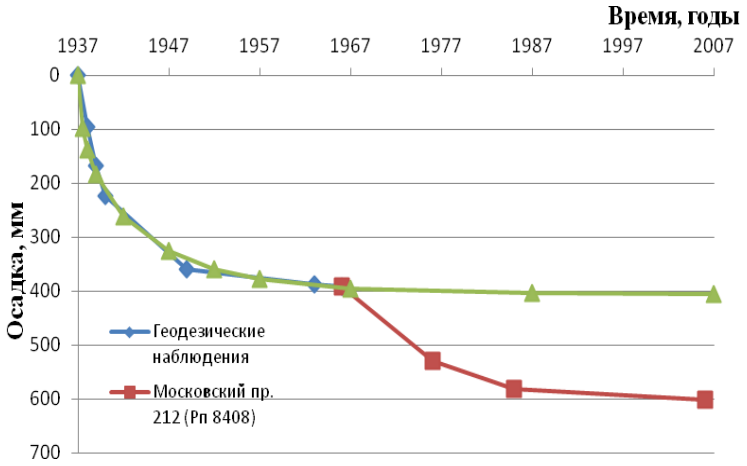

Рисунок 1.8. Графики сравнения вычисленной осадки (мм) западного корпуса Дома Советов с результатами длительных наблюдений. Вычисления на основе реологической модели [17]

Можно отметить совпадение результатов расчета длительной осадки здания с помощью модели HSM в Plaxis и нелинейной упруговязкопластической модели, реализованной в программном комплексе Femmodels. В первом случае, развитие осадок здания моделировалось с учетом дренированного характера работы основания, во втором – недренированные условия работы. В обоих случаях практическое совпадение результатов обусловлено достаточно низкими сдвиговыми модулями слабых глинистых отложений, за счет которых и происходит развитие основной доли осадок.

2. Сооружение №15 испытательного гидролотка комплекса ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова

Здание испытательного бассейна им. Крылова представляет собой главный корпус из сборного ж/б и пристройки. Главный корпус, высотой 40 метров, разделен деформационными швами на три разнонагруженные секции и имеет плитный фундамент на естественном основании, с глубиной заложения 4,6 м.[13]

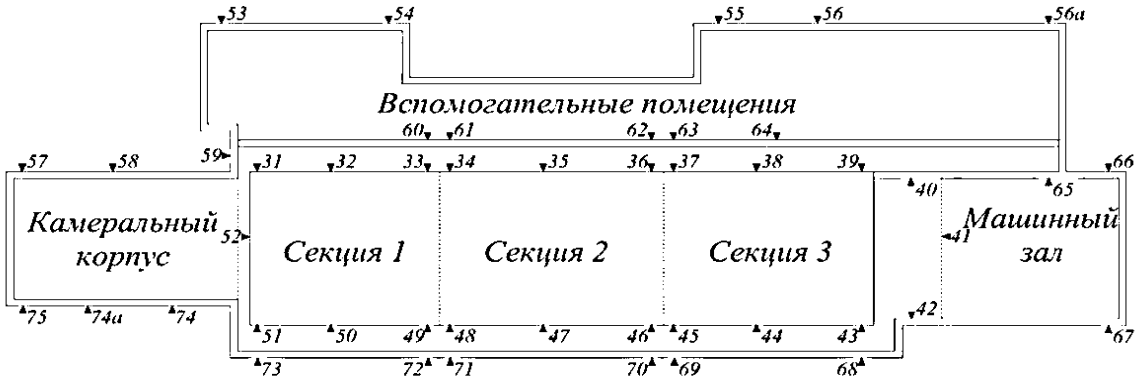

Рисунок 2.1 Схематический план объекта № 15 комплекса сооружений ЦНИИ им. Академика Крылова А.Н. (треугольниками отмечены места устройства геодезических знаков и реперов)

2.1. Характеристика инженерно-геологических условий площадки

В инженерно-геологических условиях здание стоит на слабых глинистых грунтах, см. таблицу 2, что можно судить по карте статического зондирования рис. 2.2, по которому предельное сопротивление грунта непосредственно под подошвой составляет 50 кПа (1*1000/19=52).

Таблица 2. Нормативные и расчетные значения физико-механических характеристик грунтов основания

№ элемента	Наименование грунтов	Геологический индекс	Плотность грунта, г/см^3			Коэффициент пористости **e**	Естественная влажность д.е. **We**	Число пластичности **Ip**	Показатель текучести **IL|Cb**	Прочностные характеристики				Модуль деформации, МПа кгс/см^2 **E**		Коэффициент фильтрации, м/сут **$K_ф$**	Метод определения характеристик	
										Угол внутреннего трения, °	Сцепление, МПа кгс/см^2							
			$ρ_n$	**$ρ_I$**	**$ρ_{II}$**					**$φ_n$**	**$φ_I$**	**$φ_{II}$**	**C_n**	**C_I**	**C_{II}**			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	Насыпные грунты	t_{IV}	R_0 = 0.12 МПа (1.2 кгс/см^2)													2,0	СНиП 2.02.01-83 прил.3, табл.5	
2	Заторфованные грунты	b_{IV}	-	-	-	-	0,58	-		В качестве основания не рекомендуются				4 / 40		0.1	Е – СП 50-101-2004, пр.Г,т.Г.4	
3а	Супеси пластичные	lg_{III}	2,09	2,07	2,09	0,537	0,19	0,06	0,50 / 0,21	6	3	6	0,015 / 0,15	0,010 / 0,10	0,015 / 0,15	1 / 10	0,05	φ, С – СНиП 2.02.01-83 прил.1, табл.1Е – ТСН 50-302-2004, пр.Е, рис. Е4
3	Суглинки тугопластичные с просл.и полутвердых	lg_{III}	2,00	1,95	1,97	0,739	0,27	0,13	0,36 / 0,09	7	6	7	0,020 / 0,20	0,019 / 0,19	0,020 / 0,20	1 / 10	0,005	φ, С, Е – лаб. данные
4	Суглинки мягкопластичные с просл.и текучепластичных	lg_{III}	1,99	1,96	1,97	0,732	0,27	0,11	0,71 / 0,28	4	3	4	0.015 / 0.15	0.014 / 0.14	0.015 / 0.15	6 / 0	0,05	φ, С, Е – лаб. данные
5	Суглинки тугопластичные	g_{III}	2,06	2,05	2,05	0,604	0,22	0,09	0,45 / 0,20	19	8	9	0.025 / 0.25	0.024 / 0.24	0.025 / 0.25	2 / 20	0,005	φ, С, Е – лаб. данные

6	Супеси пластичные	g_{III}	2,17	2,15	2,17	0,439	0,16	0,05	0,36 0,08	8	4	8	0,019 0,19	0,013 0,13	0,019 0,19	2 20	0,05	φ, С – СНиП 2.02.01-83 прил.1, табл.1 Е – ТСН 50-302-2004, пр.Е, рис. Е4
7	Суглинки мягкопластичные	g_{III}	2,06	2,05	2,05	0,629	0,23	0,09	0,59 0,35	5	4	5	0,023 0,23	0,022 0.22	0,023 0,23	0	0,05	φ, С, Е – лаб. данные
8	Суглинки тугопластичные и полутвердые	g_{III}	2,06	2,03	2,04	0,609	0,22	0,11	0,27 0,14	3	0	3	0.031 0.31	0.021 0.21	0.031 0.31	2 20	0,005	φ, С – СНиП 2.02.01-83 прил.1, табл.1 Е – ТСН 50-302-2004, пр.Е, рис. Е4
8а	Валунный грунты с суглинистым заполнителем до 30%	g_{III}	R_0 = 0.45 МПа (4.5 кгс/см^2)													0,05	СНиП 2.02.01-83 прил.3, табл.1	
9	Глины твердые, Дислоц.	ϵ_1	2,11	2,10	2,10	0,586	0,21	0,18	-0,23 <0,27	4	3	4	0.062 0.62	0.058 0.58	0.062	7 70	0,002	φ, С, Е – лаб. данные
10	Глины твердые	ϵ_1	2,14	2,13	2,13	0,533	0,19	0,17	-0,39 <0,27	8	7	8	0.074 0.74	0.070 0.70	0.074 0.74	3 30	0,002	φ, С, Е – лаб. данные

В соответствии с заданием на проектирование во время частичного сноса конструкций пристроек в 2011 г. были выполнены новые инженерно-геологические изыскания [13]. Имея результаты изысканий на площадке выполненные в 1958, 1965 и 2011 гг разными изыскательскими организациями интересно выполнить сравнение основных физических свойств грунтового массива на площадке. На рис. 2.3 приведены зависимости изменения влажности и плотности с глубиной по данным этих изысканий. Можно отметить практически полное совпадение данных физических характеристик по материалам всех трех изысканий. Однако с учетом развития значительной величины осадок величины плотности и влажности должны были измениться в соответствие с теорией фильтрационной консолидации грунтового массива, чего не наблюдается (возможно, вследствие погрешностей определения физических свойств). В этой связи развитие значительной доли осадок может быть приурочено к развитию деформаций сдвига/формоизменения в грунтовом массиве, что больше соотносится с условиями недренированной работы массива слабого водонасыщенного глинистого грунта (малости общей величины объемных деформаций).

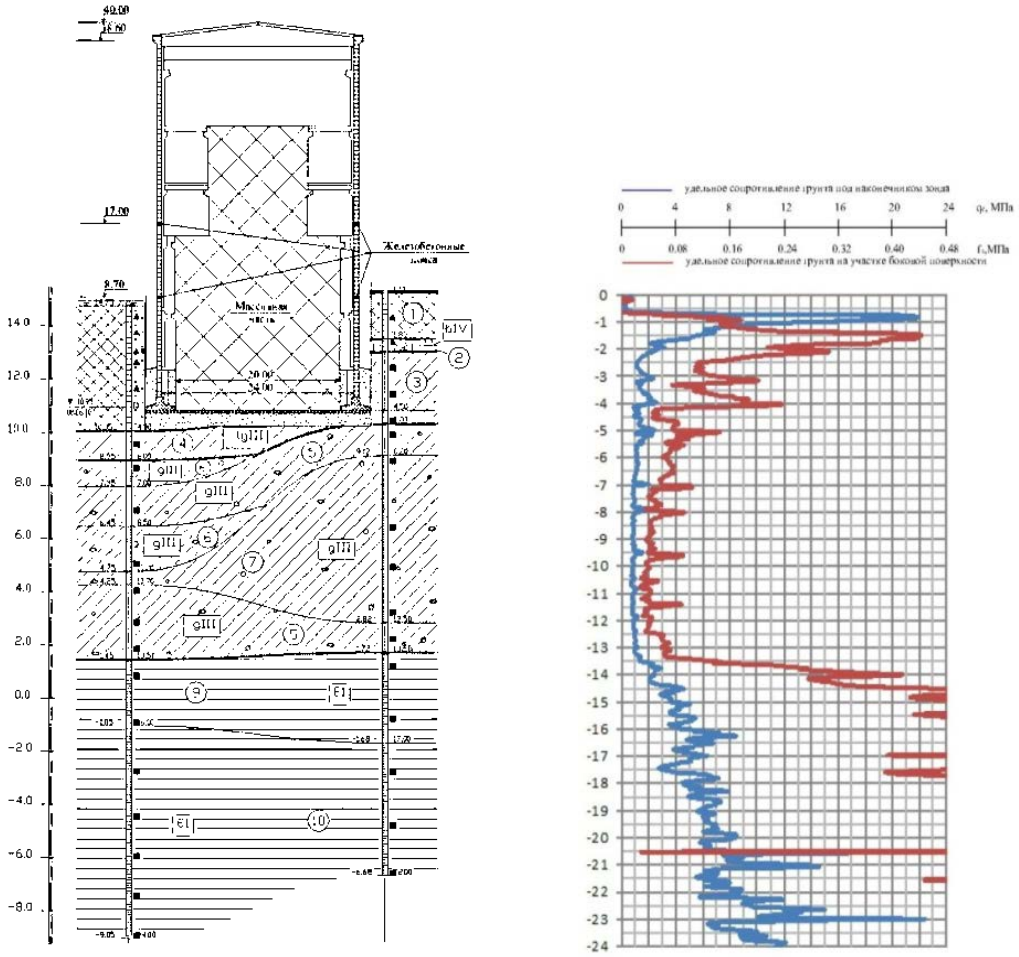

Рисунок 2.2. Конструкции здания (поперечный разрез в зоне секции №2) в привязке к инженерно-геологическим условиям участка

2.2. Геотехнический анализ результатов инженерно-геологических изысканий и геодезических наблюдений.

За 32 года наблюдений с 1960 по 1992 год максимальная величина осадки испытательного бассейна наблюдалось для секции 3 и составила 628 мм (марка 39), минимальная 386 мм (марка 48) – для секции 2.Очевидно, что данные величины осадок многократно превысило допуски. Спустя более 50 лет после строительства величина осадок увеличилась и, вероятно, превысила 800-900 мм. Такое увеличение осадок, отчасти было связано еще и с увеличением нагрузок на основание при проведении гидродинамических испытаний (см. рис. 2.4.).

2.3. Основные поверочные расчеты основания здания

После выполнения основных поверочных инженерных расчетов основания испытательного бассейна, оказалось, что среднее давление под подошвой фундамента, вычисленное по формуле 1 и равное 410 кПа, превышает расчетное сопротивление грунта основания, равное 364 кПа. Следовательно, по краям фундамента развиваются существенные области пластической деформации (по глубине больше 1/4 ширины подошвы фундамента), что нарушает изначально принятую линейную зависимость между напряжениями и деформациями. Соответственно считать осадку инженерными методами по СНиП 2.02.01-83* будет некорректно (тем более для условий дополнительного давления от веса воды в каналах). Поэтому в данном случае мы обошлись только численными расчетами осадок.

Задачи о деформировании грунтового массива в основании испытательного бассейна решались в программных комплексах PLAXIS [26] и FEM-Models [18], исходя из предположений о дренированном и недренированном характере работы основания.

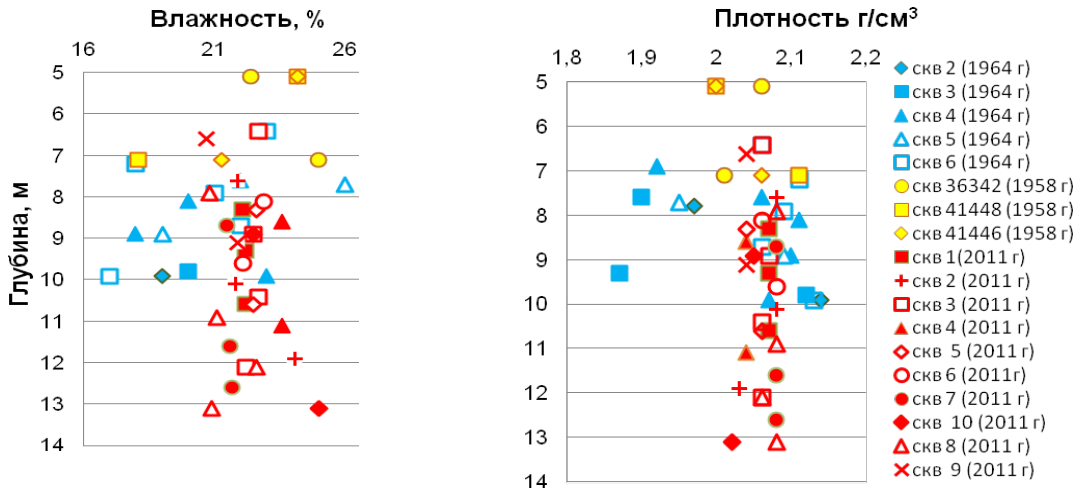

Рисунок 2.3. Зависимость влажности (%) и плотности (г/см^3) от глубины, определенные по результатам изысканий 1958, 1964 и 2011 гг.

2.4. Расчет основания в программе PLAXIS

Моделирование работы основания осуществлялось в плоской постановке. Для моделирования использовались 15-и узловые элементы высокого порядка аппроксимации функции неизвестных смещений. Для вычислений также была выбрана наиболее широко применяемая на сегодняшний день в городской геотехнической практике модель Hardening soil model (HSM) [24] .

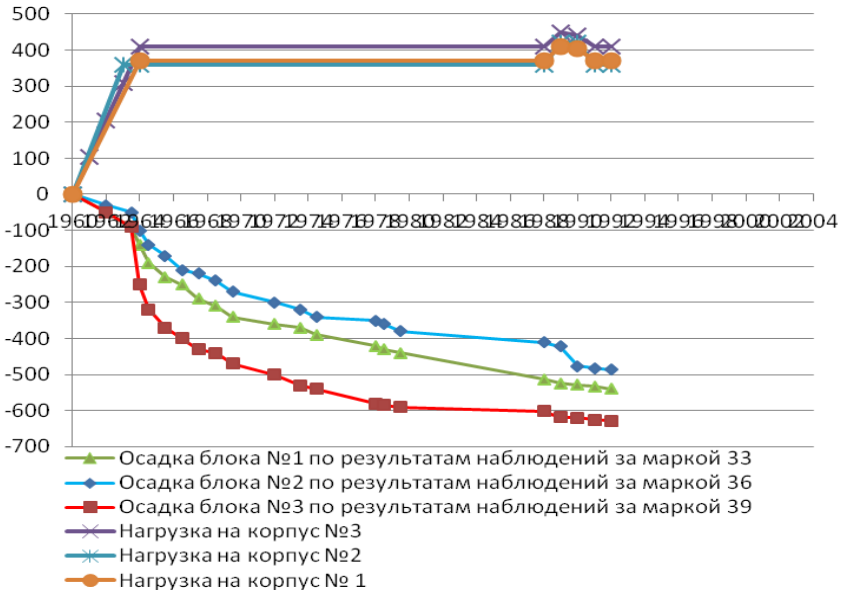

Рисунок 2.4. Зависимость осадки от нагрузок за период наблюдений с 1960 по 1992 года за гидролотком и марки 42 (машинный зал) до 2004 года

Последовательно решалась серия из трех задач для каждого из секций испытательного бассейна. Для выполнения расчетов использовались одометрические модули, полученные по результатам компрессионных испытаний (см. табл. 2 и рис. 2.2). На рис.2.5 – 2.10 представлены основные результаты расчетов, которые включают деформированную схему, изолинии вертикальных компонент грунтового массива для каждой секции испытательного бассейна.

По результатам расчетов максимальная осадка составила для:

- 1 секции – 565 мм;
- 2 секции – 513 мм;
- 3 секции – 660 мм.

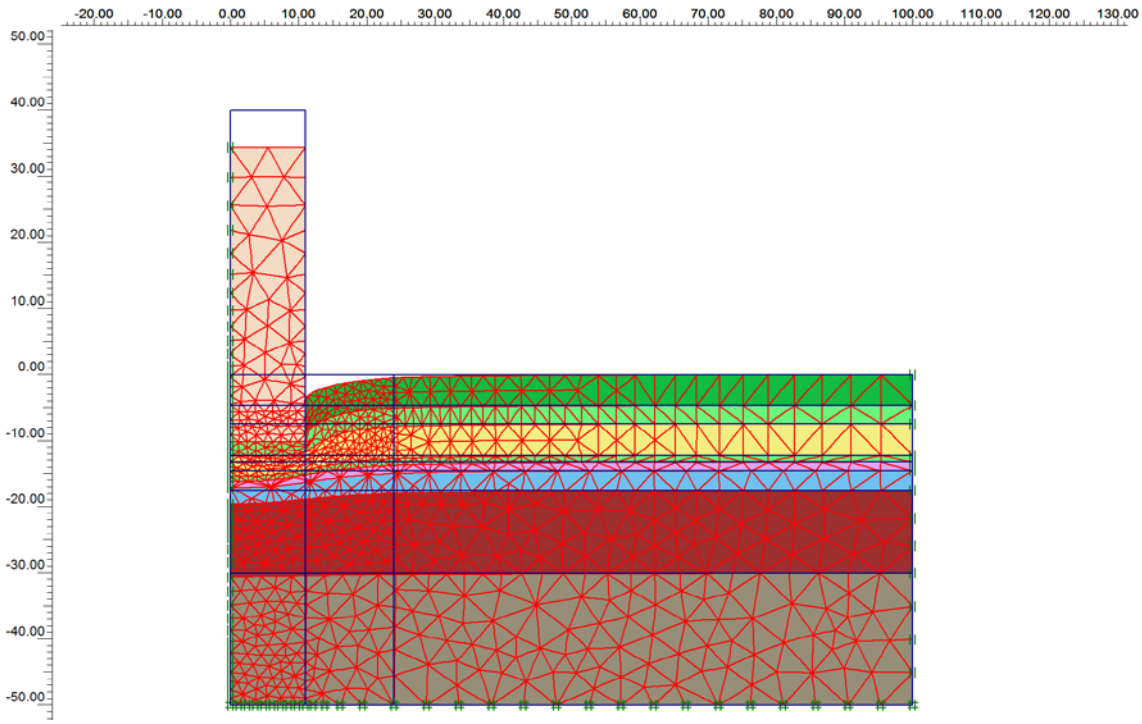

Рисунок 2.5. Деформированная схема. Развитие длительных осадок 1 секции испытательного гидролотка ЦНИИ им. акад. Крылова. Представлена половина расчетной схемы. Основание моделируется в плоской постановке 15-узловыми конечными элементами. Модель Hardening Soil Model

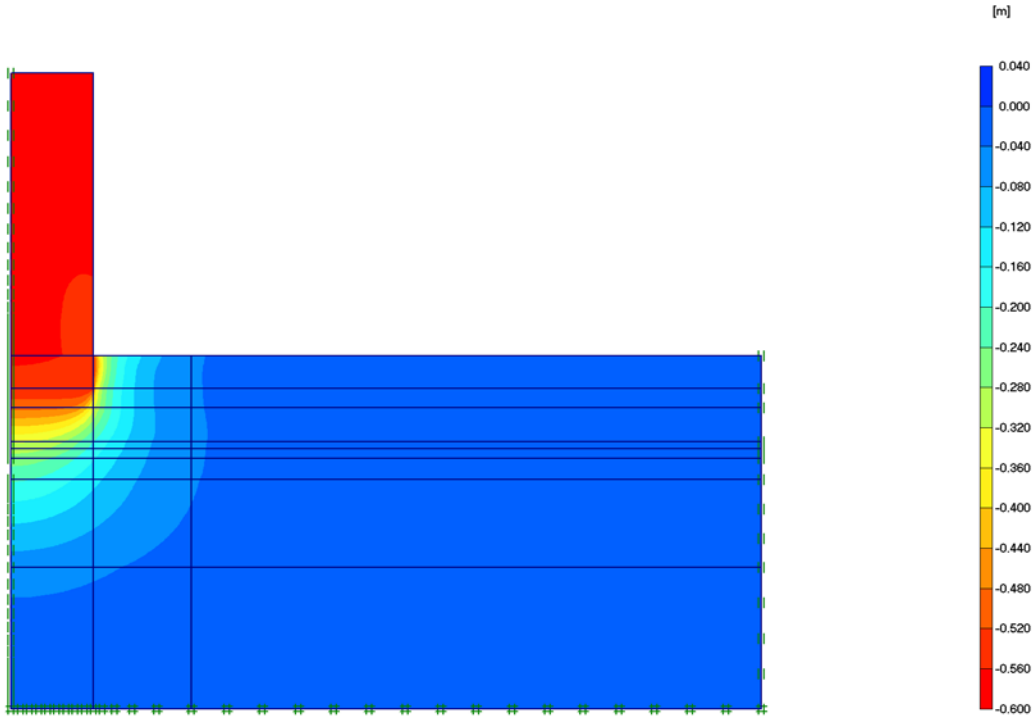

Рисунок 2.6. Изополя осадок (м) 1 секции испытательного гидролотка ЦНИИ им. акад. Крылова. Расчет Hardening Soil model. Максимальная осадка 565 мм

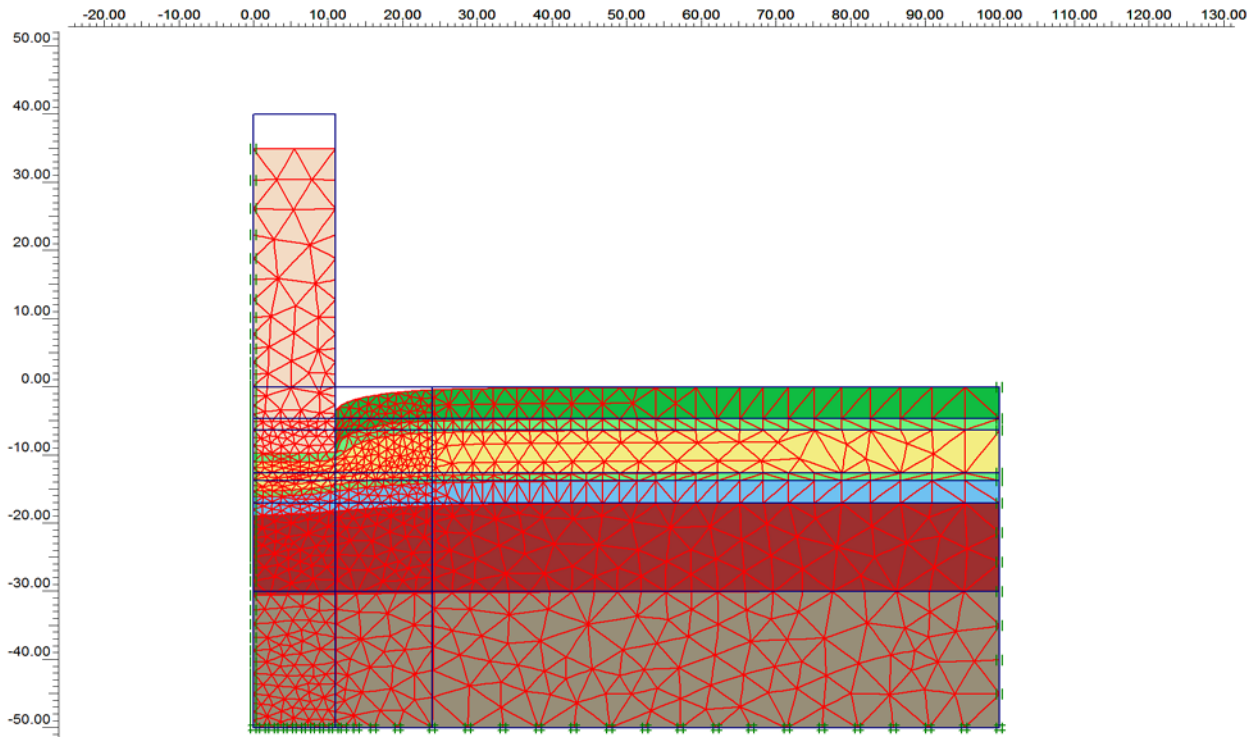

Рисунок 2.7. Деформированная схема. Развитие длительных осадок 2 секции испытательного гидролотка ЦНИИ им. акад. Крылова. Представлена половина расчетной схемы. Основание моделируется в плоской постановке 15-узловыми конечными элементами. Модель Hardening Soil Model

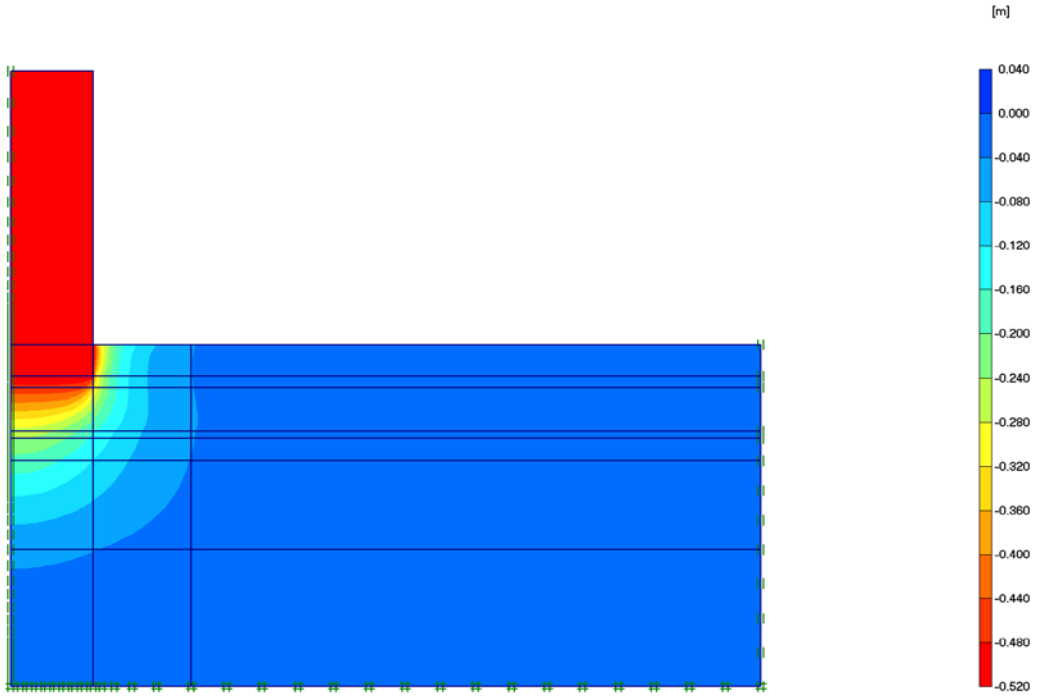

Рисунок 2.8. Изополя осадок (м) 2 секции испытательного гидролотка ЦНИИ им. акад. Крылова. Расчет Hardening Soil model. Максимальная осадка 513 мм

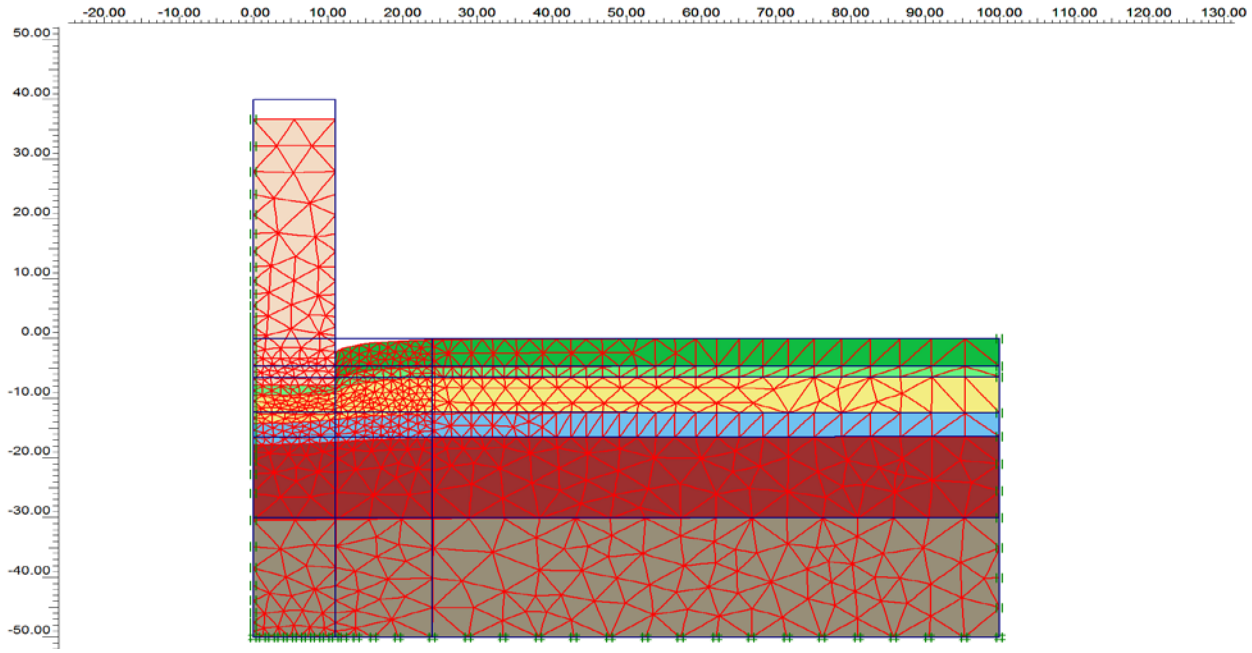

Рисунок 2.9. Деформированная схема. Развитие длительных осадок 3 секции испытательного гидролотка ЦНИИ им. акад. Крылова. Представлена половина расчетной схемы. Основание моделируется в плоской постановке 15-узловыми конечными элементами. Модель Hardening Soil Model

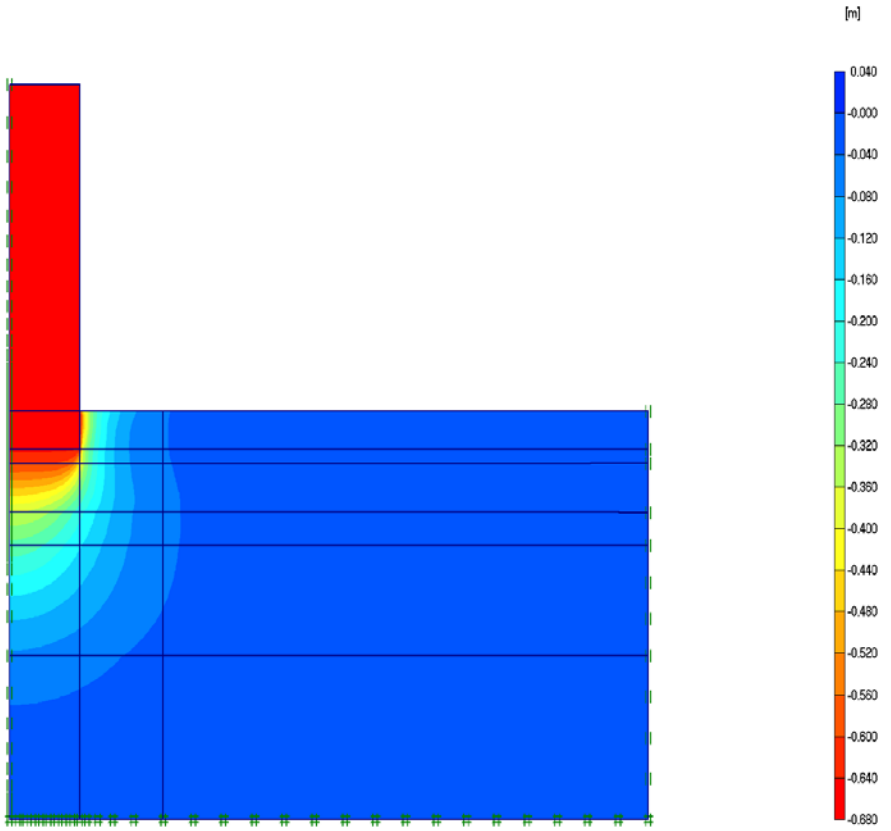

Рисунок 2.10. Изополя осадок (м) 3 секции испытательного гидролотка ЦНИИ им. акад. Крылова. Расчет Hardening Soil model. Максимальная осадка 660 мм

2.5. Расчет основания в программе FEM-Models

Для моделирования работы основания с помощью МКЭ были построены схемы трех секций в плоской постановке. При этом грунтовое основание моделировалось нелинейными объемными конечными элементами со свойствами реологической модели, предложенной для моделирования работы слабых глинистых грунтов А.Г. Шашкиным.[17]

Отдельные секции испытательного бассейна моделировались упругими конечными элементами с соответствующими жесткостными характеристиками и распределенными весовыми нагрузками. Граничные условия конечноэлементной области – отсутствие горизонтальных и вертикальных смещений. Номера слоев грунта на схемах соответствуют данным инженерно-геологических изысканий (см. табл.2).

Основные результаты численных расчетов приведены на рис. 2.11 – 2.13:

- средняя длительная осадка 1 секции составляет 535 мм;
- средняя длительная осадка 2 секции составляет 410 мм;
- средняя длительная осадка 3 секции составляет 619 мм.

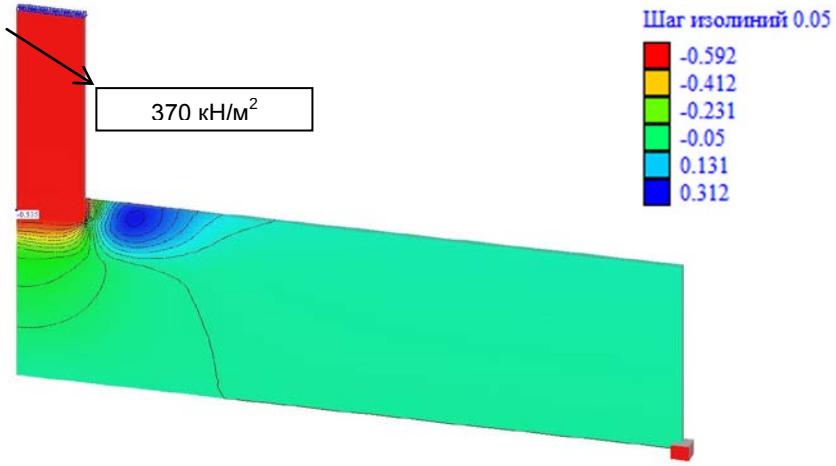

Рисунок 2.11. Изолинии осадок (м) секции №1. Плоская задача

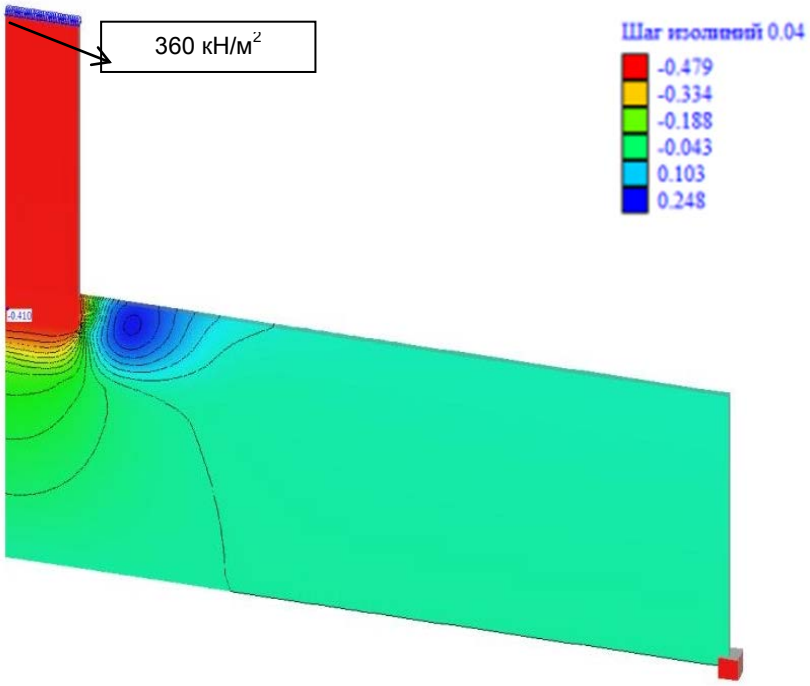

Рисунок 2.12. Изолинии осадок (м) секции №2. Плоская задача

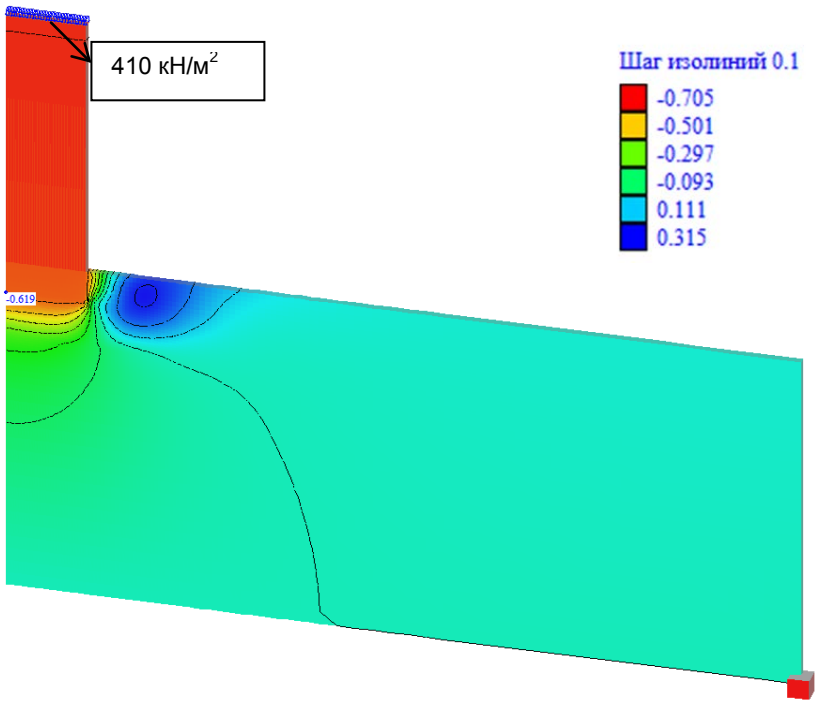

Рисунок 2.13. Изолинии осадок (м) секции №3. Плоская задача

На рисунке 2.14 приведены соответствующие графики развития осадок секций во времени по результатам решения упруговязкопластических [19] задач в программном комплексе Femmodels. Можно отметить, что по результатам решения графики осадок во времени достаточно неплохо совпадают с результатами длительных геодезических наблюдений. Исключение составляют участки графиков, где производились гидродинамические испытания. Данное сочетание воздействий не моделировалось вследствие точной неопределенности количества и времени действия данного сочетания нагрузок.

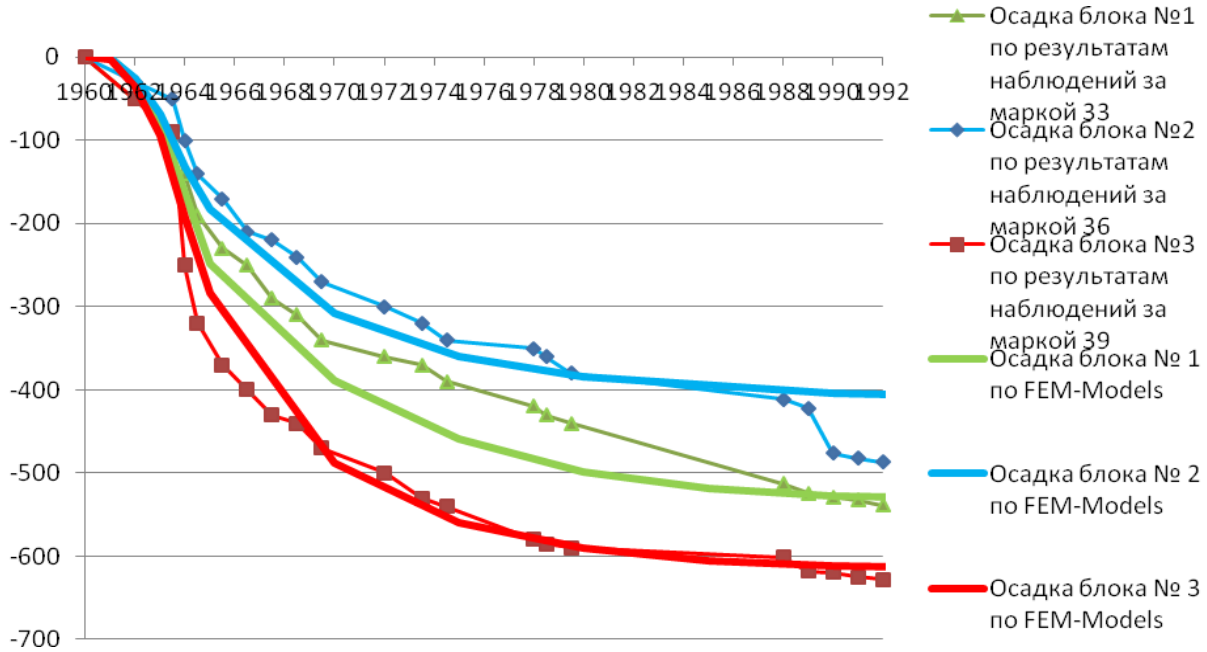

Рисунок 2.14. Графики сравнения осадок секций № 1-3 испытательного бассейна по результатам моделирования основания упруговязкопластической моделью в программном комплексе Femmodels с результатами длительных натурных наблюдений

Выводы и рекомендации

1. При строительстве зданий на слабых грунтах оценку осадок лучше производить с использованием численных методов с применением специализированных моделей работы слабых грунтов основания.
2. Для оценки развития деформаций следует использовать метод послойного суммирования со стандартным ограничением глубины сжимаемой толщи, предусмотренный в СНиП 2.02.01.83* - для фундаментов на естественном основании. Применение метода расчета осадок для фундаментов на естественном основании, представленного в СП 22.13330.2011, в условиях залегания слабых глинистых отложений, характерных для центральной части Санкт-Петербурга и примыкающих районов, не рекомендуется.
3. По результатам серии длительных наблюдений за серией объектов, возведенных в разное время на естественном основании на слабых грунтах, с давлениями на основание превосходящими 200 кПа отмечено, что развитие осадок продолжается десятилетиями и со временем слабо стабилизируется.
4. Основной вклад в развитие осадок оснований, сложенных слабыми глинистыми грунтами, вносят деформации формоизменения/сдвига.
5. Использование для исследований длительных натурных наблюдений является необходимым, поскольку позволяет оценить точность геотехнических прогнозов с применением различных моделей механики грунтов. На основе верификации с данными натурных наблюдений необходимо дальнейшее развитие реологических моделей учитывающих длительные сдвиговые деформации, а также коэффициенты релаксации (на стадии ползучести). Данный вопрос является весьма актуальным для условий Санкт-Петербурга, т.к. весь исторический центр построен на естественном основании на слабых глинистых грунтах. Разработка таких моделей будет также актуальна для расчетов деформаций ограждений котлованов, а также оценки осадок связанных с подработкой при строительстве подземных сооружений городского метрополитена и прокладке глубоких инженерных сетей коммуникаций.

Литература

1. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
2. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. М.: Стройиздат, 1979. 361 с.
3. Далматов Б. И. Осадки фундаментов многоэтажного здания // Научные труды ЛИСИ. Выпуск 18 Вопросы механики грунтов. Л.: Изд-во ЛИСИ, 1954.
4. Далматов Б. И., Сотников С. Н. Промежуточный отчет по научно-исследовательской теме Исследование осадок сооружения на объекте ЦНИИ им. Академика Крылова». Л.: ЦНИИ им. Академика Крылова, 1965. 67 с.
5. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга / Дашко Р. Э., Александрова О. Ю., Котюков П. В., Шидловская А. В. // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. С. 25-71.
6. Иовчук А. Т. Некоторые особенности проектирования гражданских зданий на сильно сжимаемых грунтах: Дис. на соиск. учен. степ. к.т.н.: Ленинград, 1964. 179 с.
7. Лучкин М. А. Учет развития деформаций основания во времени при совместном расчете системы «основание-фундамент-здание»: Дис. на соиск. учен. степ. к.т.н.: Спец. 05.23.02. СПб., 2007. 162 с.
8. Маслов Н. Н. Механика грунтов в практике строительства. М.: Стройиздат, 1977. 320 с.
9. Маслов Н. Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. М.: Стройиздат, 1982. 511 с.
10. Отчет об инструментальных наблюдениях за осадками фундаментов объекта №15 ЦНИИ им. Академика А.Н. Крылова. Л.: Фундаментпроект, 1992. 5 с.
11. Сотников С. Н. Строительство и реконструкция фундаментов зданий и сооружений на слабых грунтах: Дис. на соиск. учен. степ. д.т.н.: М., 1987. 406 с.
12. Сотников С. Н. Строительство и реконструкиця фундаментов зданий и сооружений на слабых грунтах: Автореф дисс. д-ра техн. наук. М., 1987. 50 с.
13. Технический отчет о результатах инженерно-геологических изысканий для проектирования строительства ледового опытового бассейна на территории ФГУП «ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова» по адресу: Санкт-Петербург, Московский административный район, Московское шоссе, д. 44. – СПб.: ЛенТИСИЗ, 2010. 57 с.

14. Расчет осадок зданий и сооружений на слабых глинистых грунтах с учетом развития деформаций сдвига во времени / Улицкий В. М, Шашкин А. Г., Шашкин К. Г., Лучкин М. А. // Развитие городов и геотехническое строительство. 2007. № 11. С. 11-55.
15. Цытович Н. А., Поляков А. П., Евгеньев Н. С. Отчет об исследованиях грунтов и расчете осадки фундаментов Володарского дома советов в г. Ленинграде. Л.: 1939. 44 с.
16. Цытович Н. А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для вузов. М.: Высш. Шк., 1983. 288 с.
17. Шашкин А. Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. №13. С.174-205.
18. Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Упруго-вязко-пластическая модель структурно-неустойчивого глинистого основания // Реконструкция городов и геотехническое строительство. № 9. С. 221-228.
19. Шашкин А. Г. Описание деформационного поведения глинистого грунта с помощью вязко-упруго-пластической модели // Инженерная геология. 2010. №24. С. 22-32.
20. СНиП 2.02.01-83* Основания зданий и сооружений.
21. СП 50-101-2004 Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений.
22. СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений.
23. ТСН 50-302-2004 Проектирование фундаментов зданий и сооружений.
24. Brinkgreve R. B. J., Balkema A. A. // Plaxis Bulletin, Vol. 8. 2002.
25. T. Schanz, P. A. Vermeer, and P. G. Bonnier. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, chapter Fotmulation and verification of the Hardening-Soil Model. Balkema, Rotterdam: 1999. Pp. 281-290.
26. Scott C. R., Soil Mechanics and Foundations // Applied Science Publishers, London, 1978. 401p.
27. D. Waterman, W. Broere. Practical application of the Soft Soil Creep model. Plaxis Bulletin. 2011. Vol. 15. Pp. 1-15.