

## ОТ РЕДАКЦИИ

По просьбе редакции журнала «Реконструкция городов и геотехническое строительство» настоящую статью по актуальной тематике – реконструкции исторического памятника архитектуры представили два крупнейших западных специалиста.

Алан Паудэрхэм (Великобритания) является директором крупной компании Mott MacDonald и одним из разработчиков метода наблюдений, который принят в качестве нормативного метода контроля и мониторинга строительства в европейских геотехнических нормах – Еврокоде 7. В июне 2004 г. А. Паудэрхэм прочел цикл лекций о применении наблюдательного метода при строительстве крупнейших сооружений.

Ральф Пек (США) – почетный профессор Инженерного колледжа Университета штата Иллинойс, выдающийся специалист,

получивший мировое признание благодаря своим достижениям в области геотехники.

Во время работ по строительству чикагского метро в начале 1940-х гг. он проявил себя как выдающийся ученый, теоретик и практик в области механики грунтов и фундаментостроения.

В 1948 г. совместно с К. Терцаги он опубликовал знаменитую книгу «Механика грунтов в инженерной практике», по которой учатся уже несколько поколений геотехников.

Профессор Р. Пек принимал активное участие в крупнейших геотехнических проектах по всему миру, таких как строительство трубопровода через Аляску, создание систем скоростного транспорта в Чикаго, Сан-Франциско, Вашингтоне, возведение дамб в Турции и Греции, а также на Мертвом море в Израиле.

В 1974 г. Президент США Дж. Форд вручил профессору Р. Пек национальную награду за выдающиеся достижения в науке.

## ТЕАТРАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ЧИКАГО ВНОВЬ РАСПАХНУЛ СВОИ ДВЕРИ<sup>1</sup>

*А. ДЖ. ПАУДЕРХЭМ – директор компании «Mott MacDonald», Кройдон, Великобритания.*

*Р. ПЕК – почетный профессор, Университет Штата Иллинойс, Альбукерке, США.*

В истории строительства фундаментов в Чикаго театральный комплекс занимает особое место. Об этой площадке строительства писали Пек (Peck, 1948, 1955), Скемптон (Skempton, 1956) и Макдоналд (MacDonald, 1955). Несмотря на обширные геологические испытания и усилия проектировщиков к окончанию строительства в 1890 г. здание осело примерно на 300 мм. Из-за продолжающегося воздействия неблагоприятных факторов в XX в. величина общей осадки здания превысила 700 мм. В середине 1920-х гг. это стало причиной судебных тяжб, так как зданию грозило разрушение. В 1931 г. обсуждался вопрос о сносе здания, но снос был отложен из-за очень высокой стоимости работ. Несмотря на все перипетии это замечательное здание продолжало эксплуатироваться и, в конце концов, пережило второе рождение (Siry, 2002, Resurrection of a Masterpiece, 1967). В статье рассматриваются вопросы разработки и реализации проекта фундамента, а также реакции здания на осадку.

## ВВЕДЕНИЕ

После пожаров в Чикаго в 1871–1915 гг. проектирование фундаментов развивалось особенно активно. Именно в этот период разрабатывались многие современные методы фундаментостроения. Строительство зрительного комплекса в конце 1880-х гг. стало поворотным моментом в развитии этих технологий. Это был первый большой заказ ныне знаменитой архитектурной фирмы Адлера и Салливана. Луи Салливан занимался разработкой архитектурного облика сооружения. Круг профессиональных интересов его старшего коллеги инженера Данкмара Адлера (Dankmar Adler) был исключительно широк, он занимался вопросами конструкций, механики, гидравлики и акустики. Благодаря его знаниям была создана исключительная акустическая система театра. Особое внимание он уделил проектированию и строительству фундамента, в процессе работы он консультировался у генерала Уильяма Суи Смита (William Sooy Smith).

Адлер хорошо представлял современный уровень развития технологий и следовал рекомендациям старейшего архитектора Чикаго Фредерика Бауманна (Frederick Baumann), изложенным в инструкции об искусстве проектирования фундаментов «Метод изолированных опорных конструкций» (Daumann, 1873). Салливан также интересовался инженерными разработками и был хорошо знаком с Бауманном (Sullivan, 1924). Суи Смит, признанный инженер в области мостостроения и специалист по фундаментам, имел большой опыт строительства зданий в Чикаго и решения специальных вопросов. При проектировании фундаментов здания театра архитекторы учли все лучшие современные инженерные достижения.

## ЗДАНИЕ ТЕАТРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

На момент открытия театра в 1890 г. здание было самым тяжелым<sup>2</sup> в Северной Америке. Его вес составил около 100 000 тонн при размерах в плане 50×110 м и высоте башни 82 м. Строительство комплекса стало началом эры современных небоскребов, хотя еще не появился чикагский «кессон», и здание было

построено на естественном основании (Baker & Gnaedinger, 1984; Sooy Smith, 1892).

Несмотря на столь богатую событиями историю здание театра продолжало функционировать, а в 1970 г. даже было внесено в Государственный реестр исторических мест США. В 1975 г. Министерство внутренних дел США провозгласило его национальной достопримечательностью.

В первые годы существования театра выполнялись плановые ремонты, а в 1910 г. здания театра и отеля были серьезно перестроены. В начале 1930-х гг. все здание снова подверглось значительной перестройке, тогда же был проведен ремонт стропильных конструкций крыши театра и выполнены центральные фундаменты башни. В 1930-е – начале 1940-х гг. о театре почти не вспоминали, а в 1946 г. здание приобрел только что открывшийся Университет Рузвельта. Это событие ознаменовало начало новой эпохи в истории театрального комплекса: с 1960-х гг. начался непрерывный процесс реставрации университетских корпусов и здания театра. И сейчас, после стольких лет забвения, театральный комплекс вновь распахнул свои двери для зрителей и 7500 студентов Университета Рузвельта.

При проектировании театра применялись многие инновационные технологии и эксклюзивные приемы. Здание стало одним из первых сооружений, где использовалось электрическое освещение, кроме того, оно было оборудовано самой совершенной на тот момент противопожарной системой. За время существования театра пожары возникали несколько раз, но ни один из них не распространился за пределы очага возгорания. Адлер спроектировал уникальную систему вентиляции, которая может служить примером одной из первых систем кондиционирования. Зимой воздух нагревался с помощью паровых змеевиков, а летом охлаждался с помощью потоков воды или льда.

Кроме того, это было одно из первых многофункциональных зданий. Применить подобный инновационный подход предложил Фердинанд Пек (Ferdinand Peck), выдающийся бизнесмен, возглавлявший Ассоциацию по строительству театра. В соответствии с принятой концепцией необходимо было построить такое обширное здание, в котором одновременно разместились бы большой театр, перво-

классный отель и бизнес-центр. Театр со всеми подсобными помещениями и сооружениями (фойе, гримерными и подземной частью сцены) занимает половину горизонтального плана здания и треть его общего объема. Реализация подобного инновационного проекта потребовала решения проблемы устойчивости единого комплекса здания, а также более частного вопроса – строительства фундаментов, способных выдержать массивную конструкцию, разные части которой оказывали различное давление.

В апреле 1887 г. началась закладка фундаментов, а к началу декабря 1889 г. здание было построено. Столь высокие темпы строительства привели к тому, что рабочие смены удлинились и строители работали при электрическом освещении в темное время суток. Общие затраты на строительство здания составили 32 000 000 долларов в переводе на современные деньги.

#### РАСПОЛОЖЕНИЕ, ПЛАН И КОНСТРУКЦИЯ

Здание театра располагается между бульваром Мичиган, Уобаш Авеню и Конгресс Стрит (рис. 1, 2). Вход в театр находится в 19-этажной башне на Конгресс Стрит (остальная часть сооружения 10-этажная) и равноудален

от бульвара Мичиган и Уобаш Авеню. При строительстве здания вдоль его северного фасада параллельно Конгресс Стрит возводились внешние несущие каменные стены. Они располагаются в нижних этажах фасадов, выходящих на бульвар Мичиган, Уобаш Авеню и Конгресс Стрит, расположены отдельные колонны и пилястры. Внутренние нагрузки в отеле, башне и бизнес-центре распределяются между чугунными колоннами и стальными или железными балками перекрытий. Колонны расположены в фойе, в задней части театра. В зрительном зале колонны отсутствуют, кроме тех, которые выполняют роль несущих конструкций для перекрытий. Крышу поддерживают кованые железные стропила, которые тянутся с севера на юг, от задней стены здания к внутренним каменным стенам, идущим параллельно Конгресс Стрит. Из-за наличия внешних несущих стен здание нельзя назвать полностью современной конструкцией, в основе которой лежит цельный металлический или стальной каркас, тем не менее в нем относительно немного внутренних несущих каменных стен.

Для уменьшения общего веса здания Адлер использовал всевозможные металлические и стальные конструкции. С одной стороны, это еще более увеличило непропорциональность нагрузок на фундаменты, с другой –



Рис. 1. Здание театрального комплекса сегодня (восточная отметка на бульваре Мичиган)

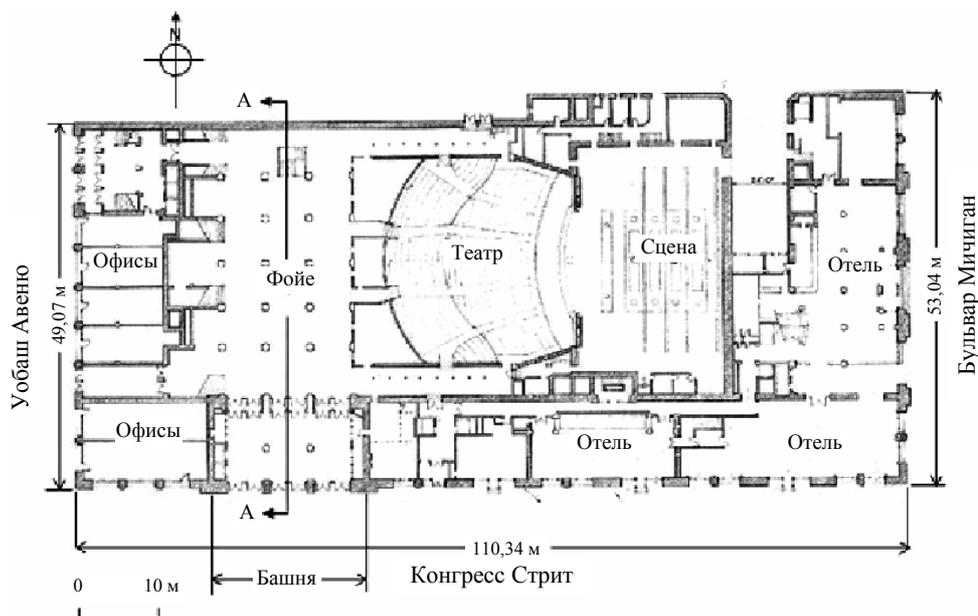


Рис. 2. Архитектурный план первого этажа здания (а) и продольный разрез южного фасада театра (б)

способствовало значительному уменьшению общей разности осадок, потому что кованные стальные и металлические конструкции способны нейтрализовать большие деформации, благодаря чему не происходит видоизменение или разрушение их структуры. К счастью, характер осадок не представлял опасности и для наиболее важных несущих стен с внутренней каменной кладкой, на которые опираются стропила. Эти стены выровнены по северной стороне башни и поэтому испытывают относительно небольшую угловую деформацию.

#### ГЕОЛОГИЯ ЧИКАГО

Большинство пластов грунта в Чикаго – это ледниковые глины. Они откладывались относительно отдельными пластами в период висконсинской стадии Плейстоценского оледенения (Otto, 1942). По порядку залегания можно выделить следующие виды глин<sup>3</sup>: Valparaiso, Tinley, Park Ridge, Deerfield, Blodgett и Highland Park. На площадке строительства театрального комплекса глины Valparaiso и Highland Park отсутствуют. Характер залегания этих глин значительно различается, и даже внутри одного пласта они

могут иметь совершенно разную предысторию нагружения.

Глины Tinley и Park Ridge отличаются особой жесткостью, чрезмерной переуплотненностью и относительной несжимаемостью. Но в ходе большей части геотехнических инженерных испытаний, проводимых в Чикаго, в центре внимания оказываются поверхностные сжимаемые тили Deerfield и Blodgett. Считается, что по происхождению тиль Deerfield<sup>4</sup> относится к подледниковым слоям. Он относительно однороден. Принято считать, что низкий коэффициент переуплотнения является результатом слабого дренажа в нижней части грунта в период его формирования и относительно непродолжительного пребывания под ледниковой нагрузкой. А поверхностный тиль Blodgett, наоборот, принято относить к послеледниковым. На его формирование повлияло то, что он находился близко к зоне таяния ледника и вбирал в себя потоки грязи и осадки талой воды. В результате таких условий формирования влажность и состав тили Blodgett более разнородны, чем тиль Deerfield (Peck R.B. & Reed W.C., 1954).

Над сжимаемыми глинами обычно находится сухая глиняная корка различной толщины и жесткости, наличие которой сыграло

значительную роль на раннем этапе строительства в Чикаго. Обычно толщина этого слоя составляет 1,5...2 м. Над поверхностной коркой располагается двухметровый слой мелкого пылеватого песка низкой или средней плотности, а над ним – 2,4 м насыпи. Эта насыпь была сделана на всей территории нижнего города Чикаго на раннем этапе его строительства, поэтому к моменту сооружения театрального комплекса она уже существовала по крайней мере 30 лет. Уровень грунтовых вод – на 3,1 м ниже уровня поверхности.

Число пластичности для глин Deerfield и Blodgett обычно колеблется в пределах 20...30%, индекс текучести глины Blodgett может иметь разные значения (в зависимости от влажности грунта), обычно он колеблется от +0,5 до +0,7, а индекс текучести для глины Deerfield несколько ниже и достаточно устойчив (+0,4...+0,6).

Театральный комплекс располагается в южной оконечности бизнес-района Чикаго. Так как доступных данных о грунтах в районе театра нет, для представления профиля (рис. 3) используются данные о природных напластованиях грунта в бизнес-районе Чикаго, приведенные в работе Пека (Pек, 1948), а также результаты буровых исследований площадки, проводившихся при строительстве

подземного перехода в 1940-х гг. Этот профиль достаточно показателен в отношении толщины слоя слабой глины, однако остаются некоторые сомнения по поводу толщины и объема слоя сухой корки глины в районе площадки строительства.

## ИССЛЕДОВАНИЯ

Вдоль бульвара Мичиган, Уобаш Авеню и Конгресс Стрит на расстоянии примерно 6 м друг от друга были установлены реперные марки для определения осадок. Их разместили на вершинах свай в августе 1887 г., до того как сваи получили дополнительную нагрузку. Реперные марки обследовались по высоте через различные промежутки времени вплоть до середины XX в., т. е. после периода первичной консолидации. Все результаты наблюдений с указанием времени приведены в табл.1 в работе Пека и Уяника (Pек & Уяник, 1955), а последние данные показаны на поперечном разрезе на рис. 4. До 1909 г. эталонный репер находился на здании на противоположной стороне Уобаш Авеню, но со временем, скорее всего, произошла его осадка, хотя известно, что величина осадки составляла меньше 25 мм. После 1909 г. уровни осадки определялись на основе показателей эталон-

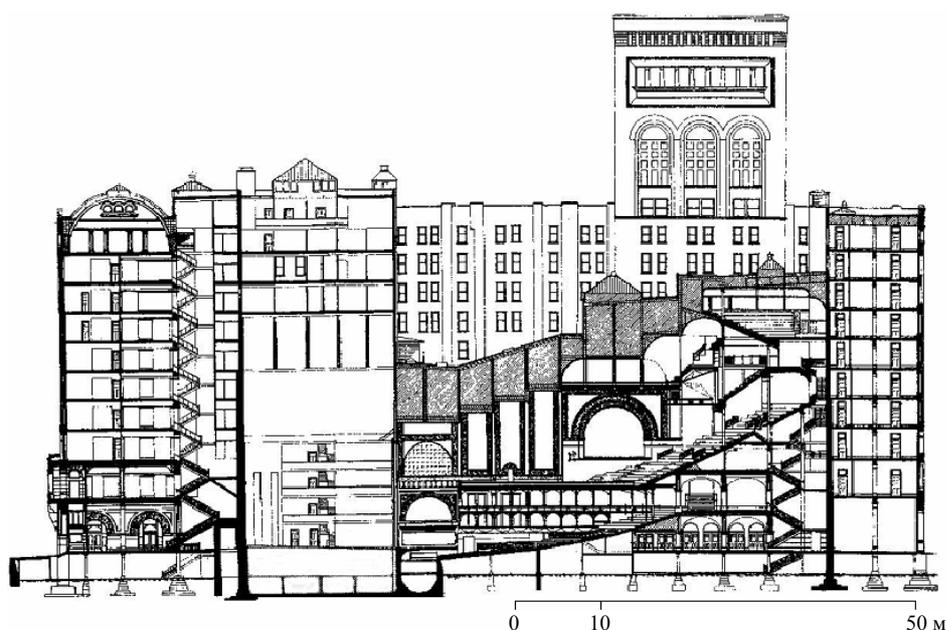


Рис. 3. Состояние грунтов под зданием театрального комплекса

ного репера на здании Макконик, которое стоит на сваях на коренном грунтовом основании.

В 1941 г. проводилось исследование пола в фойе театра, которое может быть соотнесено с исследованиями по определению осадки внешних стен. Однако в ходе данного исследования был выявлен разрыв на границе стены и башни (см. рис. 4). Это свидетельствовало о разности осадок: пол в фойе театра выгнулся (рис. 5), и образовался наклон в сторону башни (1:30). К счастью для инженеров и владельцев здания, башня осела достаточно равномерно и сохранила вертикальное положение. Последнее визирование, в ходе которого измерялась высота башни по отношению к современным небоскрегам, показало, что башня несколько наклонена в южном направлении (1:300). В восточном и западном направлениях подобного отклонения не выявлено.

## ФУНДАМЕНТЫ

До постройки театрального комплекса на его территории, которая граничила с городскими окраинами, находились небольшие малоэтажные здания. В ходе строительства театра был усилен фундамент 8-этажного здания Галереи изящных искусств, расположенного рядом с северным фасадом театра. Рядом с площадкой строительства театра не было никаких важных сооружений, поэтому нигде по соседству не потребовались глубокие выемки грунта для заложения фундаментов. Ближайшее большое сооружение – Конгресс Отель, построенный в 1893 г., – 10-этажное здание на естественном фундаменте с одноэтажным цоколем. Оно располагалось на расстоянии 25 м от здания театра. Подземные конструкции этого здания соединялись с театром подземным переходом, известным

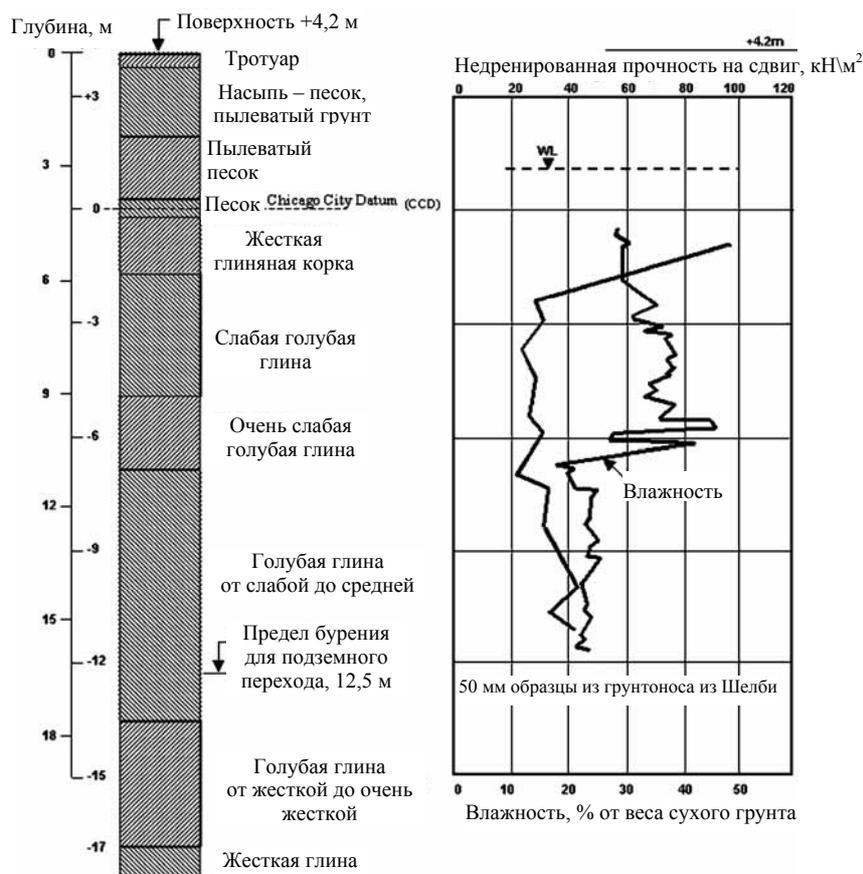


Рис. 4. Наблюдаемые и вычисленные осадки здания Чикагского театрального комплекса (поперечный разрез А–А на рис. 2)



Рис. 5. Фойе театра (показан наклон пола в сторону входа, к башне на Конгресс Стрит)

под названием аллеи Пикок, благодаря чему люди, живущие в гостинице, могли проходить в театр, не выходя на улицу.

Номинальный уровень выемки грунта составил примерно 3,5 м, однако на фотографиях здания видно, что котлованы были гораздо глубже. Фундаменты обычно закладывались на глубине 5,2 м от уровня улицы (согласно данным Городского бюро Чикаго, насыпь – 1 м), за исключением основания башни, которое расположено на 0,3 м глубже, и 6-метрового котлована под сценой театра (размер 19×36,5 м). Все фундаменты состоят из двух 300-мметровых слоев деревянных балок, положенных на подготовленное гравийное основание.

Второй слой деревянных балок настилался под углом к первому. На деревянные балки была положена ступенчатая решетка из железнодорожных рельсов, залитых бетоном. И на нее уже опирались стены бутовой кладки, продолжающиеся на уровне улицы. Следуя рекомендациям Бауманна (Baumann, 1873), под каждую стену и колонну закладывали отдельные фундаменты. Однако такой метод нельзя было применить ко всем фундаментам театрального комплекса.

Фундаменты башни объединили в одну большую конструкцию размером приблизительно 30×20 м. В основе этого фундамента

также находились балочная клетка и цементное основание, на которое опирались отдельные сваи, использующиеся для поддержки стен и колонн. Для уменьшения неравномерной осадки фундаменты башни были соединены со смежными фундаментами фронтальной стены с помощью целого ряда 410-мметровых стальных балок (рис. 6). Подобная конструкция позволила увеличить размер фундамента для данной глубины заложения (до этого для закладки больших фундаментов повсеместно использовался штучный камень) (Adler, 1888). Цокольный этаж возвышался на 2 м над насыпью. Общий план подвального этажа здания показан на рис. 7.

#### ПРОЕКТ ЗДАНИЯ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ФУНДАМЕНТЫ

Особенности проекта этого монументального здания привели к возникновению специфических проблем при строительстве фундаментов. Сама архитектура театрального комплекса – отступление от канонического облика Чикаго. Здание построено в романском стиле, его каменный фасад ничем не украшен. Как писал Салливан: «...оно прекрасно в своей наготе».

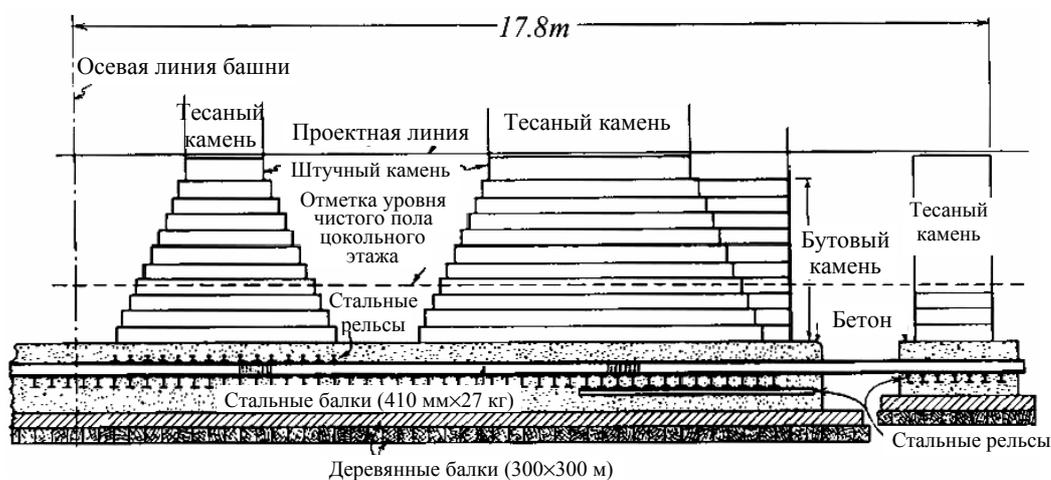


Рис. 6. Объединенные фундаменты башни театра

В первых проектах предполагалось, что театр будет облицован красным кирпичом, но это не подчеркивало бы его прямолинейности, поэтому группа Фердинанда Пека решила облицевать здание тяжелыми гранитными или известковыми плитами. Это изменение (как и решение о постройке двух дополнительных этажей башни) было внесено в проект уже

после заложения основных фундаментов здания, поэтому дополнительная нагрузка на фундаменты беспокоила инженеров. Сайри (Sirgy, 2002) указывал, что из-за облицовки камнем общий вес внешних стен увеличился на  $\frac{1}{3}$  и давление, оказываемое всей конструкцией, могло превысить  $249 \text{ кН/м}^2$ . Муэллер, Адлер и другие ведущие инженеры из коман-

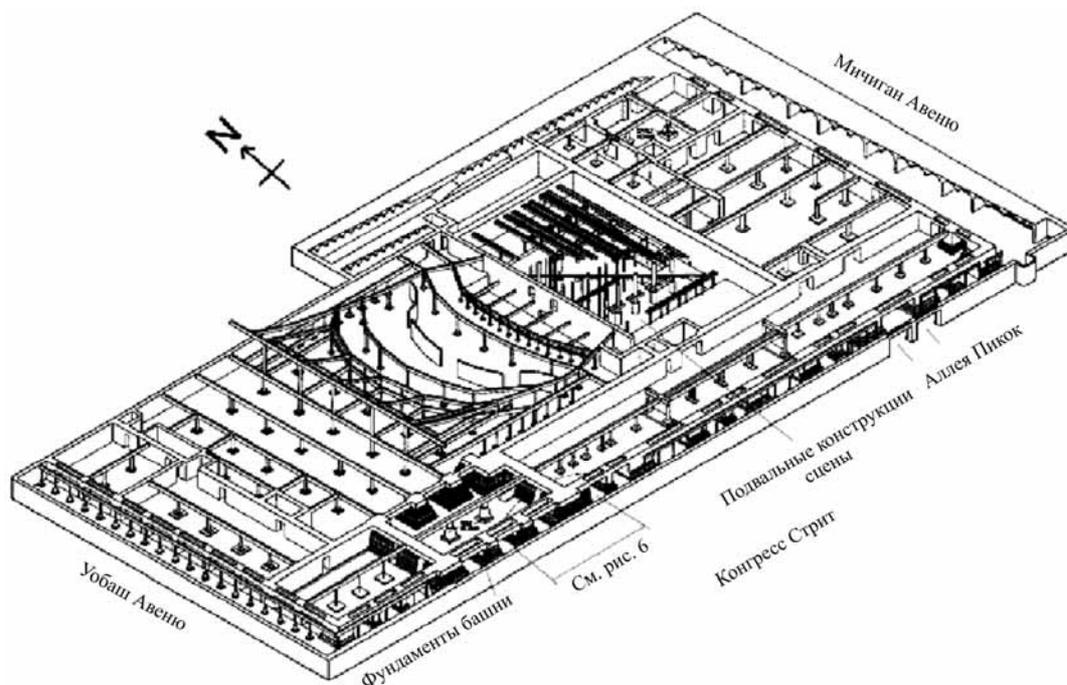


Рис. 7. План подвального этажа здания театрального комплекса

ды Салливана, в 1920-е гг. выступавшие в качестве свидетелей на судебных слушаниях, говорили, что для уменьшения общей нагрузки здания панели внешних стен были заменены пустотелыми кирпичами везде, где это было возможно.

Особое внимание следовало уделить проектированию и строительству фундаментов башни театрального комплекса, поскольку она была на 10 этажей выше остальной части здания. Адлер хорошо понимал, что уменьшение общей и дифференциальной осадок стало еще более актуальным из-за недавно произошедших аварий (Adler, 1891). Он применил метод искусственного нагружения башни, предложенный Бауманом. При этом общий вес башни доводился до веса 10 этажей здания. Затем чугунный балласт убирался по мере возведения 9 этажей башни. Данный метод применялся, чтобы избежать неравномерной осадки башни по отношению к соседним частям здания. Благодаря этому удалось избежать большой разности осадок башни и соседних внешних стен, однако высокий уровень нагружения этих частей здания привел к значительной разности осадок во внутренних конструкциях сооружения.

Подобная неравномерность нагрузки явилась результатом активного использования внутренних стальных и железных конструкций, кроме того, большую часть здания занимал театр.

Сцена театра опирается на 28 гидравлических домкратов, которые, согласно проекту Суи Смита, размещались в 11-метровых колодцах, устроенных в глине. В процессе разработки этих колодцев, которые создавались уже после закладки фундаментов, произошла 100-мм осадка смежных стен. Инженеры изначально критически оценивали создание глубокого котлована под сценой театра и колодцев для размещения гидравлических домкратов, поскольку это негативно влияло на фундаменты комплекса, и их опасения оправдались.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНДАМЕНТА

Чтобы лучше понять, как разрабатывались проекты фундаментов театрального комплекса, необходимо обратиться к практике

фундаментостроения в Чикаго в конце XIX в. Как уже упоминалось, серьезной работой в данной области была книга Баумана (Baumann, 1875). Автор исключительно критически оценивал строительство как плитных, так и свайных фундаментов и для аргументации своей точки зрения приводил примеры аварийных ситуаций в двух зданиях, где размещались государственные учреждения. Одно из них – здание муниципалитета – было построено на неармированном бетонном фундаменте, который полностью разрушился под действием веса здания. Другое сооружение – здание суда графства Кук – было построено на коротких сваях, погруженных в слабую глину. Там тоже возникла аварийная ситуация. Эти недавние аварии привлекли внимание общественности, и Бауман выступил против использования обеих конструкций.

Кроме того, во время строительства фундаментов в Чикаго инженеры сталкивались с целым рядом проблем из-за неравномерного давления на разные участки фундаментов, что приводило к значительным разрушениям (например, здание Старого комитета по торговле или станция Полк Стрит). Давление на грунт фундаментов здания Старого комитета по торговле намного превышало значения, рекомендованные Бауманом, и изменялось от фундамента к фундаменту. Однако давление по подошве фундаментов станции Полк Стрит распределялось равномерно, и даже под башней его величина составила  $166 \text{ кН/м}^2$ .

Чикагские инженеры обвиняли своих восточных коллег в том, что, изолировав башню от соседних стен здания, они совершили ошибку. Это привело к значительной разности осадок между башней и остальными частями сооружения.

Согласно современным исследованиям, для того чтобы разность осадок не привела к разрушению здания, необходимо сделать двойные прорезы, чтобы отделить башню от всех остальных конструкций. А в здании Старого комитета по торговле возникла существенная разница в нагрузках, что привело к чрезмерно высоким величинам давления, достигающим до  $420 \text{ кН/м}^2$ . Разность осадок стала причиной значительных разрушений в обоих зданиях. Бауман и его современники

рассматривали эти события как примеры неудачного проектирования фундаментов.

Часто в качестве причины осадки здания Старого комитета по торговле называли неправильное понимание постоянного и устоявшегося значений опорного давления. Однако из анализа конструкций этих сооружений очевидно, что они были гораздо больше подвержены действию разности осадок, чем театральный комплекс, хотя при внешнем осмотре могло показаться, что для постройки зданий применялись одинаковые конструкции.

При строительстве зданий станции Полк Стрит и Старого комитета по торговле использовались традиционные каменные конструкции и возводилось множество внутренних несущих стен. Сначала может показаться, что здание театрального комплекса тоже представляет собой каменную конструкцию (рис. 8), на самом деле основу этого сооружения составляет огромный стальной каркас, поэтому использование внутренних каменных несущих стен ограничено.



Рис. 8. Деформация облицовки псевдокирпичной арки в фойе театра

Адлер хорошо знал обо всех этих неудачах и хотел, чтобы его здание избежало по-

добной участи. Группа инженеров имела все основания для беспокойства во время проектирования фундаментов здания, в частности, из-за того, что театральный комплекс стал самым тяжелым сооружением Чикаго. В протоколах зафиксировано, что Суи Смит провел детальное исследование площадки строительства, измеряя опорное давление на разных глубинах по всему периметру сооружения.

В отчете говорится, что вся территория, на которой располагалось здание, была разделена на квадраты (со стороной в 10 футов), по углам каждого из них были пробурены скважины для тщательного исследования грунтов под фундаментами. В нескольких местах на всю глубину заложения фундаментов были открыты котлованы, и для определения несущей способности грунта на дно котлованов помещали тяжелые деревянные диски, на которые ставили резервуары, наполненные водой. Таким образом измеряли осадку дисков под действием постоянно увеличивающейся нагрузки и допустимую нагрузку (Garczynski, 1890).

К сожалению, данные, полученные Суи Смитом в ходе испытаний на несущую способность, не сохранились, но в ряде работ, где цитируется его отчет, говорится, что он считал величину несущей способности  $215 \text{ кН/м}^2$  допустимой. Проектируемые фундаменты были рассчитаны на постоянную нагрузку в  $200 \text{ кН/м}^2$ , которая в соответствии с рекомендациями Баумана пропорционально распределялась между конструкциями основания.

Помимо этого, там, где было возможно, инженеры использовали изолированные фундаменты, тем не менее, Адлер и Суи Смит несколько отошли от рекомендаций Баумана (Adler, 1891). Например, они внедрили новую технологию локального соединения фундаментов (см. рис. 6). Но еще удивительнее, что в ходе работ использовалась более высокая величина опорного давления. Величина нагружения, которую рекомендовал Бауман (Baumann, 1873), составляла  $138 \text{ кН/м}^2$ , поскольку именно при таком значении создавались оптимальные условия для уменьшения осадки здания. Бауман утверждал, что, если придерживаться этого ограничения и не нарушать структуру жесткой корки глины,

осадка здания прекратится через 6 месяцев после завершения строительства и составит не более 40 мм. Можно предположить, что Адлер и Суи Смит хорошо знали это предписание. Однако даже из простейших геометрических измерений очевидно, что, если закладывать фундаменты на глубину 5,5 м и создавать подвальные помещения необходимого объема, давление будет гораздо больше. Кроме того, в результате столь глубокого заложения фундаментов почти уничтожается слой жесткой глиняной корки, на который могла бы распределяться часть нагрузки.

Можно выделить две причины, по которым фундаменты театрального комплекса закладывались на такую глубину. Во-первых, это связано с геометрией здания, во-вторых, инженеры не были уверены, что деревянное основание (см. рис. 6) всегда будет оставаться под слоем воды. Во время судебных слушаний в 1920-е гг. высказывались сомнения по поводу наличия жесткой глиняной корки на площадке строительства. В частности, в письменном свидетельстве Личтера (Lichter) говорится, что «почти нет доказательств наличия сухой глинистой корки». В юбилейной книге, посвященной завершению строительства здания и опубликованной в 1890 г., до возникновения проблемы осадок, написано, что здание основано на очень слабом грунте, который не подходит для заложения тяжелых фундаментов (Garczynski, 1890). Однако, если бы на площадке строительства театрального комплекса слой жесткой глинистой корки находился лишь в некоторых местах, то проектировщики скорее всего учли бы это при возведении фундаментов.

#### РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ ОБЗОР

Адлер предполагал, что Суи Смит проводит детальное исследование характера грунтов под фундаментами здания. Оба инженера были уверены, что предварительная осадка здания составит всего 50 мм. (В то время как для северного крыла здания Монеднок, еще одного тяжелого каменного сооружения на естественном фундаменте, построенного через год после театрального комплекса, допускалась 200-мметровая осадка (Пек, 1948).) До сих пор остается загадкой, почему инженеры

спрогнозировали такую большую осадку здания театрального комплекса. На самом деле у них просто не было другого выхода, так как они отказались забивать сваи до уровня твердой глины. Вероятно, несмотря на негативное отношение Баумана к свайным конструкциям, Суи Смит или Адлер знали о преимуществах этого метода.

Существуют три причины, по которым при строительстве театра сваи не использовались – это аварии на других объектах, а также временные и материальные затраты. Из публикаций того времени очевидно, что Суи Смит и Адлер хорошо представляли проблемы, связанные с высоким давлением на основание и осадками. В 1888 г. Адлер писал, что самым выдающимся достижением в области фундаментостроения было создание глубокого котлована для сцены театра. В той же статье он говорил, что по коммерческим соображениям первый этаж здания должен быть как можно ближе к уровню поверхности, поэтому нужно опустить подвальный этаж и фундаменты на значительную глубину. В этой же работе Адлер выражал обеспокоенность по поводу строительства фундаментов, так как данный подход «ставит перед инженерами ряд сложных вопросов» и предполагает «ряд компромиссов между прогрессивной технологией и обязательными требованиями».

В 1891 г., когда средняя величина осадки башни составила 250 мм ( $\frac{1}{3}$  от максимально допустимого значения), Адлер написал о применении свай и о том, какие ценные уроки можно извлечь при использовании этого метода (Adler, 1891). Он говорил, что, оценивая свою роль в развитии фундаментостроения в Чикаго, не может сказать, почему он отошел от правильного решения сложной проблемы, которую анализировал много лет. Описывая опыт строительства фундаментов в Чикаго, он продолжает выступать против использования свай. Суи Смит (Sooy Smith, 1892). Читая доклад в университете штата Иллинойс, особо подчеркивает преимущества кессонов перед фундаментами на естественном основании. В то же время другой выдающийся инженер отрицает необходимость использования свай (дискуссия по поводу работы Суи Смита (Sooy Smith, 1892)).

Принимая во внимание создание самых совершенных на тот момент фундаментов на естественном основании, было бы нелогично заменять существующие фундаменты на свайные, требующие больших материальных и временных затрат. Таким образом, поскольку Адлер и Суи Смит не имели возможности провести ретроспективный обзор, несмотря на все свои опасения в ходе проектирования, они нашли наилучшее решение поставленной задачи, учитывая все научные достижения, физические и финансовые ограничения. Поскольку инженеры были обеспокоены поведением всего комплекса фундаментов здания, они проводили дополнительные измерения, стараясь уменьшить влияние осадок.

Очевидно, что инженеры хорошо представляли последствия консолидации улучшенных грунтов. В ходе наблюдений во время откопки колодцев для расположения гидравлических домкратов под сценой театра Суи Смит отмечал, что можно увеличить жесткость грунта с помощью откачки грунтовых вод (Sooy Smith, 1892). Как упоминал в своей работе Бауман, чтобы избежать неравномерной осадки, необходимо применять метод временных нагрузок. Но также очевидно, что инженеры не имели представления о более широкомасштабных и долгосрочных последствиях консолидации.

#### АНАЛИЗ ОСАДОК

*Исходные данные.* В 1944 г. Пек и Уяник (Pesk & Uyanik, 1955) провели обратный анализ осадок здания, руководствуясь ограничениями, предписываемыми теорией Баумана (Baumann, 1873). Согласно этой теории, для создания функционального проекта, по крайней мере в данном случае, нужно было бы построить здание, одинаковое по всем измерениям, с практически одинаковыми по форме, размеру и уровню нагружения фундаментами. Кроме того, величина давления на основание не должна была превышать  $138 \text{ кН/м}^2$ , а фундаменты во избежание большой деформации должны были закладываться поверх сухой жесткой глиняной корки. Однако в своих теориях Бауман не учитывал трехмерное поле напряжений. Данное уточнение было приведено в книге Бусинеска (Bous-

sinesq, 1885), опубликованной через 12 лет после работы Баумана. В свое время эту теорию также не приняли, но она сыграла значительную роль в определении консолидации осадки, так как, чем объемнее становились фундаменты, тем большее количество слоев грунта оказывалось под их влиянием.

Обратный анализ четко показывает, что любая подобная башня получила бы значительную осадку, существенно отличающуюся от осадки соседних конструкций, не испытывающих такой большой нагрузки даже при аналогичном контактном давлении. Вычисления величин осадок проводились на ранней стадии изучения механики грунтов, и одной из основных задач подобных исследований было доказательство справедливости их результатов и возможности применения в полевой практике (Strieff, 1938). Исследования проводились еще до вторичной консолидации, поэтому ее влияние не могло учитываться. Также нелогично было включать в расчеты величину жесткости здания. Тем не менее, эти ранние вычисления указали направление развития механики грунтов и определения осадок зданий.

#### ВЫВОДЫ

Описывая этот уникальный случай из практики, следует обратить внимание на следующие ключевые моменты:

1. Даже чрезмерно высокие значения общей и дифференциальной осадок (более 700 мм) не оказали кардинального влияния на структуру здания, и оно продолжает функционировать. Можно предположить возникновение типичных диагональных сдвиговых трещин на стыке башни и соседних стен здания. Однако сегодня на этом фасаде не зафиксировано ни наружных, ни внутренних трещин. Башня равномерно оседает с незначительными отклонениями или при полном их отсутствии. Инженеры приняли необходимые меры для ликвидации значительной разности осадок между башней и соседними внешними стенами здания. Конечно, разность осадок оказывает влияние на внутренние конструкции здания, однако это не ставит под угрозу надежность здания и его эксплуатационную пригодность.

2. Этот случай из практики показывает, что некоторые сооружения способны выдерживать деформацию. В случае здания театрального комплекса ее уровень значителен, и несмотря на то что подобная деформация не может не отразиться на конструкции здания, в данной ситуации она не прогрессирует. Однако, во-первых, гораздо чаще деформации подвергаются внутренние конструкции железного каркаса, а не каменные элементы. Но выполненный по преимуществу из железа или стали каркас способен «амортизировать» деформацию, что позволяет избежать критических локальных разрушений или постоянно назревающей аварийной ситуации.

Хотя некоторые здания в целом устойчивы к деформации, этого нельзя сказать об их отдельных элементах и конструкциях (Powderham, 2003; Powderham, Huggins, Burland, 2004). Во-вторых, осадка в здании возникла под действием его собственного веса, поэтому ее влияние сказывалось постепенно, в течение длительного времени, а скорость была невелика. Необходимо четко различать осадку, возникшую по указанной причине, и осадку, которая стала быстро развиваться вследствие открытия новых котлованов.

3. В своей работе Пек и Уяник (Peck & Uyanik, 1955) подчеркивают, что во время проектирования здания театрального комплекса многие данные о консолидации грунтов не были известны. В 1940-е гг. было проведено продолжительное исследование, в ходе которого, однако, не учитывались жест-

кость сооружения и вторичная консолидация грунта. Тем не менее, его результаты свидетельствовали о начале развития новой отрасли науки – механики грунтов.

#### *Благодарности*

Авторы признательны членам Совета театрального комплекса и руководству Университета Рузвельта за возможность посещения здания и работы с архивными материалами. Особая благодарность выражается профессору Дж. Сайри, любезно предоставившему информацию о дальнейшей истории театрального комплекса.

#### **Примечания**

<sup>1</sup> Впервые статья была опубликована в трудах конференции *Advances in Geotechnical Engineering. The Skempton Conference, 2004*, Thomas Telford, London.

<sup>2</sup> А вскоре оно стало и самым высоким зданием. Башня Старого комитета по торговле (92,4 м) была на 10 м выше, однако из-за серьезной осадки в 1895 г. со здания сняли чугунный фонарь, и его высота уменьшилась на 25 м.

<sup>3</sup> Недавно стратиграфическая номенклатура была пересмотрена, но, чтобы избежать несоответствий в терминах с основной массой исследований, в данной статье новая терминология не применяется.

<sup>4</sup> Однажды Терцаги заметил, что только геолог-пурист отнес бы слабые чикагские глины к тилам.