

© И.А.Садовенко¹, А.Н. Пугач², Н.И. Деревягина¹, Э.С. Манукян¹

¹ Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, Украина

² Днепровский государственный аграрно-экономический университет, Днепр, Украина

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УСИЛЕНИЮ ОСНОВАНИЙ ФУНДАМЕНТОВ С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛЕССОВЫХ МАССИВОВ ПРИ ТЕХНОГЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

© I. Sadovenko¹, A. Puhach¹, N. Dereviahina¹, E. Manukian¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS ON STRENGTHENING OF BASES OF FOUNDATIONS CONSIDERING SPATIAL CHANGE OF PARAMETERS OF LOESS MASSIFS DURING TECHNOGENIC FILTRATION

Цель. Обоснование гидрогеомеханических параметров и разработка технических рекомендаций для работ по усилению оснований фундаментов, которые позволяют контролировать, прогнозировать и управлять в реальном времени процессами, происходящими в основании здания, и лессового массива в целом.

Методы исследований. Систематизация геолого-гидрогеологических данных, факторно-диапазонный анализ параметров, численное моделирование геомеханических процессов, инженерный анализ технических ситуаций.

Результаты исследований. На основании анализа фактических данных и результатов численного моделирования исследованы закономерности деформаций исследуемого жилого комплекса вследствие техногенного увлажнения лессового массива грунтов. Установлено, что динамика осадок реперов во времени тесно коррелирует с режимом увлажнения. Построена модель нарушенного грунтового массива, учитывающая специфические особенности лессовых пород. В качестве инженерных мероприятий по предотвращению дальнейших деформаций жилого комплекса рассмотрены варианты перераспределения нагрузок от жилых секций на дополнительное свайное поле, регулируемое увлажнение основания и тампонажное закрепление грунтов. Наиболее приемлемо в сложившихся условиях укрепление грунтового основания способом высоконапорной цементации.

Научная новизна. По результатам анализа фильтрационных свойств техногенно нагруженного лессового массива определен интервал глубин, и геологические слои, характеризующиеся наиболее интенсивным развитием деформационных и суффозионных процессов. Дана количественная оценка момента перехода массива в неустойчивое состояние, а также связь фильтрационных процессов с формированием оползней течения.

Практическая значимость. Рекомендована технологическая схема цементации грунтового основания, а также мероприятия после укрепления основания, такие как мониторинг дальнейших деформаций самого комплекса и конструкций паркинга, возможности сооружения сопутствующего дренажа.

Ключевые слова: суффозия, глубинная эрозия, лессовые породы, гидрогеологические условия

Введение. Анализ инженерно-гидрогеологических условий территории г. Днепр, режима подземных вод и их баланса свидетельствуют о сложности механизма формирования процесса подтопления в черте города. На сегодняшний день, подтопления городской территории - достаточно развитое явление, которое наблюдается практически везде, как на участках с пониженным рельефом и проницаемыми песчаными грунтами (левобережье и нижние террасы правобережья), так и в пределах правобережья с более высокими отметками земной поверхности и слабопроницаемыми лессовыми породами.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Известно, что для Днепропетровской области характерно практически повсеместное распространение лессовых пород, занимающих 69,8% ее территории (22,28 тыс. км²) [1]. Они проявляют значительные просадочные деформации при дополнительных нагрузках и проседают под собственным весом при замачивании, что является преобладающим фактором среди причин активизации оползневых процессов за последние годы. Доминирующее влияние подъема уровня подземных вод на условия строительства и функционирования уже построенных территорий определяет необходимость выполнения проектно-изыскательских работ по прогнозированию состояния породных массивов и обоснованием соответствующих защитных мер.

Именно поэтому предупреждение возникновения подтопления и оползневых процессов в районах распространения лессовых пород требует разработки рекомендаций по своевременному выявлению и ликвидации опасных зон с учетом особенностей техногенной нагрузки массивов. Предотвращение и ликвидация этих физико-геологических явлений на конкретных объектах позволят экономить значительные средства на этапах планирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений, расположенных на лессовых грунтах.

Цель и задачи исследования. Поэтому целью данной работы является обоснование гидрогеомеханических параметров и разработка технических рекомендаций для работ по усилению оснований фундаментов, которые позволяют контролировать, прогнозировать и управлять в реальном времени процессами, происходящими в основании здания, и лессового массива в целом. *Методы исследований* – систематизация геолого-гидрогеологических данных, факторно-диапазонный анализ параметров, численное моделирование геомеханических процессов, инженерный анализ технических ситуаций.

Геолого-гидрогеологическая характеристика объекта. Исследуемый жилой комплекс состоит из двух жилых секций и паркинга. Жилые секции (одиннадцати- и пятнадцатипятиэтажная) выполнены по стеновой конструктивной схеме с перекрестной компоновкой несущих стен. Паркинг выполнен по каркасной конструктивной схеме из монолитного железобетона.

Жилые секции возведены на свайном основании – висячие сваи с уширенной пятой длиной 20-27 м. Фундаменты паркинга возведены на уплотненной подушке толщиной до 2-х метров из доменного шлака. Обратная засыпка пазух котлована выполнена из насыпного грунта с включением строительного мусора.

С трех сторон жилого комплекса на расстоянии 5,0-15,0 м от наружных стен проложены подземные водонесущие коммуникации (водопровод, канализация, ливневая канализация) диаметром 100...400 мм. Жилой комплекс введен в эксплуатацию в 2004 году с подключением ко всем инженерным коммуникациям и автономным отоплением. Класс ответственности здания – II, коэффициент надежности по назначению – 0,95.

Территория по инженерно-геологическим условиям относится ко второй категории сложности. В геоморфологическом отношении площадка приурочена к правобережному террасированному склону долины реки Днепр. Природный рельеф изменен в процессе строительства комплекса. Общий уклон поверхности – в юго-восточном направлении в сторону реки.

Геологический разрез до глубины 43,0 м представлен комплексом переслаивающихся лессовых супесей и суглинков, которые подстилаются песчаными грунтами и скальными породами. С дневной поверхности покровные отложения перекрыты насыпными и почвенно-растительными грунтами мощностью 0,7-7,4 м.

Подземные воды безнапорного водоносного комплекса залегают на глубине 31,4-32,0 м от существующей дневной поверхности. Площадка по геолого-гидрогеологическим условиям относится к категории неподтопляемых подземными водами. В зоне замачивания грунтов отмечено наличие техногенного горизонта (верховодка) на глубине 5,1 м в насыпных грунтах. Химический состав воды техногенной верховодки свидетельствует о том, что это водопродная вода с загрязнением [3, 4].

Изысканиями выявлена и оконтурена зона замоченных грунтов вследствие утечек воды из подземных водонесущих коммуникаций. На момент изысканий в границах замоченной зоны находилось почти всё здание паркинга, высотная 15-этажная секция и частично 11-этажная секция [3, 4]. Толща разделена на девять инженерно-геологических элементов (ИГЭ).

Влажностный режим грунтов нарушен. В зоне замачивания грунты имеют влажность значительно выше, чем вне зоны замачивания: в супесях ИГЭ-3 на 5-13%, в суглинках ИГЭ-4 на 3-10%, в супесях ИГЭ-5 на 7-10%, в суглинках ИГЭ-6 на 5-7%, в супесях ИГЭ-7 на 5-9%, в супесях ИГЭ-8 на 3-6%. Супеси перешли в пластичное и текучее состояние, суглинки – тугопластичное, мягкопластичное и текучепластичное состояние.

Замачивание лессовых грунтов привело к ухудшению показателей физических свойств грунтов (влажность, консистенция, плотность), снижению характеристик деформируемости в 1,68-3,77 раза (коэффициент изменчивости сжимаемости) и прочности в 2,6-4,3 раза, проявились просадочные свойства грунтов.

Суммарная величина просадки грунтов вне зоны замачивания при природном давлении составляет 54,73 см, тип грунтовых условий по просадочности – второй. Мощность просадочных грунтов достигает 31,25 м.

Моделирование динамики деформаций основания и состояние объекта. С марта 2010 г. визуально и инструментально фиксировались неравномерные осадки фундаментов жилых зданий и паркинга с появлением разрывных деформаций и крена. Величины осадок изменялись от 0 до 192 мм по состоянию на

25.02.2011. Наибольшая концентрация осадок реперов прослеживается в пределах контура зоны техногенного увлажнения на сопряжении паркинга и 15-этажной жилой секции (рис. 1).

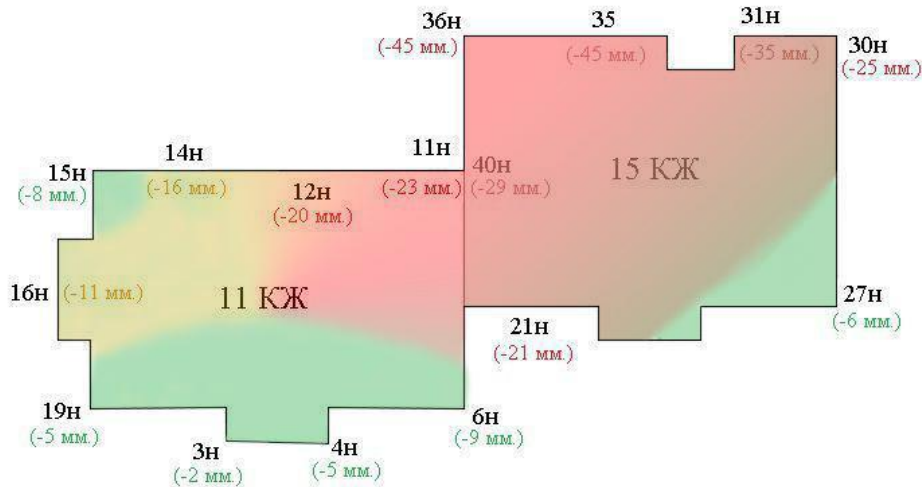


Рис. 1. План установки реперов на жилом комплексе и величины осадок по состоянию на 17.09.18: 3н-37н – номера реперов с инструментальным измерением осадок (красным цветом показаны зоны максимальных осадок зданий, зеленым – минимальных)

На первом и втором уровне наблюдается закономерный крен по перекрытию в сторону пятнадцатизэтажной секции жилого дома. Расчетные значения крена по перекрытию паркинга в зоне максимальных деформаций составляют 0,0056 д.ед. (паркинг – 15 этажная секция) и 0,003645 по перекрытию пятнадцатизэтажной секции. Величина расчетного крена 11-этажной секции 0,00323 д.ед.

В результате оценки технического состояния строительных конструкций паркинга выявлены горизонтальные, наклонные и вертикальные трещины в цокольной части, отслоение и локальные разрушения отмостки здания по всему периметру стен, наклонные сквозные трещины в швах между фундаментными блоками в подземной части подпорных стен, сквозные трещины на всю высоту этажа во внутренних самонесущих стенах и подпорных стенах. Отдельные трещины в горизонтальных и вертикальных элементах каркаса, трещины в местах сопряжения пола со стенами и места локальной просадки пола паркинга, трещины в местах сопряжения конструкций кровли с парапетом.

Выявлены несоответствия проекту при устройстве грунтовой подушки. На основании выполненных геологических изысканий грунтовая подушка состоит из доменного шлака с незначительными включениями насыпного грунта. В скважине, расположенной в 1,0 м от наружной стены паркинга грунтовая подушка отсутствует.

Для формирования картины динамики развития фаз увлажнения массива и количественной оценки основных факторов их формирования была построена численная модель лессового массива, на основе конечно-элементной аппроксимации участка застроенной территории жилого комплекса. Размеры модели за-

даны с условием минимизации влияния ее контуров на напряженно-деформированное состояние моделируемой области и охватывают территорию протяженностью 80 м и мощностью грунтовой толщи 42 м. Грунтовый массив разбит сетью треугольных элементов в соответствии с геолого-литологическим строением массива по линии разреза с наибольшими деформациями сооружений. Также заданы нулевые перемещения на боковых границах модели и по ее нижнему контуру, соответствующему подошве песков. По документации известно [3-4], что жилые секции возведены на висячих сваях длиной от 20 до 27 м с уширенной пятой. Исходя из этого, в модели задавался цельный фундамент, эквивалентный по нагрузкам воздействию свайного основания. Силовое взаимодействие между элементами модели обеспечивалось действием гравитационных сил, обусловленных весом грунтовой толщи и сооружений. Численная модель состоит из 9 инженерно-геологических элементов, включая зоны распространения техногенного увлажнения (рис. 2), которое разделено на три фазы. На рис. 2 показано конечное положение фаз замачивания грунта, которые связаны с периодом наиболее интенсивных утечек при аварии водонесущих коммуникаций.

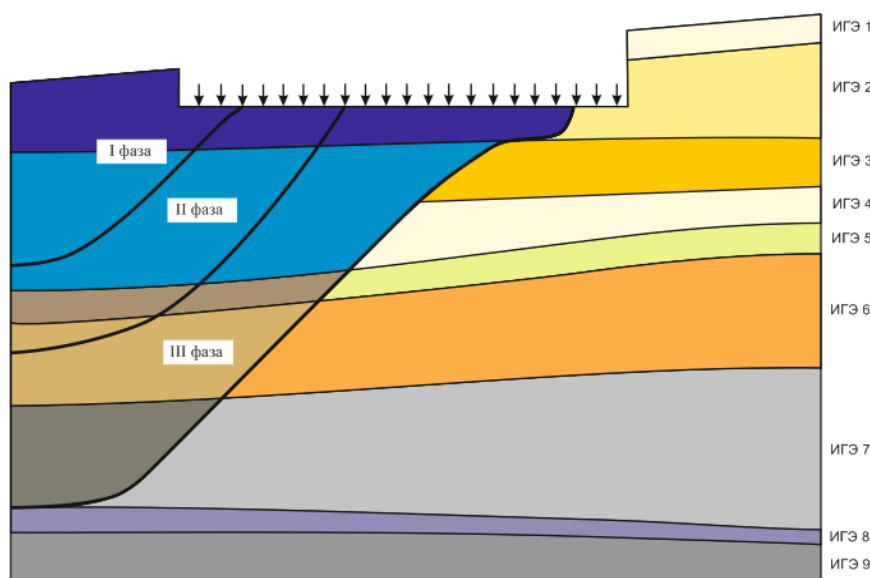


Рис. 2. Геологический разрез с фазами техногенного увлажнения моделируемой области (I-III – фазы увлажнения): 1- насыпные грунты, 2 - 7 – верхнечетвертичные отложения лессового комплекса; 8, 9 – нижнечетвертичные аллювиальные кварцевые пески

Устойчивость грунтового массива оценивалась по характеру развития зон пластического деформирования. Анализ напряженно-деформированного состояния породного массива показал, что обводненные грунты в основании частично находятся в состоянии пластического течения (слои 4-7). Развитие сдвиговых деформаций наиболее характерно в пределах зоны основного увлажнения, а также границы ее фронта. Развитие разрывных нарушений у кромки контура зданий соответствует формированию трещин отрыва. Отмечается активизация осадок

зданий при одночасному фронтальному і субвертикальному техногенному зволоженню ґрунтів.

Аналіз фактичних даних осадових порід і результати моделювання показали пряму залежність між активізацією осадових порід і сезонними факторами. Деформаційні всплески приурочені до осені-зимових періодів - аналіз погодних умов показує, що дані періоди з опадами, переважно дощовими, і активне сніготаяння, співпали з активізацією деформаційних процесів. Фаза затухання осадових порід відповідає періоду проведення інженерних заходів по оновленню водонесучих комунікацій, однак остаточної стабілізації осадових порід не відбувається. Після пробного етапу ін'єкційної цементації зафіксовані збільшені значення прискорення осадових порід, які наклалися на сезонний всплеск.

При виконанні цементаційних робіт, на дослідному ділянці спостерігався значущий перевищення (близько 40-45%) цементного розчину порівняно з запроектованим, при цьому проектні тиски не були досягнуті. Наступними інженерно-геологічними дослідженнями на дослідному ділянці виявлені субвертикальні і вертикальні тріщини, в основному, в ІГЭ 4 і 5, які, очевидно, привели до поглинання цементного розчину. Інформація про наявності тріщин і порожнин, утворених в ґрунті під впливом техногенної фільтрації і вертикальних підвижок при навантаженні схилу підтверджено при візуальному огляді комунікаційних колодців в околицях ж/к. При цьому фіксувалися також скоплення ґрунту, винесені внаслідок суффізійних процесів [5, 6].

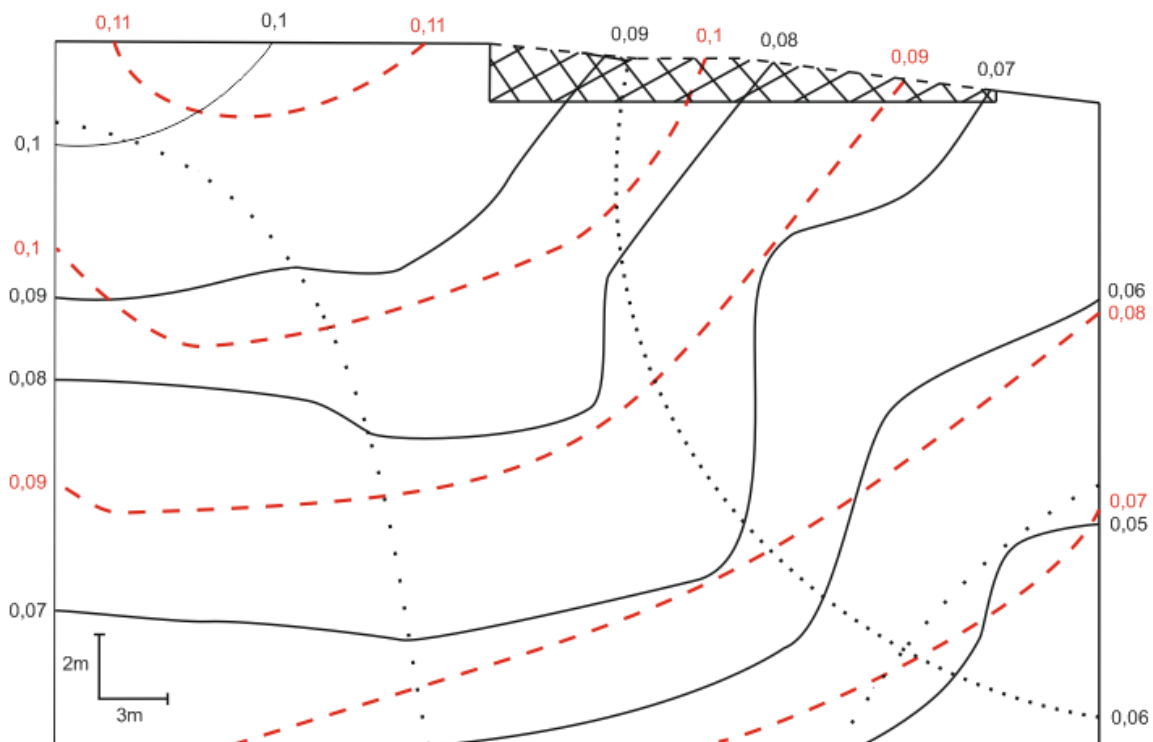


Рис. 3. Ізолінії: 1- градієнтів енергії ґрунтового схилу; 2 ---- потенціал активізації схилу;- прогнозна поверхня сколювання;- межа техногенного зволоження

Согласно методике [2], учитывающей структурные связи в лессовых грунтах, построено поле физических градиентов вертикального сечения грунтового массива (см. рис. 3), с учетом трех видов энергии – недоуплотнения пород, гравитационного положения и деформаций. Пересечения изолиний градиентов деформаций и изолиний суммарной потенциальной энергии в лессовом массиве показывают положение критических поверхностей внутри грунта. По нормальям выделены прогнозные деформационные зоны в теле склона с их количественной характеристикой по величине потенциалов активации. В отличие от классических схем оценки устойчивости склонового массива [2, 6] в данной модели учитывается просадочность лессовых пород в виде поля потенциалов с выделением прогнозных зон опасных деформационных процессов.

Наличие трещин и пустот в массиве, образовавшиеся в грунте под действием техногенной фильтрации и вертикальных деформаций склона, были заданы в виде зон с соответствующими значениями прочностных свойств пород. Наиболее опасные зоны располагаются в пределах ИГЭ 4 и локально в ИГЭ 5 и 6. Потенциал активации склона в этих зонах изменяется в пределах 0,07-0,08. Изолинии градиентов энергии массива имеют выраженные экстремумы в зонах наибольших деформаций. Граничное значение градиента потенциала активации для диапазона потенциалов 0,08-0,09 составило 0,00125. При этом значении в лессовом массиве активизируются процессы глубинной эрозии с последующей стадией оползня-течения [6, 7].

Мероприятия по стабилизации деформаций жилого комплекса. По результатам моделирования установлено, что основной причиной появления деформаций жилых секций и паркинга является одновременное фронтальное и субвертикальное техногенное увлажнение лессового комплекса грунтов, относящихся по просадочности ко второму типу. Динамика увлажнения обусловлена неоднородными по интенсивности и расположению в пространстве источниками увлажнения из водонесущих коммуникаций.

Абсолютные величины деформаций не являются критическими, но диапазон их изменения привел к возникновению трещин в несущих элементах и появлению кренов перекрытий. При этом состояние конструкций жилых секций и паркинга оценивается по действующим нормативам как удовлетворительное.

Динамика осадок реперов во времени тесно коррелирует с режимом увлажнения. Фаза затухания осадок, с некоторым отставанием, соответствует периоду проведения инженерных мероприятий по обновлению водонесущих коммуникаций. В связи с этим, не ожидается окончательная стабилизация осадок. Это подтверждается экспертными расчетами [4, 5] суммирования сил отрицательного трения по поверхности свайного фундамента и возникновению концентрированного давления в основании свай более $1,4 \cdot 10^3$ кПа, что может привести к потере сцепления свай с уширенной пятой.

Согласно оценке по моделированию напряженно-деформированного состояния свайного фундамента с учетом произошедших неравномерных осадок по периметру жилых зданий показано, что упругий режим их деформирования не исчерпан.

В качестве инженерных мероприятий по предотвращению дальнейших деформаций жилого комплекса рассмотрены варианты перераспределения нагрузок от жилых секций на дополнительное свайное поле, регулируемое увлажнение основания и тампонажное закрепление грунтов. Наиболее приемлемо в сложившихся условиях укрепление грунтового основания способом высоконапорной цементации [8]. Выбрано проведение первого этапа укрепления непосредственно под ростверком, где наблюдаются наибольшие осадки. Значительный опыт таких работ показал, что в этом случае происходит умеренное увеличение модуля деформации грунтов вблизи свай до 2-х раз и уменьшение пористости до 20%, при одновременном устранении просадочности и эффекта отрицательного трения по боковой поверхности свай. Эти факторы были основными в наблюдавшихся процессах деформаций зданий.

Технологическая схема цементации грунтового основания принята поинтервальной в направлении сверху вниз (в связи с неудовлетворительной обратной засыпкой) и распределением инъекционных скважин под ростверком от наиболее просевших участков к наименьшим. Давление нагнетания выбрано в режиме перехода от фильтрационного инъецирования к управляемому гидроразрыву, что контролируется по спаду давления и увеличению расхода тампонажной смеси.

Окончательной фазой тампонирования служит фаза стабилизации расхода и давления после гидроразрыва, которая обеспечивает цементационное укрепление зон содержащих отжатую воду. После проведения цементационного укрепления грунтового основания жилых секций следует продолжить мониторинг их деформаций и конструкций паркинга, для окончательного решения вопроса об укреплении грунтов под всем комплексом.

Для обеспечения надежной эксплуатации жилого комплекса выполнена реконструкция магистрального водопровода по ул. Симферопольской, а также сооружен водосборный колодец с автоматической откачкой воды в ливневую канализацию.

Выводы. 1. Основной причиной появления деформаций жилых секций и паркинга является одновременное фронтальное и субвертикальное техногенное увлажнение лессового комплекса грунтов, относящихся по просадочности ко второму типу. Динамика увлажнения обусловлена неоднородными по интенсивности и расположению в пространстве источниками увлажнения из водонесущих коммуникаций.

2. Динамика осадок реперов во времени тесно коррелирует с режимом увлажнения. Фаза затухания осадок, с некоторым отставанием, соответствует периоду проведения инженерных мероприятий по обновлению водонесущих коммуникаций. В связи с этим, не ожидается окончательная стабилизация осадок. Это подтверждается экспертными расчетами неблагоприятного суммирования сил отрицательного трения по поверхности свайного фундамента и возникновению концентрированного давления в основании свай более $1,4 \cdot 10^3$ кПа, что может привести к потере сцепления сваи с уширенной пятой.

3. Модельные оценки напряженно-деформированного состояния свайного фундамента с учетом произошедших неравномерных осадок по периметру жилых зданий показывают, что упругий режим их деформирования не исчерпан.

4. В качестве инженерных мероприятий по предотвращению дальнейших деформаций жилого комплекса рассмотрены варианты перераспределения нагрузок от жилых секций на дополнительное свайное поле, регулируемое увлажнение основания и тампонажное закрепление грунтов. Наиболее приемлемо в сложившихся условиях укрепление грунтового основания способом высоконапорной цементации.

5. Рекомендуются проведение первого этапа цементации непосредственно под ростверком, где наблюдаются наибольшие осадки. Значительный опыт таких работ показал, что в этом случае происходит умеренное увеличение модуля деформации грунтов вблизи свай до 2-х раз и уменьшение пористости до 20%, при одновременном устранении просадочности и эффекта отрицательного трения по боковой поверхности свай.

6. Технологическую схему цементации грунтового основания необходимо принять поинтервальной в направлении сверху вниз (в связи с неудовлетворительной обратной засыпкой) и распределением инъекционных скважин под ростверком от наиболее просевших участков к наименьшим. Давление нагнетания следует выбрать в режиме перехода от фильтрационного инъецирования к управляемому гидроразрыву, что контролируется по спаду давления и увеличению расхода тампонажной смеси. Окончательной фазой тампонирующая должна служить фаза стабилизации расхода и давления после гидроразрыва, которая обеспечивает цементационное укрепление зон содержащих отжату воду.

7. После проведения цементационного укрепления грунтового основания жилых секций следует продолжить мониторинг их деформаций и конструкций паркинга.

8. Для обеспечения надежной эксплуатации жилого комплекса необходимо рассмотреть возможность сооружения сопутствующего дренажа, для перехвата утечек из магистрального водопровода по ул. Симферопольской. При этом возможен вариант сооружения водосборного колодца с автоматической откачкой воды в ливневую канализацию.

Перечень ссылок

1. Мокрицкая, Т. П., Богаченко, Л. Д. (2013). Особенности формирования эрозионно-оползневых процессов на примере бассейна б. Тоннельная. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Геологія. Географія.* 84–90.
2. Садовенко, И.А., Деревягина, Н.И. (2012). О потенциале активации оползневого лессового массива. *Науковий вісник НГУ.* 80-84.
3. Научно-технический отчет об инженерно-геологических изыскательских работах (бурение двух скважин) для определения перечня возможных мероприятий по ликвидации деформаций, просадочности и повреждений конструкций здания по ул. Симферопольской, 11 в г.Днепропетровске, объект № 8103/83, выполненный государственным предприятием «УКРНИИНТИЗ» в 2010 г. - 118 с.
4. Научно-технический отчет по мониторингу двух секций жилого дома по улице Симферопольской, 11, в городе Днепропетровске, выполненный ООО «РемБуд» в 2010 г. - 45 с.

5. Заключение по результатам проведения работ на опытном участке усиления основания фундаментов жилого комплекса “Славный” по ул. Симферопольской, 11 в г. Днепропетровске, выполненный ООО ПИ «Днепрпроектстальконструкция» в 2011 г. - 45 с.
6. Садовенко, И.А., Деревягина, Н.И. (2013). Экспериментальные исследования суффозионных и эрозионных деформаций лессовых пород. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 126-131.
7. Puhach, A.M. & Dereviagina, N.I. (2019). Study of dynamics of deformation of foundation base in conditions of technogenic stage-by-stage underflooding of loess massif. *Труды Сампаявских чтений «Инновационные технологии – ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики Республики Казахстан*, Алматы. 249 – 253.
8. Головки, С.И. (2010). *Теория и практика усиления грунтовых оснований методом высоконапорной цементации*. Днепропетровск: Пороги.
9. Бондарик, Г.К. (1976). *Закономерности пространственной изменчивости лессовых пород*. Москва: Недра.

АННОТАЦІЯ

Мета. Обґрунтування гідрогеомеханічних параметрів і розробка технічних рекомендацій для робіт з підсилення основ фундаментів, які дозволяють контролювати, прогнозувати і керувати в реальному часі процесами, що відбуваються в основі будівлі, і льосовому масиві в цілому.

Методи досліджень. Систематизація геолого-гідрогеологічних даних, факторно-діапазонний аналіз параметрів, чисельне моделювання геомеханічних процесів, інженерний аналіз технічних ситуацій.

Результати досліджень. На підставі аналізу фактичних даних і результатів чисельного моделювання досліджено закономірності деформацій житлового комплексу внаслідок техногенного зволоження льосового масиву ґрунтів. Встановлено, що динаміка осадок реперів в часі тісно корелює з режимом зволоження. Побудована модель порушеного ґрунтового масиву, яка враховує специфічні особливості льосових порід. Як інженерні заходи щодо запобігання подальшим деформаціям житлового комплексу розглянуті варіанти перерозподілу навантажень від житлових секцій на додаткове свайне поле, регульоване зволоження основи і тампонажне закріплення ґрунтів. Найбільш прийнятно в умовах, що склалися, зміцнення ґрунтової основи способом високонапірної цементації.

Наукова новизна. За результатами аналізу фільтраційних властивостей техногенно навантаженого льосового масиву визначений інтервал глибин, і геологічні шари, які характеризуються найбільш інтенсивним розвитком деформаційних і суффозионних процесів. Дана кількісна оцінка моменту переходу масиву в нестійкий стан, а також зв'язок фільтраційних процесів з формуванням зсувів течії.

Практична значимість. Рекомендована технологічна схема цементації ґрунтової основи, а також заходи після зміцнення фундаменту, такі як моніторинг подальших деформацій самого комплексу і конструкцій паркінгу, можливості споруди супутнього дренажу.

Ключові слова: суффозія, глибинна ерозія, льосові породи, гідрогеологічні умови.

ABSTRACT

The **purpose** of this paper is to justify hydrogeomechanical parameters and to develop technical recommendations for works on strengthening the bases of foundations, which allow controlling, predicting and managing processes occurring at a base of a building and a loess massif as a whole in real time.

The methodology. The systematization of geological and hydrogeological data, factor-range analysis of parameters, numerical modeling of geomechanical processes, engineering analysis of technical situations.

Findings. Based on the analysis of actual data and the results of numerical modeling, dependencies of deformations of the investigated residential complex due to technogenic moistening of a loess massif of soils are investigated. It was established that a dynamics of subsidence of bench marks in time is closely correlated with a moistening mode. Options of redistribution of loads from residential sections onto an additional pile field, regulated base moistening and grouting of soils are considered as engineering measures to prevent further deformation of the residential complex. Stabilization of a soil base by means of high-pressure cementation is the most acceptable in the present conditions.

The originality. Analysis of filtration properties of loess with technogenic loads helps determine depth interval and geological layers characterized by maximum development of deformation processes and suffusion ones. Moment of a mass transition into unstable condition is estimated quantitatively as well dependence of filtration processes on stream landslides formation.

Practical implications. Technological scheme of cementation of the soil base is recommended, as well as measures after the base stabilization, such as monitoring of further deformations of the complex itself and parking structures, and possibilities of constructing auxiliary drainage.

Keywords: *suffosion, deep erosion, loess soils, hydrogeological conditions*