

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ  
“НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ”

На правах рукописи

**ДЕРЕВЯГИНА НАТАЛЬЯ ИВАНОВНА**

**УДК 624.131:631.48:632.5**

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ  
УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕССОВЫХ МАССИВОВ С УЧЕТОМ ИХ  
ГЕНЕЗИСА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

**Специальность 05.15.09 – “Геотехническая и горная механика”**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, проф.  
Садовенко И.А.

Днепропетровск – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	5
1	АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, КОТОРЫЕ ОПРЕДЕЛЯЮТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕССОВЫХ ПОРОД В ПРИРОДНОМ И НАГРУЖЕННОМ СОСТОЯНИИ .....	11
1.1	Анализ факторов и условий развития геомеханических процессов в лессовых массивах .....	13
1.2	Основные факторы формирования физико-механических свойств лессовых массивов при их генезисе .....	17
1.3	Состояние теоретических и практических разработок в прогнозиро- вании и управлении геотехнической устойчивостью лессовых мас- сивов.....	22
1.4	Постановка задач исследований.....	33
	Выводы.....	34
2	ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОСЛАБЛЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ ЛЕССОВЫХ ПОРОД И ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИХ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ТЕХНОГЕННОМ НАГРУЖЕНИИ .....	36
2.1	Выбор и обоснование методики проведения стабилметрических испытаний лессовых пород.....	36
2.2	Результаты исследования влияния фильтрации в лессовом массиве на состояние породы.....	41
2.3	Формирование механизма суффозионных и эрозионных деформа- ций лессовых пород.....	48
2.4	Обоснование энергетической модели устойчивости лессовых мас- сивов и методика прогнозирования оползней.....	56
	Выводы.....	63

3	ТЕХНОГЕННЫЕ УСЛОВИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД – КАК ОСНОВНОЙ ФАКТОР АКТИВИЗАЦИИ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ.....	65
3.1	Обоснование схемы исследований и геофильтрационные условия объекта.....	65
3.1.1	Характеристика результатов предыдущих исследований и геоморфология объекта.....	65
3.1.2	Геолого-гидрогеологическое строение и формирование техногенного режима подземных вод.....	69
3.1.3	Инженерно-геологические условия исследуемой территории .....	75
3.1.4	Закономерности формирования поля инфильтрационного питания..	79
3.2	Математическая и физическая основа численного моделирования гидродинамических процессов.....	83
3.2.1	Математическая реализация модели геофильтрации.....	83
3.2.2	Требования к схематизации объекта и ее последовательность.....	89
3.2.3	Геофильтрационная схематизация объекта исследований.....	91
3.3	Постановка и анализ результатов решения обратных идентификационных задач. Адаптация модели к объекту.....	97
3.3.1	Идентификация модели по физической аналогии.....	98
3.3.2	Обоснование динамического соответствия модели и объекта.....	103
	Выводы.....	114
4	РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕССОВЫХ ПОРОД И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ЗАСТРОЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ.....	116
4.1	Гидродинамические изменения послеоползневого периода на ж/м “Тополь”.....	116
4.2	Прогнозные гидродинамические решения задач на объекте исследований .....	122

4.3	Определение потенциальных объектов развития оползневых процессов .....	126
4.3.1	Оценка условий формирования и развития суффозионных процессов.....	126
4.3.2	Апробация методики оценки устойчивости склона ж/м “Тополь” с учетом гидродинамической обстановки.....	131
4.3.3	Апробация методики оценки устойчивости склона по ул. Симферопольской (г. Днепропетровск).....	139
4.4.	Рекомендации по обеспечению технически и экологически приемлемого состояния техногенно нагруженных лессовых массивов на примере ж/м “Тополь” и ул. Симферопольской (г. Днепропетровск).....	147
	Выводы.....	148
	Заключение.....	150
	Список использованных источников.....	152
	Приложение А.....	166
	Приложение Б.....	169



## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Среди многообразия геологических образований своими специфическими инженерно-геологическими свойствами выделяются лессовые грунты. Их особенности характеризуются малой влажностью, низкой водостойкостью, высокой пористостью, просадочностью и непосредственно связаны с процессами оползнеобразования. Актуальность инженерного противодействия оползням имеет важное значение в связи с распространением лессовых массивов на территории Украины – до 60%. При массовом строительстве в городах возникает необходимость осваивать неблагоприятные территории, в частности оползнеопасные склоны. На уже застроенных участках возникают проблемы потери устойчивости лессовых массивов в результате многочисленных утечек из водопроводных коммуникаций, недостаточного дренажа (или его отсутствия), подрезки склонов, нарушения норм эксплуатации зданий и сооружений, а главное – подтопление. Днепропетровская область занимает одно из первых мест в Украине по количеству оползнеопасных территорий. На сегодняшний день их площадь составляет более 145 км<sup>2</sup>.

Действующие на данный момент нормативные документы, применяемые для проектирования и строительства на лессовых грунтах, не учитывают в полной мере их специфику. Результаты исследований, положенные в основу этих нормативов, были получены в середине XX века. Научно обоснованных подходов, которые бы учитывали в полной мере как геомеханические, так и гидродинамические факторы формирования гидрогеомеханической устойчивости лессовых массивов, до сих пор не разработано. Это предопределило необходимость обоснования нового подхода к оценке состояния оползневых лессовых массивов. Поэтому изучение геомеханических и фильтрационных процессов массива в условиях техногенной нагрузки, а также разработка методики расчета параметров устойчивости склонов, которая базируется на специфических особенностях лессовых пород, является актуальной научной и практической задачей.

**Связь работы с научными программами, планами и темами.** Диссертация является составной частью научно-исследовательских работ Государственного ВУЗ “Национальный горный университет” по темам ГП-443 “Геолого-гидрогеологические и геофизические обоснования параметров эксплуатации и аккумуляции тепловой энергии техногенных газогидротермальных месторождений Донбасса” (№ госрегистрации 0111U002813), ГП-459 “Научные основы рационального использования угольных ресурсов среднего карбона Западного Донбасса” (№ госрегистрации 0113U000403), а также соответствует направлениям хозяйственных договоров с предприятиями (№№ 040823 – 040828, 040830).

**Цель работы** заключается в обосновании параметров устойчивости лесовых массивов с учетом генезиса, энергетических и гидродинамических характеристик грунтового склона.

В связи с этим в диссертационной работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Выполнен анализ факторов, которые определяют потерю устойчивости лесовых массивов в естественном и техногенно нагруженном состоянии.
2. Оценены закономерности ослабления структурной устойчивости техногенно нагруженных массивов лесовых пород.
3. Определены техногенные условия и параметры формирования режима подземных вод в качестве основного фактора активизации оползневых процессов.
4. Обоснована и апробирована энергетическая модель оценки потенциальной оползнеопасности лесовых массивов и разработаны рекомендации по инженерной защите застроенных территорий.

**Идея работы** заключается в обновлении критериев устойчивости массивов и регулировании геомеханических и гидродинамических режимов нарушенных лесовых грунтов на основе закономерностей изменений их свойств в различных условиях техногенной нагрузки.

**Объектом исследований** являются гидрогеомеханические процессы, определяющие изменение свойств присклоновых массивов лессовых пород под влиянием техногенной фильтрации.

**Предметом исследований** являются параметры деформаций лессовых массивов, фильтрационные и энергетические закономерности формирования их неустойчивого состояния, которые определяют характер деформационных нарушений.

**Методы исследований.** Для достижения цели и решения задач, поставленных в диссертационной работе, выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, содержащий анализ и систематизацию литературных источников по состоянию изучаемого вопроса, лабораторные эксперименты по изучению характера деформаций при фильтрационных процессах, аналитические расчеты, эмпирический анализ фактических данных, численное моделирование фильтрационных, геомеханических, а также энергетических процессов оползневых лессовых массивов, инженерную апробацию результатов.

### **Научные положения**

1. Анизотропия лессового массива подвергается инверсии вследствие техногенного влияния фильтрационных и деформационных процессов в присклоновых областях при девиаторе напряжений 150-200 кПа, что приводит к возникновению и активизации глубинной эрозии в лессовых породах и провоцирует оползни течения, при этом значения коэффициента фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях отличаются до 9 раз.

2. Основным параметром, определяющим оползнеопасность лессового массива, является потенциал активации склона в виде суммы градиентов полной энергии и градиентов деформаций. Потенциал активации в стадии активизации оползневого процесса находится в диапазоне 0,08-0,09 и является критическим.

### **Научная новизна полученных результатов**

1. Впервые установлено явление инверсии фильтрационной анизотропии лессов по сравнению с их природным состоянием, которое следует отнести к

техногенным изменениям грунтовых массивов. Доказано, что в результате этого возникают процессы глубинной эрозии с предваряющей фазой формирования гидравлически инертных полостей.

2. Обоснована математическая модель фильтрационных процессов лессового массива по конечно-разностной схеме в условиях техногенной нагрузки в до- и послеоползневой период. Получены количественные показатели изменения гидродинамического режима подземных вод под влиянием техногенной нагрузки и выделены потенциально опасные зоны формирования оползней в массиве.

3. Обоснована методика моделирования устойчивости лессовых грунтов, учитывающая сложное сочетание природно-геологических и геодинамических факторов в виде синтеза энергетической и механистической моделей, в основу которых положены данные, полученные при проведении стабилметрических испытаний образцов грунта.

4. Впервые обоснованы параметры потенциала активации лессового массива и его количественные диапазоны, позволяющие прогнозировать различные фазы оползневых процессов.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается результатами анализа и оценки фактических и экспериментальных данных по просадочным и фильтрационным деформациям лессовых грунтов Приднепровского региона, использованием фундаментальных положений гидродинамики и геомеханики, достаточной сходимостью (до 85%) результатов прогнозных расчетов и натурных измерений, моделированием с параметрами фильтрационных свойств лессовых грунтов полученными экспериментальным путем, а также апробацией методики на оползневых массивах.

**Научное значение работы** заключается в установлении закономерностей фильтрационных и деформационных процессов при формировании оползней течения с выделением критической фазы фильтрационной инверсии и прогнозом устойчивости грунтовых склонов в условиях техногенной нагрузки.

**Практическое значение работы:**

1. На основании установленных оползнеобразующих фильтрационных параметров выяснен механизм формирования оползней течения в лессовых грунтах, а также обоснованы инженерные меры противодействия возникновению и развитию аварийных ситуаций на склоновых массивах.

2. Разработана методика моделирования устойчивости лессовых грунтов, которая учитывает сложное сочетание природно-геологических и геодинамических факторов в виде комплекса энергетической и механистической моделей, что позволяет прогнозировать состояние оползневых массивов по критическому значению потенциала активации.

**Практическая ценность работы** состоит в обосновании методического подхода прогнозирования процессов оползнеобразования лессовых склонов, который является основой для принятия технических решений по регулированию геотехнического состояния массива и обеспечения его безаварийной эксплуатации с минимальными затратами.

**Реализация работы.** Результаты исследований внедрены ГП “Днепро-ГИИНТИЗ” в виде рекомендаций по проектированию и проведению мониторинговых и инженерных мероприятий на потенциально оползнеопасном участке ж/м “Тополь” и проекте усиления оснований фундаментов дома ОСМД ЖК “Славный” институтом “Днепропроектстальконструкция”.

**Личный вклад соискателя** заключается в формулировке цели, задач исследований, научных положений, выводов и рекомендаций; постановке и выполнении экспериментальных исследований, создании и обосновании фильтрационных и энергетических моделей; разработке технических решений по обеспечению безаварийного режима эксплуатации склоновых массивов.

**Апробация результатов исследований.** Основные результаты исследований докладывались, обсуждались и получили позитивную оценку на межвузовской научно-практической конференции молодых ученых “Наука и техника: перспективы XXI столетия” (Днепропетровск, ПДАБА, 2010), The 5 – 6<sup>th</sup> International Forum for Students “Widening Our Horizons” (Днепропетровск, НГУ,

2010 – 2011), VII международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Географія, геоекологія, геологія: досвід наукових досліджень” (Днепропетровск, ДНУ, 2010), международном форуме-конкурсе молодых ученых “Проблемы недропользования” (Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова, 2012, 2015), 3<sup>rd</sup> International Geological Conference (Львов, 2012), IV – V всеукраїнських науково-технічних конференціях “Наукова весна” (Дніпропетровськ, ДВНЗ “НГУ”, 2013 – 2014), XVI международной научно-практической конференции “Природные и математические науки в современном мире” (Новосибирск, 2014), международной конференции “Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості та транспорту 2014” (Днепропетровск, ДВНЗ “НГУ”, 2014).

**Публикации.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 17 научных работах, из которых 6 работ опубликовано в специализированных изданиях (из них 1 - в зарубежном издании, 3 – в журналах, входящих в международные наукометрические базы), 11 – в сборниках конференций.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 146 наименований на 13 страницах и 2 приложений на 5 страницах, содержит 143 страницы машинописного текста, 60 рисунков и 17 таблиц. Общий объем работы 170 страниц.

Данная работа выполнена на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Государственного ВУЗ “Национальный горный университет” под руководством д.т.н., профессора И.А. Садовенко, которому автор глубоко и искренне признательна.

## РАЗДЕЛ 1

### АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, КОТОРЫЕ ОПРЕДЕЛЯЮТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕССОВЫХ ПОРОД В ПРИРОДНОМ И НАГРУЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Среди многообразия геологических образований своими специфическими инженерно-геологическими особенностями выделяются лессовые грунты. Ряд особенностей, среди которых преобладают малая естественная влажность, слабая водоустойчивость, высокая пористость и просадочность, выделяет их среди других грунтов. Перечисленные свойства напрямую связаны с процессами оползнеобразования.

Прогноз оползней и эффективное противодействие им, на данное время, остается актуальной задачей. Актуальность инженерного противодействия оползням имеет важное значение в связи с распространением лессовых массивов на территории Украины – до 60%. При массовом строительстве в городах возникает необходимость осваивать неблагоприятные территории, в частности оползнеопасные склоны. Днепропетровская область занимает одно из первых мест в Украине по количеству оползнеопасных территорий, их площадь составляет более 145 квадратных километров. Считается, что основным фактором оползнеобразования являются специфические инженерно-геологические особенности лессовых грунтов. Количественное распределение оползней указано в табл. 1.1 и рис. 1.1 [89, 91].

Масштабный оползень произошел в 1997 году на территории ж/м “Тополь” (в г. Днепропетровске) (рис. 1.2). Началом оползневого процесса был провал дерева вблизи жилого дома в 4 часа утра (со слов очевидцев, оно буквально “уплыло” под землю), а также в районе ж/д станции “Встречная”, где погрузились в грунтовую массу несколько гаражей. После этого, стремительно разрушая склон, оползневой процесс достиг здания детского сада, а к 7 часам утра девятиэтажного жилого дома. За 40 минут от этого дома остались руины. Также была разрушена школа. Выполненные расчеты показали, что склон отве-

чает нормативу устойчивого состояния. В течении 30 дней, предшествовавших оползнию, фиксировались конусы выноса лессовых пород в тальвеге балки [91].

Таблица 1.1 – Сведения о распространении оползней на территории Украины

№ п/п	Административная единица	Лессовые грунты I и II типов по условиям проседания		Подтопление	
		площадь распространения, тыс. км <sup>2</sup>	пораженность, %	площадь распространения, тыс. км <sup>2</sup>	пораженность, %
1	Винницкая	19,63	74,1	0,005	0,02
2	<b>Днепропетровская</b>	<b>22,28</b>	<b>69,8</b>	<b>7,29</b>	<b>22,85</b>
3	Запорожская	17,84	65,6	0,01	0,04
4	Кировоградская	20,33	82,6	0,006	0,02
5	Одесская	13,92	41,8	20,575	61,8
6	Полтавская	16,55	57,46	0,15	0,52
7	Харьковская	20,84	66,4	0,12	0,38
8	Херсонская	17,60	61,8	11,297	39,63
9	Черкасская	15,07	72,1	0,06	0,29
Всего по Украине		267,17	44,25	78,65	13,02

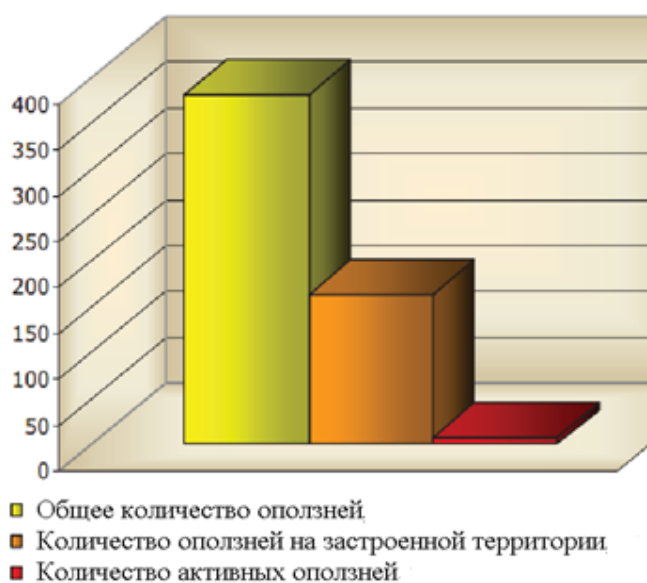


Рисунок 1.1 – Распределение оползней в пределах Днепропетровской области





Рисунок 1.2 – Оползень на ж/м “Тополь” (1997 г.)

Нормативные документы, применяемые для проектирования и строительства на лессовых грунтах, не учитывают в полной мере их специфику. Это предопределило необходимость разработки нового подхода к оценке состояния оползневых лессовых массивов.

### **1.1. Анализ факторов и условий развития геомеханических процессов в лессовых массивах**

В лессовых породах происходят гидрогеомеханические процессы, обусловленные эндогенными, экзогенными, а также техногенными факторами. В комплексе они приводят к изменению состава, структуры и свойств лессов, соответственно меняется и состояние массивов, сложенных ими. Так как лессовые породы находятся в верхней части геологического разреза, то в изменении их строения и рельефа основная роль принадлежит экзогенным и антропогенным геологическим процессам. Среди них следует назвать просадочные, эрозионные, суффозионные, обвальные, а также подтопление и замачивание.

Изучению закономерностей развития просадочных деформаций в лессовых породах, а также их распространении посвящены работы Ю.М. Абелева, В.П. Ананьева, В.В. Аскалонова, Ю.А. Багдасарова, Л.Г. Балаева, Г.К. Бондарика, С.Ф. Власова, М.Ф. Веклича, М.Н. Гольдштейна, И.М. Горьковой, А.А. Григоряна, Н.Я. Денисова, А.М. Дранникова, В.С. Истоминой, С.Н. Клепикова, Н.И. Кригера, В.И. Крутова, А.К. Ларионова, И.М. Литвинова, Г.М. Ломизе,

Г.А. Мавлянова, Н.А. Максимовой-Гуляевой, Р.Р. Микашиновича, А.А. Мустафаева, В.А. Обручева, Н.А. Осташева, А.Л. Рубинштейна, И.А. Садовенко, Е.М. Сергеева, Н.М. Соколова, В.Т. Трофимова, Н.А. Цытовича и др.

Важнейшим инженерно-геологическим свойством лессовых пород и слагаемых ими массивов является просадочность, которая выражается в их способности под действующей нагрузкой при увлажнении уменьшать свой объем. Просадочность лессовых пород определена особенностями их состава, строения и состояния [3, 9, 32, 67, 128]. Наиболее важными являются следующие положения:

- лессовые породы представляют собой структурированные песчано-глинисто-пылеватые дисперсные системы с резким преобладанием пылеватых частиц и обладающие малой гидрофильностью, что обуславливает отсутствие или очень малую величину их набухания при увлажнении;

- лессы характеризуются низкими значениями плотности ненарушенного скелета и высокой пористостью (42 – 55% и выше), причем среди пор преобладают открытые;

- до момента замачивания лессы обладают низкой природной (естественной) влажностью и, соответственно, находятся в твердом или полутвердом состоянии;

- в этих породах, нередко в больших количествах (до 10% и более) присутствуют карбонаты и водорастворимые соли, которые в условиях невысокой природной влажности обуславливают структуру переходного (коагуляционно-цементационного) типа с высокой прочностью структурных связей и всего грунта в целом;

- прочность такой структуры в лессовых породах по величине и по времени снижается при водонасыщении (вплоть до практически полного размокания небольших образцов, помещенных в спокойную водную среду) [3, 73, 128].

Основной фактор, влияющий на устойчивость лессовых массивов – это увлажнение. Лессовые породы при естественной влажности обладают относительно низкой деформируемостью и высокой прочностью. Их увлажнение до

значений, превышающих начальную просадочную влажность [64, 68], приводит к реализации просадочности как важной инженерно–геологической особенности лессовых пород и развитию просадочных деформаций в массивах, ими сложенных. Такие деформации возникают как при действии собственного веса пород массива, так и при воздействии нагрузки от сооружения [128]. При увлажнении лессов наблюдается комплекс их деформаций [2, 11, 13, 44, 73]: различные просадки, горизонтальные перемещения грунта, наклоны и горизонтальные смещения поверхности массива. Характеристике этих явлений посвящено много работ, среди которых можно выделить монографии Денисова Н.Я., Абелева Ю.М. и Абелева М.Ю., Ларионова А.К., Приклонского В.А., Ананьева В.П., Балаева Л.Г., Крутова В.И. и др. исследователей. В естественных условиях увеличение влажности грунтов, в основном, обусловлено повышением уровня подземных вод. Меньшее значение имеют атмосферные осадки за счет прева-лирования поверхностного стока. В техногенных условиях это нарушается за счет утечек из водонесущих коммуникаций (водопровод, канализация, теплосети), различных резервуаров, бассейнов, орошения земель и др.

Среди основных природных факторов, влияющих на устойчивость массивов лессовых пород можно выделить следующие.

1) Процессы эрозии и абразии, вследствие которых происходит изменение форм рельефа и создаются резкие очертания склона, что при определенной крутизне провоцирует оползневые процессы. Этому подвержены районы распространения лессовых грунтов, что обусловлено их невысокой водопрочностью, быстрым размоканием при взаимодействии с водными растворами. Опасность эрозии зависит от рельефа и крутизны склона.

2) Выветривание, провоцирующее нарушение связей в породах и образование трещин, приводящих к увеличению инфильтрации и, соответственно, последующему выщелачиванию из грунта солей. Вследствие выщелачивания в лессовых породах появляются ослабленные зоны с повышенной пористостью или полостями. Механическая суффозия может происходить как в засоленных лессовых грунтах вслед за выщелачиванием, так и в незасоленных их разно-

видностях. Особенно предрасположены к этому процессу лессовые породы с зернисто–пленочной структурой [73] и высокой активной пористостью. Вслед за механической суффозией в образовавшихся линейно ориентированных пустотах и зонах пород с повышенной пористостью может начаться внутрислово-вой размыв. Именно на этих участках массива возможно движение воды со значительной скоростью. Сюда же можно отнести гидростатическое и гидродинамическое давления, которые также имеют существенное влияние на процессы разрыхления и ослабления массива, суффозионные процессы и пр.

3) Гидрометеорологические условия, вызывающие поверхностные процессы эрозии, подмыв различных частей склона, образование оврагов, а также ослабление массива в целом при длительном воздействии влаги на грунт. Из климатических характеристик, определяющих опасность проявления эрозии, наибольшее значение имеет характер дождевых осадков, время их выпадения и особенно интенсивность. Наиболее опасны ливни, под их влиянием достаточно быстро разрушаются малопрочные структурные агрегаты почв, развитых на лессах, происходит закупорка почвенных пор, уплотнение поверхностного слоя почвы, увеличивая таким образом поверхностный сток и развитие эрозии [18, 62, 128].

4) Тектонические нарушения, создающие зоны ослабления в массиве и косвенно влияющие на оползнеобразование.

В большинстве случаев деформации зданий и сооружений обусловлены влиянием техногенных факторов, в частности инфильтрацией и подтоплением, которые провоцируют развитие гидрогеомеханических процессов в лессовых массивах.

Увеличение влажности пород может происходить также за счет конденсации паров воды в грунте. Увлажнение лессовых массивов происходит, как отмечалось, при техногенных утечках. Помимо этого режим влажности лессовых массивов нарушается при распашке полей, асфальтировании поверхности, массовой застройке территорий и в ряде других случаев.

Наибольшее изменение состояния лессовых пород наблюдается при долгосрочном (или постоянном), средне- и высоконапорном воздействии воды на линейных или площадных сооружениях. На примере левобережного канала Терско-Кумской оросительной системы показано, что в результате многолетней фильтрации воды из канала сформировалась обширная смоченная зона с влажностью до 28 – 30% [73]. Подобное длительное водонасыщение привело к исчезновению просадочности, хотя ее начальная величина достигала 5 – 10%. В зоне длительного увлажнения происходит значительная перестройка структуры грунта: уменьшение пористости от 50 до 37% и изменение агрегатной системы за счет увеличения содержания тонкодисперсной составляющей [3,79, 128].

В случае возникновения динамических воздействий, послепросадочное изменение структуры лесса может значительно увеличиваться.

## **1.2. Основные факторы формирования физико-механических свойств лессовых массивов при их генезисе**

Как отмечалось выше, лессовые породы при естественной влажности обладают низкой деформируемостью и относительно высокой прочностью. Их увлажнение до значений, превышающих начальную просадочную влажность, приводит к реализации просадочности как важной инженерно-геологической особенности лессов и развитию различных деформаций в массивах. Такие деформации возникают как при действии собственного веса пород массива, так и при воздействии нагрузки от сооружения [70, 128].

Изучению закономерностей образования и развития просадочных деформаций лессовых пород, а также их увлажнения как активатора указанных деформаций посвящены работы таких ученых как Ю.М. Абелева, В.П. Ананьева, Л.Г. Балаева, М.Н. Гольдштейна, Н.Я. Денисова, В.С. Истоминой, Н.И. Кригера, В.И. Крутова, А.К. Ларионова, Г.М. Ломизе, Г.А. Мавлянова, А.А. Мустафаева, А.Л. Рубинштейна, Р.А. Токаря и др.

Структура лессовых пород является одной из важнейших их характеристик и в значительной степени определяет проявление тех или иных свойств при увлажнении. Состояние структуры регулируется рядом характеристик, среди которых следует назвать гранулометрический, минералогический и химический составы, пористость, состав цементирующего вещества и пр.

Лессовые породы являются полиминеральными. Основная масса минералов в них представлена первичными кластическими формами, а в меньшем количестве – вторичными коллоидно-дисперсными минералами. Минералы лессовых пород делятся на три типа – кластогенные, высокодисперсные и типоморфные (табл. 1.2) [3].

Таблица 1.2 – Минералы лессовых пород

<b>Генетические типы минералов</b>	<b>Фракции лессовых пород, мм</b>
Кластогенные	Песчаные ( $> 0,05$ )
	Пылеватые ( $0,05 - 0,005$ )
Высокодисперсные	Глинистые ( $< 0,005$ )
Типоморфные	Все фракции

Крупная фракция лессовых пород представлена более чем 50 различными минералами, из них только 10 – 15 являются породообразующими, остальные – акцессорные. Главная роль принадлежит кварцу и полевым шпатам. Карбонаты, слюды, гипс и другие минералы содержатся в меньшем количестве. Тонкодисперсные фракции представлены более чем 25 минералами, наиболее распространенными из которых являются гидрослюды, кварц, кальцит, монтмориллонит и каолинит.

Одной из наиболее характерных черт лессов является наличие в них карбонатов, которые представлены кальцитом и доломитом. В результате экспериментов [11, 14, 66] установлена взаимосвязь между прочностью породы и содержанием карбонатов, однако попытки выявления количественной связи между содержанием карбонатов и коэффициентом относительной просадочности оказались безуспешными. Наряду с труднорастворимыми карбонатами в лессах

содержатся и другие водорастворимые соединения. Средне- и легкорастворимые соли представлены в основном гипсом и хлористым натрием. Также встречаются  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{NaCO}_3$ , которые являются легкорастворимыми. Общее количество водорастворимых солей, которое характеризуется плотным остатком водных вытяжек, изменяется от 0,02 до 10%.

К водоустойчивым минералам относят кварц, полевые шпаты и др. кластогенные минералы, которыми практически полностью сложены песчаная и пылеватая фракции лессовых пород. К активно взаимодействующим с водой относят глинистые и др. высокодисперсные неглинистые минералы (кварц, гидроокислы, окислы, органика и т.д.). И водорастворимые, в зависимости от скорости растворения – быстрой (галоиды), средней (сульфаты), медленной (карбонаты) [3, 73].

Валовый состав лессовых пород в обобщенном виде имеет следующие значения (в%):  $\text{SiO}_2$  – 43-78,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 4-18,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,4-10,  $\text{CaO}_2$  – 2,7-16,  $\text{MgO}$  – 0,7-4,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,07-3,2,  $\text{K}_2\text{O}$  – 0,2-2,8,  $\text{SO}_3$  – 0,02-3,  $\text{CO}_2$  – 0-2,4. Кроме того, присутствуют  $\text{TiO}_2$  (0,5-0,8%),  $\text{MnO}$  (0,02-0,09%) и реже  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0-0,3%). Очень редко можно встретить окислы азота. Большой интерес представляют данные по валовым составам глинистых фракций лессовых пород. Так, во фракции < 5 мкм содержание  $\text{SiO}_2$  колеблется от 38 до 47%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – от 14 до 22%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – от 7 до 13% и  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  – от 0,8 до 3% [3, 79].

Гранулометрический состав лессовой породы характеризуется содержанием пылеватой фракции свыше 50% (0,05 – 0,005 мм). Остальная часть состоит из глинистых частиц (менее 0,005) и небольшого количества песчаных (2 – 0,05). Ранее, при рассмотрении особенностей гранулометрического состава лессовых пород, отмечалось, что они агрегированы. Исследования Н.Я. Денисова, А.К. Ларионова, В.М. Алексеева, И.М. Горьковой, Н.Н. Комиссаровой, Ю.И. Григорьевой и других показали, что агрегаты имеют размер крупной пыли и тонкого песка [40, 46, 73]. Выход агрегатов лессовой фракции при микроагрегатном анализе грунтов может достигать 80 – 95%. Н.Я. Денисов впервые поставил вопрос о необходимости изучения водоустойчивости агрегатов лессо-

вых породах и о связи ее со степенью просадочности пород [44, 46]. Дальнейшие экспериментальные исследования лессов позволили разделить макроагрегаты на неводостойкие и водостойчивые. К первым [73] относят агрегаты, имеющие коагуляционную природу связи, а также образованные за счет цементации легкорастворимыми солями. Водостойчивые агрегаты, составляющие основную часть структурной системы лессовых пород, подразделяются на водостойкие, водопрочные и высоководопрочные.

В природных массивах при переходе лессовых пород в водонасыщенное состояние в первую очередь легко разрушаются неводостойкие агрегаты, с ними связаны провальные просадки. При длительном увлажнении с течением времени происходит распад водостойких агрегатов, обуславливающий замедленные послепросадочные деформации лессовых толщ [128].

Здесь требуется отметить, что П.А. Ребиндер первым предложил различать в глинистых грунтах коагуляционные (диспергационные) структуры, способные после частичного разрушения восстанавливаться в результате тиксотропного упрочнения, и структуры конденсационные, необратимо разрушающиеся при механических воздействиях. И.М. Горькова [40], развивая далее идеи П.А. Ребиндера, выделяет в породах такие структурные связи как стабилизационные, коагуляционные и смешанные коагуляционно-цементационные. Тип структурных связей в этом случае устанавливается в первом приближении на основе сопоставления дисперсного и микроагрегатного гранулометрических анализов. По мнению некоторых исследователей [32, 73], на основании сопоставления величин пластической прочности лессовых пород при разных видах физико-химического воздействия на них, структурные связи в этих породах носят смешанный коагуляционно-кристаллизационный характер [67, 111].

Среди элементов структурной характеристики лессовых пород одним из важнейших является их пористость, величина которой колеблется от 30 до 65%, чаще – 45 – 55%. Наряду с другими причинами, такая высокая пористость способствует просадочным деформациям лессовых пород при увлажнении. Все пустоты в лессах подразделяются на поры (крупные поры, межчастичные и ме-



жагрегатные поры, микропоры), трубчатые поры, или макропоры (первичные и фитогенные), и трещины (набухания, усадки, выветривания и пр.). Наибольшее значение в формировании просадочности имеет межчастичная пористость, которая колеблется от 13 до 35% [73]. Также межчастичная пористость разделяется на активную и пассивную. Пассивная пористость, с диаметром пор 10 – 20 мкм и менее, при действии давления не уменьшается, а увеличивается, и лишь при длительном приложении нагрузки может возникать уплотнение пор. Движение влаги здесь происходит главным образом пленочным типом. Активные поры диаметром более 10 – 20 мкм деформируются при просадке и механическом уплотнении лессового грунта. При этом происходит уменьшение активной пористости и увеличение пассивной, а движение воды происходит капиллярным путем либо в виде свободного тока [73, 79, 128].

Таким образом, состояние структуры лессовых пород находится в прямой зависимости от степени их влажности, и соответственно предопределяет их физико-механические свойства.

В зависимости от характера, интенсивности замачивания грунтов, размеров источника замачивания, образующихся форм увлажненных зон, и других факторов, при проектировании на просадочных грунтах учитывают следующую динамику изменения их влажности и проявления просадок:

- местное замачивание грунтов основания сверху, что приводит к просадкам грунтов на ограниченной площади в пределах верхней части или, реже, всей просадочной толщи;

- интенсивное замачивание грунтов основания сверху в течение длительного времени, в результате чего происходит промачивание всей просадочной толщи и полное проявление просадок как от собственного веса, так и от нагрузок фундаментов;

- подъем уровня грунтовых вод, вызывающий просадку нижних слоев грунта в основном от его собственного веса;

- медленное повышение влажности лесса, вызванное нарушением природных условий испарения влаги вследствие застройки и асфальтирования тер-

ритории и постепенного накопления влаги при инфильтрации в грунт поверхностных вод.

### **1.3. Состояние теоретических и практических разработок в прогнозировании и управлении геотехнической устойчивостью лессовых массивов**

При проектировании противооползневых мероприятий и строительстве на лессовых склонах согласно нормативов [107, 108] проводят оценку степени устойчивости грунтовых массивов. Для этого вычисляется коэффициент устойчивости, который характеризуется отношением удерживающих и сдвигающих сил в массиве. Для этого существует достаточно большое количество расчетных методов, применение которых, по сути, не регламентировано нормативными документами.

Все известные методы оценки степени устойчивости склонов основаны на применении теории предельного равновесия, рассматривающей предельное напряженное состояние грунтового массива. В расчетных моделях принимается ряд условных допущений [107, 108, 132, 138]:

- используется гипотеза затвердевшего тела (призма возможного смещения рассматривается в виде затвердевшего клина);
- задается определенная форма поверхности скольжения;
- при пользовании основным критерием прочности Кулона-Мора напряжения заменяются силами;
- в некоторых методах силы взаимодействия между отсеками, на которые разбивается оползневой блок, не учитываются;
- принимаются допущения о значениях и проявлениях давления грунтовых вод и сейсмической силы;
- в некоторых методах при рассмотрении равновесия массива принимается одно уравнение статики;
- в отдельных случаях теория предельного равновесия применяется к

грунтовому массиву, находящемуся в запредельном состоянии.

Несмотря на перечисленные допущения и исходя из необходимости охватить как можно больше встречающихся на практике случаев (разнородное геологическое сложение склонов, наличие грунтовых вод, воздействие сейсмических сил и т.д.), эти методы расчета, хотя и не вполне математически и физически строгие, были необходимы для разработки простых инженерных способов оценки устойчивости склонов и откосов.

Как правило, положение наиболее опасной поверхности скольжения принимается уже установленным. Существует множество натуральных и теоретических методов установления поверхности скольжения. Из натуральных необходимо отметить следующие методы: визуального наблюдения за проходимыми при бурении скважин и шурфов породами – по зеркалам и штрихам скольжения, по повышенной влажности грунтов и т.д.; глубинного репера из труб; глубинного шлангового репера, глубинного репера с электрическим фиксатором смещений; динамического и статического зондирования (определение поверхности скольжения по областям с пониженным сопротивлением перемещению зонда); длительного наблюдения за относительным смещением колец, которыми обсажена наблюдательная скважина, и др. Из теоретических можно отметить методы Б.М. Ломизе, И.В. Федорова [132], Г.М. Шахунянца [138], Г.Л. Фисенко и др. [107].

Часто поверхность скольжения предопределена самим геологическим строением склона, например, когда покровные грунты сползают по коренным породам. Однако в таких случаях к анализу следует подходить с осторожностью, ведь если коренными породами являются полускальные грунты (аргиллиты, алевролиты, известняки, и т.д.), то поверхность скольжения может проходить и выше, и ниже кровли таких пород. В окончательном виде для упрощения расчетов поверхность скольжения принимается в виде простейших форм – изломанных линий, дуг окружности и т.д.

Значения прочностных характеристик грунтов ( $c$  и  $\varphi$ ) рекомендуется [5, 24, 25, 34, 40] при практическом проектировании уточнять обратными расчета-

ми, исходя из значения коэффициента устойчивости склона, соответствующего его значению при фактическом состоянии. При этом, в соответствие с результатами исследований многих ученых [34, 56, 58, 83, 137], значения сдвиговых характеристик грунтов на уровне поверхности скольжения могут быть снижены вследствие возможного изменения их во времени за счет ползучести.

Для практических расчетов можно применять метод учета реологических свойств грунтов, разработанный Н.Н. Масловым [83]. Сопротивляемость грунта сдвигу представляется выражением

$$s_{p\omega} = p \operatorname{tg} \varphi_{\omega} + \Sigma_{\omega} + c_c, \quad (1.1)$$

где  $p$  – действующее в породе по данной площадке нормальное напряжение;  $\varphi_{\omega}$  – угол внутреннего трения при влажности  $W$ ;  $\Sigma_{\omega}$  – связность породы водно-коллоидной природы и обратимого характера при влажности  $W$ ;  $c_c$  – жесткое структурное сцепление с характером необратимых связей.

Ползучесть проявляется, когда действительные сдвигающие напряжения  $\tau$  находятся в пределах

$$p \operatorname{tg} \varphi_{\omega} + c_c < \tau < p \operatorname{tg} \varphi_{\omega} + \Sigma_{\omega} + c_c. \quad (1.2)$$

В таком случае прочность грунта обеспечивается на тот или иной период, однако в связи с деформацией ползучести возможно нарушение необратимого сцепления  $c_c$  во времени с общим падением прочности грунта.

По методике Н.Н. Маслова может быть выполнен прогноз скорости перемещения вниз по склону оползневых масс на длительный период и интенсивности деформаций смещения подпорных сооружений.

В случаях, когда по материалам инженерно-геологических изысканий и имеющихся теоретических методов положение наиболее опасной поверхности скольжения установить не удастся, расчетные методы оценки устойчивости

склонов в прямом виде применить не представляется возможным. В таких случаях используются вариационные методы расчета, предложенные А.Д. Гиргидовым, М.Н. Гольдштейном, А.Г. Дорфманом, У.Х. Магдеевым и др. [107].

Учитывая значительное количество методов оценки устойчивости склонов в настоящем анализе следует ограничиться рассмотрением тех, в которых представлена двухфазная среда “горная порода – вода”. Это будет отвечать конкретизации задач по исследованию гидрогеомеханической устойчивости лессовых массивов.

*Метод круглоцилиндрической поверхности* описан во многих источниках [33, 83, 107, 123, 132, 137], однако, не всегда одинаково трактуется у разных авторов. Этот метод весьма распространен в строительной практике и применяется с помощью различных приемов. Поэтому существует большое количество названий рассматриваемого метода и его разновидностей: шведский метод откосов, метод В. Феллениуса, шведский метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения, метод Терцаги, метод Терцаги-Крея, метод Петтерсона, метод вертикальных элементов, метод Иванова-Тейлора, метод Свена Гультена, метод весового давления и т.д.

Метод круглоцилиндрической поверхности скольжения целесообразно применять, когда откос сложен однородными грунтами. Предполагается, что сползание грунта может произойти лишь в результате вращения оползающего массива вокруг центра  $O$  (рис. 1.3). Следовательно, поверхность скольжения  $BB$  в данном случае будет представлена дугой некоторого круга с радиусом  $r$ , очерченного из центра  $O$ . Оползающий массив рассматривается при этом как некоторый блок, всеми своими точками участвующий в одном общем движении. В блоках выделяется водонасыщенная часть, плотность которой больше чем у грунта выше уровня водонасыщения (УГВ).

Степень устойчивости откоса чаще всего определяют наиболее простым методом моментов.

Из других расчетных схем, использующих круглоцилиндрическую по-

верхность скольжения, следует упомянуть метод круга трения (приемы Гульти-на и Петерсона, Казагранде, Крея, Тейлора, Гольдштейна, Федорова и др.), ме-тод многоугольника сил Фрелиха, метод Како, метод Чугаева-Вяземского, ме-тод Бишопа и пр. Все они являются сравнительно эффективными для оценки степени устойчивости склонов, но трудно применимы для определения величи-ны оползневого давления, включая гидростатическое и гидродинамическое [98, 107, 108].

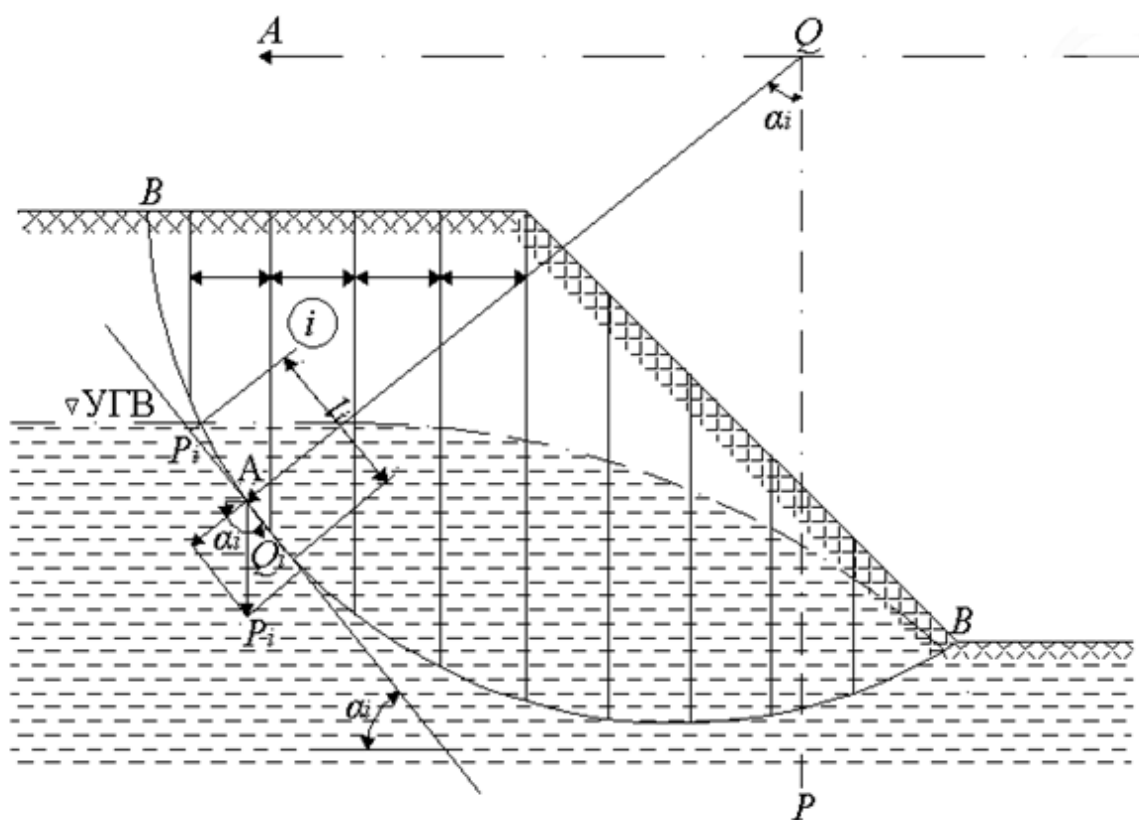


Рисунок 1.3 – Метод круглоцилиндрической поверхности скольжения

*Метод горизонтальных сил* известен [83, 107, 132] как метод Маслова-Берера, шанхайский метод, метод горизонтальных сил Маслова. Применяется в случаях, когда откос сложен разнородными грунтами и оползень происходит по известной произвольной поверхности скольжения. Предполагается, что эта поверхность скольжения (положение и очертание) уже установлена хотя бы на части ее простираения каким-либо из опытных или теоретических способов. На

неизвестной части поверхность скольжения устанавливается методом подбора. В условиях плоской задачи эта криволинейная поверхность скольжения с некоторым приближением может быть заменена в плоскости чертежа той или иной совокупностью прямых линий - линий скольжения. В соответствии с этим весь массив грунта разбивается на отдельные отсеки. Практически поступают наоборот: массив грунта делится на отдельные отсеки из таких соображений, чтобы каждый расчетный отсек состоял, по возможности, из более-менее однородного грунта (для простоты вычислений). Каждая линия скольжения в отдельном отсеке принимается за прямую линию (рис. 1.4, б).

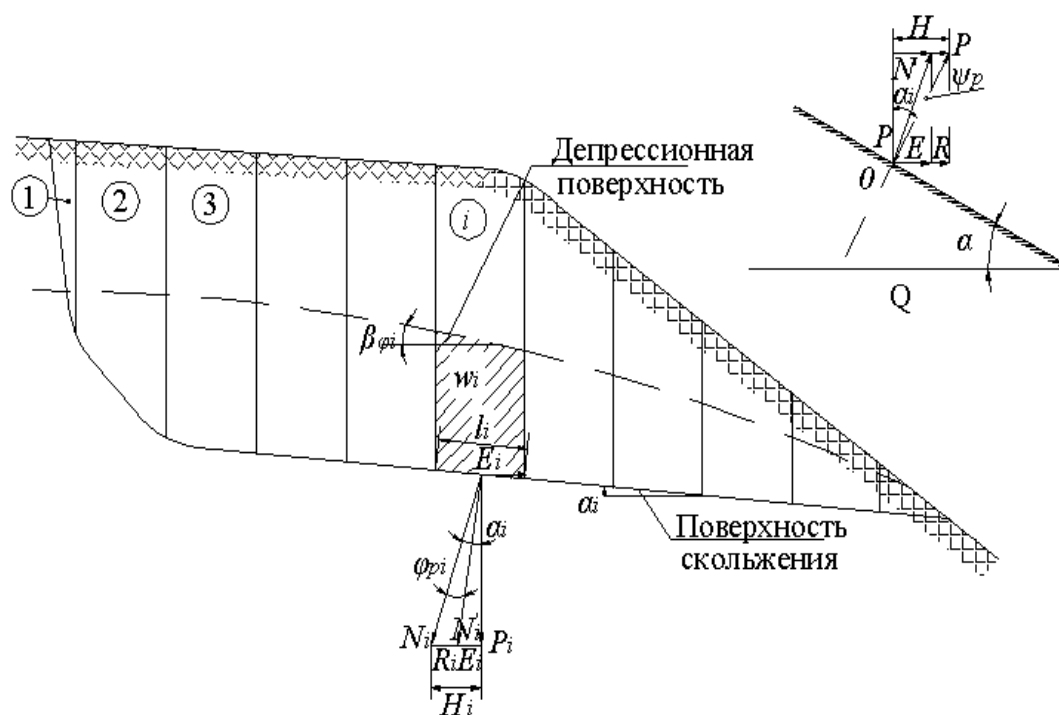


Рисунок 1.4 – Метод горизонтальных сил: а – основной принцип; б – использование для расчета устойчивости склона

На рисунке 1.4, а сила  $N$  – нормальная к поверхности скольжения составляющая реакции веса  $P$  некоторого выделенного расчетного отсека, при условии, что  $\varphi = 0$  и  $c = 0$ . Сила  $N'$  – также реакция  $P$ , но при наличии в грунте на поверхности скольжения трения и сцепления; направление силы  $N'$  определяется углом трения  $\varphi$  или углом сдвига  $\Psi_p$  при наличии в грунте сцепления ( $c \neq 0$ ).

Сила  $H$  как проекция на горизонтальную ось силы  $N$  представляет собой распор, т.е. давление на вертикальную стенку нижерасположенного отсека при отсутствии в грунте трения и сцепления. Сила  $R$  – часть распора  $H$ , воспринимаемая трением и сцеплением;  $E$  – непогашенная часть распора  $H$ . Учет гидродинамического и гидростатического давлений отсутствует.

Г.М. Шахунянц [83, 107, 137, 138] предложил использовать для определения коэффициента устойчивости массива грунта, сползающего по фиксированной поверхности скольжения, формулу, полученную для круглоцилиндрической поверхности

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} N_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum_{i=1}^{i=n} c_i l_i}{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i} \quad (1.3)$$

Чаще же на практике бывает, что поверхность скольжения не является плоской, а может быть представлена из отдельных участков, имеющих различные наклоны к горизонту. В этом случае удобно определять оползневое давление для отдельных отсеков, а затем строить эпюру его изменения (рис. 1.5, а, б).

Предполагается, что оползневые массы движутся по поверхности  $abcde$  (рис. 1.5, б). Для определения коэффициента устойчивости и величины оползневого давления весь оползающий массив разбивается на ряд отсеков таким образом, чтобы в пределах каждого отсека поверхность скольжения была плоской. Определяется вес каждого отсека  $P_i$  и раскладывается на нормальную и касательную составляющие к плоскости скольжения данного отсека. Для определения оползневого давления учитываются условия равновесия отдельных отсеков оползня, в виде суммы проекций внешних сил на направление движения каждого отсека.

Для отсека  $1$  необходимо взять сумму проекций всех сил на плоскость скольжения  $ab$ , включая и неизвестное давление со стороны соседнего отсека  $2$ , и приравнять ее нулю. Таким образом находится величина реакции  $E_1$ , которая



должна быть приложена к отсеку 1 со стороны отсека 2 по направлению  $ab$ , чтобы отсек 1 находился в равновесии. Величина  $E_1$  является оползневым давлением. Гидростатическое и гидродинамическое давления также суммируются с этой величиной.

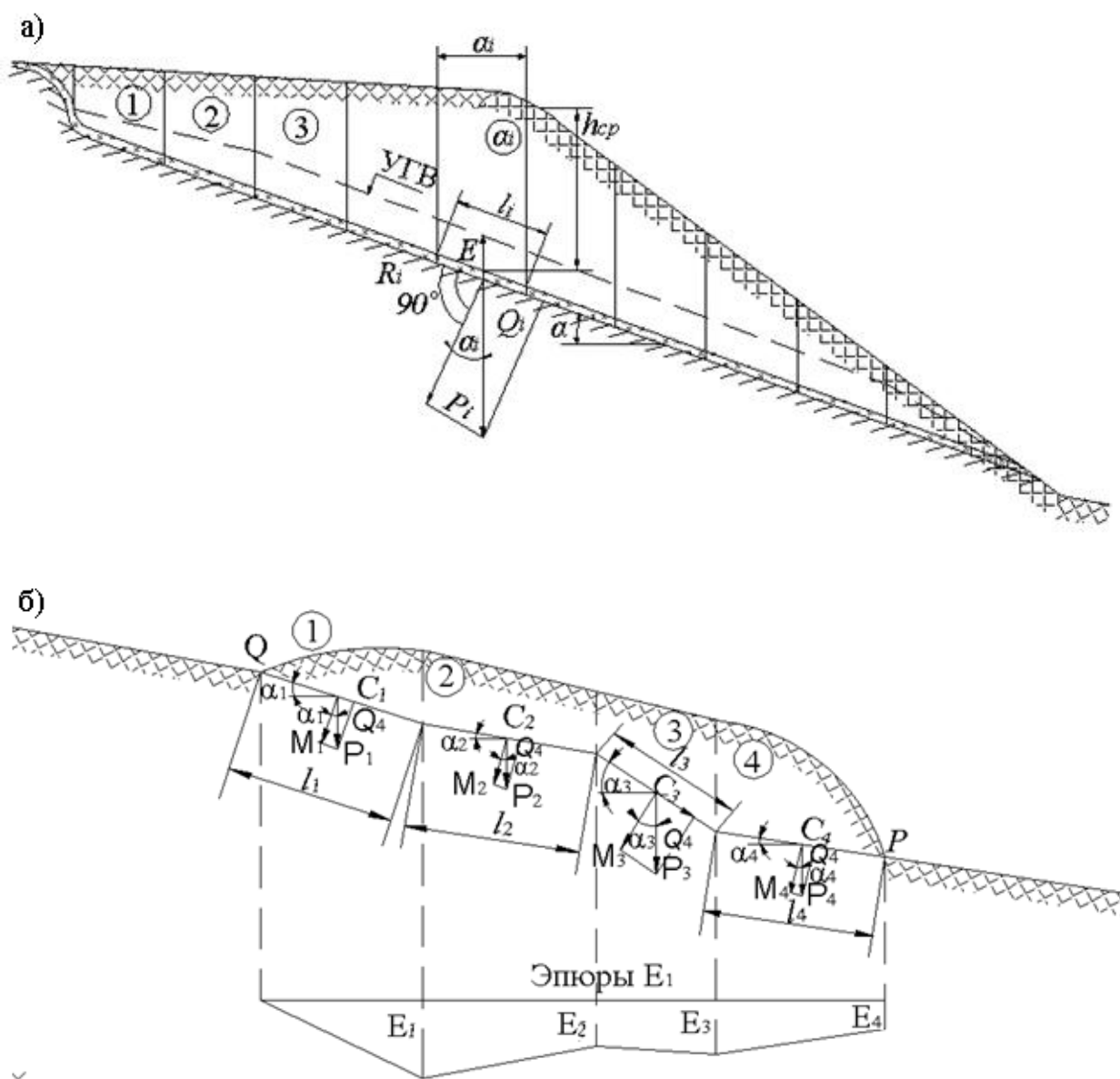


Рисунок 1.5 – Метод касательных сил:  $a$  – случай плоской поверхности скольжения;  $b$  – случай ломаной поверхности скольжения

Более строгим аналогом рассмотренного является *аналитический метод Г.М. Шахуняца*, но его применение ограничено заранее известным положением поверхности скольжения.

Метод конечных элементов для грунтовых массивов наиболее детально разработан А.Б. Фадеевым [131]. Его суть состоит в следующем.

Численная деформационная упруго-пластическая модель среды представляет собой обобщение упругой и жесткопластической сред с внутренним трением. Математический аппарат метода конечных элементов в численной модели сводит задачу интегрирования дифференциальных уравнений аналитической постановки к решению системы линейных уравнений, аппроксимирующих моделируемую область кусочным набором простейших функций.

Относительные деформации  $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\}^T$  в пределах элемента определяются в матричной форме

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}, \quad (1.4)$$

где  $[B]$  – матрица производных функций формы ( $N_{is}$ )

$$[B] = \begin{bmatrix} N_{ix} & N_{jx} & N_{kx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{iy} & N_{jy} & N_{ky} \\ N_{iy} & N_{jy} & N_{ky} & N_{ix} & N_{jx} & N_{kx} \end{bmatrix}. \quad (1.5)$$

В соответствии с линейным законом

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad (1.6)$$

где форма матрицы  $[D]$  для условий плоской деформации имеет вид

$$[D] = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (1.7)$$

где  $E$  – модуль деформации;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Процедура численного решения в методе конечных элементов основана на предпосылке силового взаимодействия между элементами моделируемой области только в узловых точках.

Шесть уравнений, связывающие узловые силы с вектором узловых перемещений, объединены в одно матричное выражение

$$\{F\} = [K]\{\delta\}, \quad (1.8)$$

где  $[K] = \int_s [B]^T [D][B] dS$  – матрица жесткости элемента.

Ввиду постоянства производных функций формы в пределах элемента интегрирование в уравнении (1.8) заменено умножением на площадь  $S$ .

Учет предельного состояния моделируемого массива горных пород и реализация пластического течения в области запредельных деформаций в численной модели базируется на методе начальных напряжений, который состоит в следующем.

Учет разупрочнения грунтов в области запредельных деформаций реализован в численной модели исходя из рассмотрения деформационного критерия прочности, представленного в главных напряжениях

$$\sigma_{сж} = \sigma_1 - (2\lambda + 1)\sigma_3, \quad (1.9)$$

$$\lambda = \text{Sin } \varphi / (1 - \text{Sin } \varphi), \quad (1.10)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на одноосное сжатие;  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – соответственно максимальное и минимальное главные нормальные напряжения;  $\varphi$  – угол внутреннего трения.

В области упругих и запредельных деформаций напряженно-деформированное состояние элементов модели однозначно определяется исходя из анализа главных деформаций комплексом уравнений:

– в области упругих деформаций ( $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_1^y$ )

$$\sigma_1^T = (2\lambda + 1)\sigma_3 + \sigma_{\bar{n}\varepsilon}; \quad (1.11)$$

– при выходе деформированного состояния элемента за предел прочности при соблюдении условия относительно  $\varepsilon_1$ :  $\varepsilon_1^y < \varepsilon_1 < \varepsilon_1^y + (\sigma_{сж} - \sigma_{ост})/E_c$

$$\sigma_1^T = (2\lambda + 1)\sigma_3 + \sigma_{сж} - E_c(\varepsilon_1 - \varepsilon_1^y); \quad (1.12)$$

– при снижении прочностных свойств грунтов до величины остаточной прочности  $\sigma_{ост}$  ( $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_1^y + (\sigma_{сж} - \sigma_{ост})/E_c$ )

$$\sigma_1^T = (2\lambda + 1)\sigma_3 + \sigma_{ост}. \quad (1.13)$$

В приведенных соотношениях:  $\varepsilon_1$  – продольная деформация;  $\varepsilon_1^y$  – предельная упругая деформация;  $E_c$  – модуль спада.

К настоящему времени разработаны модификации представленного алгоритма и программы их реализации. Все они учитывают предельные соотношения главных напряжений (в т.ч. корректировку нейтральных и полных напряжений в водонасыщенной зоне), но не раскрывают механизм оползней-течений, характерных для лессов.

На основе проведенного анализа сделаны следующие выводы. Для установления устойчивости склоновых массивов наиболее применяемыми являются методы Н.Н. Маслова и Г.М. Шахунянца, т.к. эти методы дают наиболее близко отвечающие действительным величины оползневого давления. Также допускается применение методов круглоцилиндрической поверхности скольжения (как

правило, в однородных грунтах). Однако схемы для оценки устойчивости лесовых массивов не отражают в полной мере механизм оползней в лессовых грунтах. Зуской А.В. была разработана модель мониторинга динамики оползневого лессового тела, однако без введения составляющих механизма оползнеобразования [59]. Власов С.Ф., Максимова-Гуляева Н.А. уточнили данные о структурных особенностях лессов, их физико-механических параметрах при различных видах воздействия. Были выделены оползни днепровского типа [18]. Однако особенности механизма их образования и прогнозные критерии начала процесса до конца не выяснены. Поэтому изучение геомеханических и фильтрационных процессов массива в условиях техногенной нагрузки, а также разработка методики расчета параметров устойчивости склонов, которая базируется на специфических особенностях лессовых пород, является актуальной научной и практической задачей.

#### **1.4. Постановка задач исследований**

Имеющийся теоретический и практический опыт в строительстве на лессовых грунтах, сложность и многофакторность условий формирования гидродинамического и геомеханического состояния лессового массива при увлажнении, недостаточность научно обоснованных методических основ прогнозирования процесса, что обуславливает низкую надежность и эффективность принимаемых технических решений, определили цель и задачи выполненных исследований.

Целью представленной диссертационной работы является обоснование параметров устойчивости лессовых массивов с учетом генезиса, энергетических и гидродинамических характеристик грунтового склона.

Для достижения поставленной в диссертации цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Выполнить анализ факторов, которые определяют потерю устойчивости лессовых массивов в естественном и техногенно нагруженном состоянии.

2. Оценить закономерности ослабления структурной устойчивости техногенно нагруженных массивов лессовых пород.

3. Определить техногенные условия и параметры формирования режима подземных вод в качестве основного фактора активизации оползневых процессов.

4. Обосновать и апробировать энергетическую модель оценки потенциальной оползнеопасности лессовых массивов и разработать рекомендации по инженерной защите застроенных территорий.

### **Выводы**

1. Ряд особенностей лессовых грунтов, среди которых преобладают низкая естественная влажность и водопрочность, высокая пористость и просадочность, выделяют их в многообразии других грунтов. Перечисленные свойства напрямую связаны с процессами оползнеобразования. Актуальность прогноза и предотвращения оползней, на данный момент, не потеряла своей значимости в связи с широким распространением лессовых массивов на территории Украины.

2. В лессовых породах происходят физические явления, обусловленные эндогенными, экзогенными, а также техногенными факторами. В комплексе они приводят к изменению состава, структуры и свойств лессов, соответственно меняется и состояние массивов, сложенных ими. Так как лессовые породы находятся в верхней части разреза, то в изменении их строения и рельефа основная роль принадлежит экзогенным и антропогенным геологическим процессам. Среди них следует назвать просадочные, эрозионные, суффозионные, обрушения склонов, а также подтопление и замачивание.

3. При проектировании противооползневых мероприятий и строительстве на неустойчивых склонах предварительно производят оценку степени устойчивости грунтовых массивов. Такая оценка чаще всего проводится путем вычисления коэффициента устойчивости и характеризуется отношением удержи-

вающих массив грунта сил, к сдвигающим. Для этого существует достаточно большое количество расчетных методов, большинство которых учитывают предельное равновесие грунта.

4. Используемые расчетные схемы для оценки устойчивости лессовых массивов (метод круглоцилиндрической поверхности скольжения, Маслова-Берера, касательных сил, Г.М. Шахунянца) не отражают в полной мере механизм оползней в лессовых грунтах. Особенности механизма их образования и прогнозные критерии начала процесса до конца не выяснены. Поэтому изучение геомеханических и фильтрационных процессов в лессовом массиве в условиях техногенной нагрузки, а также разработка методики расчета параметров устойчивости склонов, которая базируется на учете их специфических особенностей и генезисе (истории формирования), является актуальной научной и практической задачей.

Это определило цель и задачи диссертационной работы.

## РАЗДЕЛ 2

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОСЛАБЛЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ ЛЕССОВЫХ ПОРОД И ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИХ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ТЕХНОГЕННОМ НАГРУЖЕНИИ

### **2.1. Выбор и обоснование методики проведения стабилметрических испытаний лессовых пород**

Исследования грунтов в лабораторных условиях проводят с целью определения их физических и механических характеристик. Методика проведения большинства испытаний регламентируется ГОСТ 12248–96 [145]. Наиболее точные и достоверные результаты определения прочностных и деформационных характеристик грунтов получаются при их испытании в условиях трехосного сжатия.

Ниже приведена схема и общий вид стабилметра (рис. 2.1 – 2.2), при испытании в котором цилиндрический образец грунта, заключенный в тонкую водонепроницаемую оболочку, помещается внутри замкнутой камеры и подвергается всестороннему давлению жидкости. Поскольку образец грунта окружает вода, то при приложении вертикальной нагрузки или давления  $P_1$ , со стороны воды на образец грунта будет действовать боковое давление  $P_2$  (рис. 2.3). К образцу прикладывается дополнительная осевая нагрузка, которая постепенно увеличивается вплоть до разрушения образца. В приборе для трехосного сжатия относительно просто изменять режим дренирования грунта, а также сохранять более или менее постоянными физические свойства грунта в процессе опыта [15, 16, 19, 30, 53, 103, 125].





Рисунок 2.1 – Общий вид стабилометра TriSCAN (VJTech, Великобритания)

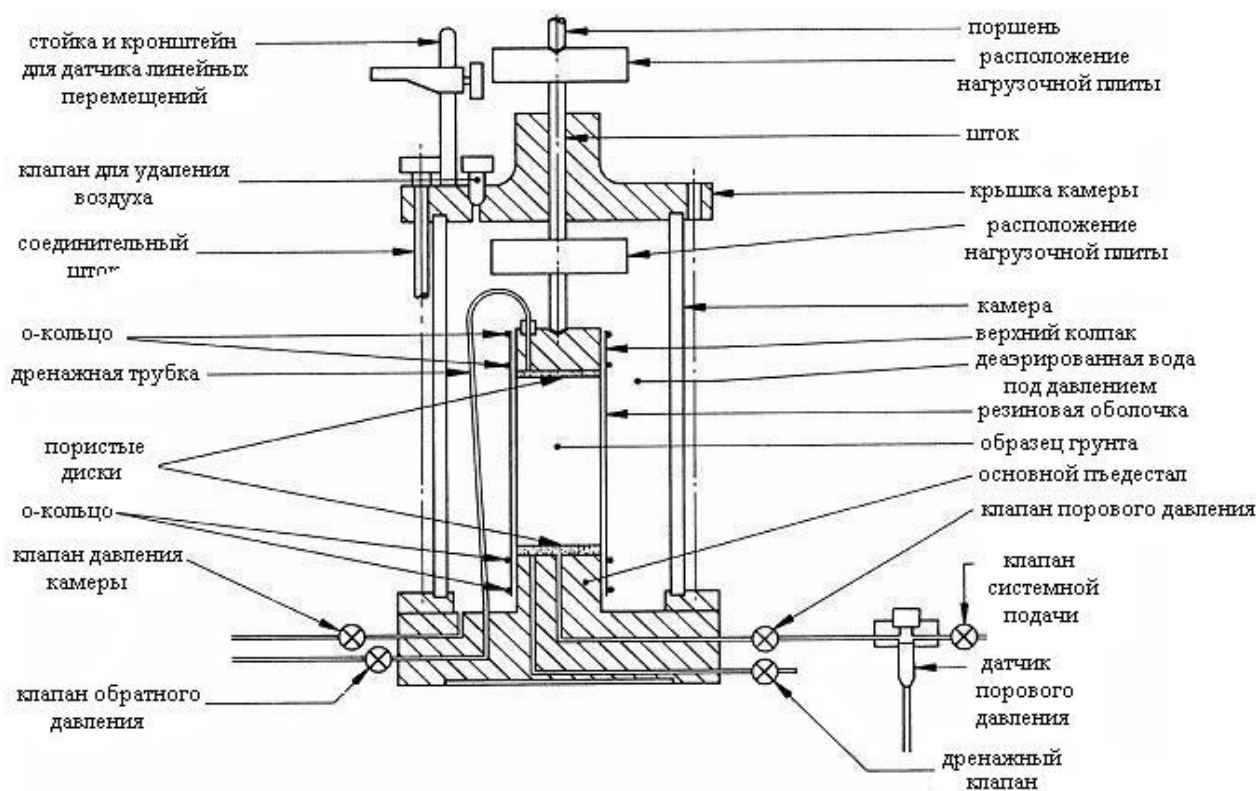


Рисунок 2.2 – Схема стабилометра с основными элементами

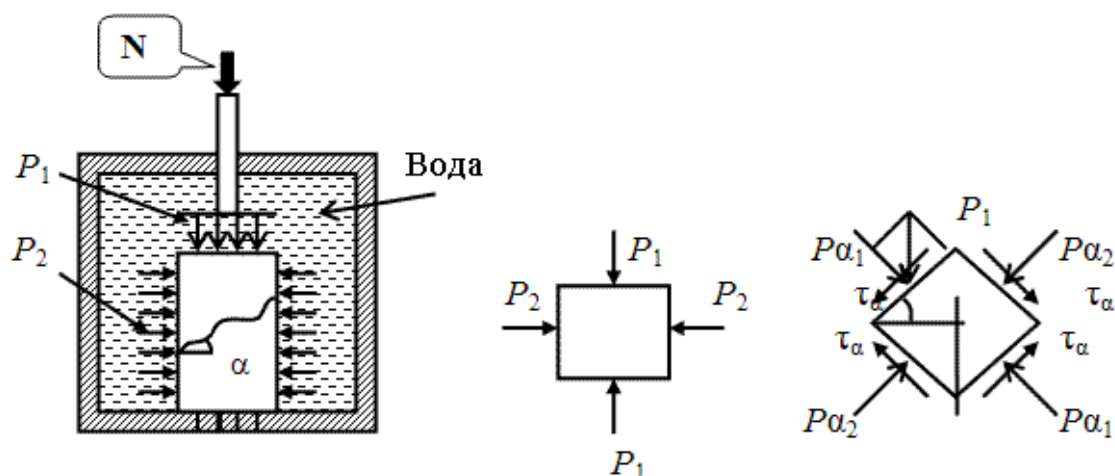


Рисунок 2.3 – Схема испытаний образца грунта в стабилометре, в условиях объёмного напряжённого состояния:  $P_i$  – нормальные напряжения;  $\tau_i$  – сдвигающие напряжения

Если из образца грунта вырезать элементарный параллелепипед с гранями, которые перпендикулярны главным нормальным напряжениям  $P_1$  и  $P_2$  (рис. 2.3), то образец испытывает лишь сжатие со всех сторон без возможности разрушения. Однако параллелепипед грунта ориентированный под углом  $\alpha$  по своим граням будет испытывать, кроме сжимающих усилий  $P_\alpha$ , касательные усилия  $\tau_\alpha$  (или касательные напряжения). Касательные напряжения  $\tau_\alpha$  и провоцируют смещение отдельных частиц грунта относительно друг друга, что приводит к разрушению образца грунта. В момент такого разрушения (или предельного состояния) грунта определяются его прочностные и деформационные характеристики. Проведение испытаний или доведение образца грунта до предельного состояния зависит от соотношения значений главных нормальных напряжений и условий испытаний.

В практике используется достаточно много разновидностей стабилометров разной модификации и размеров в зависимости от решения поставленной задачи. В наших испытаниях мы использовали стабилометр TriSCAN (VJTech, Великобритания) (рис 2.1). По стандарту конструкция камеры трехосного сжатия должна обеспечивать: боковое расширение образца; отжатие воды из об-

разца; герметичность основных деталей; минимально возможное трение штока во втулке камеры. Данные требования в наших опытах выполнялись.

Очевидно, что результаты лабораторных исследований только тогда дадут достоверные значения расчетных характеристик, когда режим испытаний будет максимально увязан с условиями, в которых находится грунт в массиве лессовых пород. Лабораторные испытания должны возможно более полно “моделировать натуру”, учитывая свойства грунта, его генезис, характер залегания и пр. Для этого необходимо изучение и оценка не только напряженного состояния массива и механических свойств грунтов, но и всего комплекса физических и физико-химических свойств грунтов и геологических процессов, характерных для исследуемой площади в целом [15, 16, 125].

Как показала практика, нет какой-либо универсальной методики испытания механических свойств лессовых грунтов. Ее необходимо назначать в каждом конкретном случае в зависимости от поставленных задач.

Наибольшее распространение получили следующие методики испытаний:

– неконсолидированно-недренированное испытание – для определения сопротивления недренированному сдвигу водонасыщенных глинистых, органо-минеральных и органических грунтов природной плотности (грунт разрушается без изменения первоначальной плотности и влажности);

– консолидированно-недренированное испытание – для определения характеристик прочности глинистых, органо-минеральных и органических грунтов в нестабилизированном состоянии (первоначально уплотняется до полного завершения консолидации, а затем разрушается без изменения плотности и влажности в процессе сдвига);

– консолидированно-дренированное испытание – для определения характеристик прочности и деформируемости любых дисперсных грунтов в стабилизированном состоянии (грунт разрушается лишь после полного завершения процесса уплотнения, вызванного изменением его напряженного состояния) [15, 16, 145].

В данных исследованиях консолидировано-дренированная схема испытания грунта адаптировалась под поставленные задачи. Здесь следует отметить, что действующий ГОСТ [145] не учитывает в полной мере поставленных задач, поэтому в качестве корректирующего документа также использовался британский стандарт [146].

Для испытаний использовались образцы лессового суглинка ненарушенного сложения изначально с природной влажностью, которые отбирались в различных частях г. Днепропетровска – ул. Яснополянская, б. Тоннельная, б. Тополиная, ул. Симферопольская.

Образец грунта ненарушенного сложения, изготовленный методом режущего кольца, имел диаметр 38 мм и высоту 76 мм. Торцы образца покрывались влажными бумажными фильтрами и помещались между штампами. Затем на образец надевалась резиновая оболочка и закреплялась на боковых поверхностях штампов резиновыми или металлическими уплотнителями.

Образец уплотнялся всесторонним давлением в камере  $\sigma_3$ , заданным программой испытаний (ниже для каждого испытания его значение будет указываться отдельно). Величины давления выбирались таким образом, чтобы учесть процессы, происходящие от поверхности до глубин 25 – 30 м, т.е. в зоне взаимодействия оснований с грунтом или захватывающие склоновые массивы. Давление создавалось ступенями. Каждую ступень всестороннего давления при консолидации выдерживали не менее 15 мин. Конечную ступень выдерживали до условной стабилизации объемной деформации образца грунта. Критерием условной стабилизации принимали приращение относительной объемной деформации, не превышающее 0,0001 за 12 часов. Отсчеты записывались на каждой ступени всестороннего давления в камере, а на конечной ступени давления – через 10 мин в течение рабочего дня, далее – в начале и в конце рабочего дня до условной стабилизации объемной деформации. После уплотнения образец грунта испытывался для определения характеристик прочности и деформируемости [15, 16, 88, 125, 145].

## **2.2. Результаты исследования влияния фильтрации в лессовом массиве на состояние породы**

Как было отмечено выше, большинство осложнений, возникающих при инженерном освоении грунтовых массивов среднего Приднепровья связано со специфическими свойствами лессовых пород. Основными из них являются – просадочность при достижении критической влажности, фильтрационная анизотропия, анизотропия прочности и деформируемости, переход в текучее состояние при полном водонасыщении. Эти свойства затрудняют прогноз их поведения как при строительстве, так и в природных условиях, особенно при воздействии воды [70]. На данном этапе исследований оценивались изменения, происходящие в лессах при их насыщении и фильтрации грунтового потока, которые провоцируют процесс перехода структуры грунта в качественно новую с изменением характера связей, а соответственно и новыми геомеханическими показателями. Поэтому важно выявить пространственные закономерности изменения фильтрационных и прочностных свойств лессовых пород во времени при заданных натуральных значениях геостатического давления с помощью прибора трехосного сжатия. Также для формирования представления о количественном характере гидродинамического режима и его изменениях при оползневом процессе, уделено внимание установлению зависимостей фильтрационных показателей лессовых пород от деформаций в различных частях оползневого тела [32, 121].

В процессе испытаний задавались направление фильтрационного потока в грунте и положение самого образца по отношению к потоку с учетом максимального приближения реальным условиям оползневых массивов, где установлена существенная анизотропия [9, 24, 32, 46, 64]. Исследовалось воздействие на грунт фильтрационного потока в направлении параллельно и перпендикулярно поверхностям наслоений. Изучались образцы лессовых пород четвертичного возраста, отобранные на склонах балки Тоннельная и Тополиная (г. Днепропетровск). Форма образцов грунтов соответствовала геолого-структурному

строению потенциальных оползневых тел и предполагаемому учету анизотропии свойств при испытаниях.

Использование оборудования трехосного сжатия TriSCAN (VJTech, Великобритания) для лессовых пород позволяет максимально приблизить гидрогеомеханические режимы испытаний образцов пород к реальным условиям состояния грунтов. Как отмечено выше, аппаратура позволяет производить автоматизированный контроль давления в камере нагружения, линейных и объемных деформаций образца, а также расход воды, проходящей через образец в режиме реального времени [15, 16, 125].

Серия испытаний фильтрационных параметров пород проведена при геостатическом давлении в диапазонах 100 – 300 кПа, гидравлический градиент контролировался давлением в образце и составлял 20 кПа, что соответствовало реальным условиям грунтового массива. Время испытания составляло 24 часа. Перед проведением фильтрационного опыта производилось консолидационное доуплотнение образцов при нагрузках, которые отвечали геостатическому давлению, до условной стабилизации деформаций по действующим нормативам [145].

Первая серия испытаний проводилась в условиях фильтрации перпендикулярно напластованию. На рис. 2.4 приведены результаты лабораторных испытаний, которые показывают изменение коэффициента фильтрации лессовых пород ( $K_{\phi}$ ) во времени ( $t$ ).

На рис. 2.4 прослеживается четкая зависимость уменьшения значения ( $K_{\phi}$ ) при увеличении геостатического давления и неизменном значении гидравлического градиента. Значения  $K_{\phi}$  (при 100 кПа) изменяются от 0,008835 до 0,04325 м/сут, при  $\sigma_r = 200$  кПа – от 0,0021 до 0,0253 м/сут, при  $\sigma_r = 300$  кПа – от 0,0004 до 0,0023 м/сут. Наиболее интенсивные изменения происходят в первые 10 часов фильтрации, затем процесс приобретает затухающий характер. Статистическая достоверность определяется значениями  $R^2=0,79\dots0,94$ .

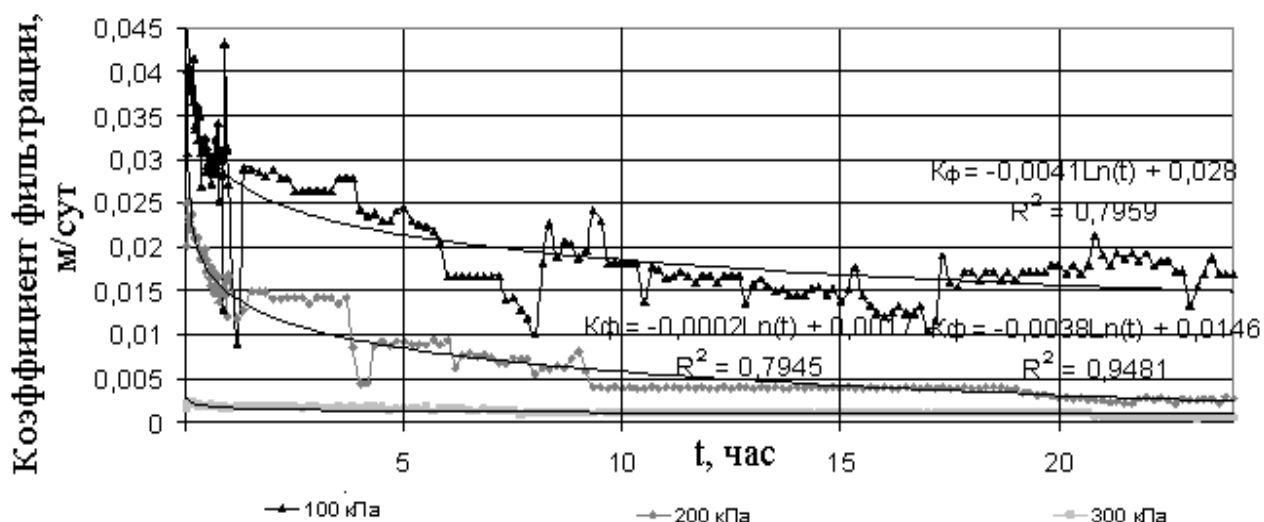


Рисунок 2.4 – Результаты фильтрационных испытаний лессовых пород при фильтрации перпендикулярно напластованию: 100, 200, 300 кПа – диапазон радиального нагружения

Анализ показывает, что перестройка структуры лесса происходит поэтапно. Вначале – когда идет замачивание породы разрушаются основные структурные связи в лессах. В дальнейшем под воздействием фильтрационных процессов порода уплотняется, одновременно продолжается вынос солей и нерастворимых частиц. Подтверждаются известные положения [70, 133], что структурные связи разрушаются из-за того, что силы взаимодействия между частицами лесса интенсивно снижаются с увеличением расстояния между ними. Для перемещения частицы породы на какое-либо расстояние или на поверхность, требуется совершить определенную работу, которая может рассматриваться как энергия активации [119] (данное понятие будет подробно рассмотрено ниже).

На рис. 2.5 показана близкая к логарифмической зависимость между значениями относительной объемной деформации и коэффициента фильтрации во времени. Значения относительной объемной деформации подтверждают указанные процессы разрушения и перестройки структуры лессовой породы. Статистическая достоверность параметров:  $R^2=0,63...0,91$ .

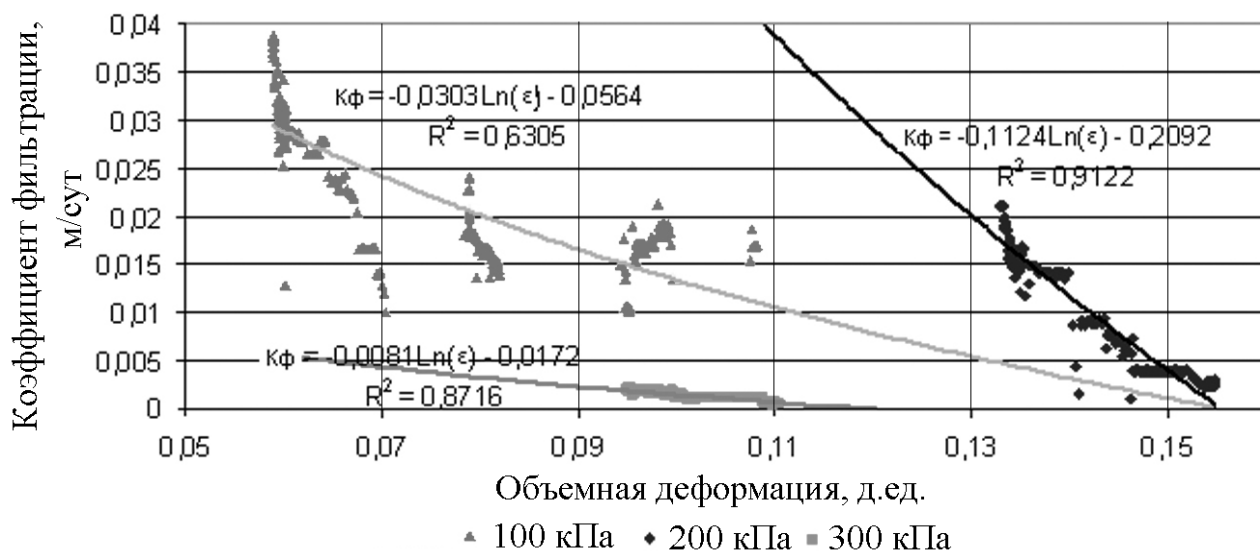


Рисунок 2.5 – Результаты фильтрационных испытаний лессовых пород при фильтрации перпендикулярно напластованию: 100, 200, 300 кПа – радиальные нагрузки

Изменение объемной деформации во времени характеризует рис. 2.6. Для исследования гидрогеомеханики горизонтальной фильтрации, образцы породы отбирались параллельно слоистости.

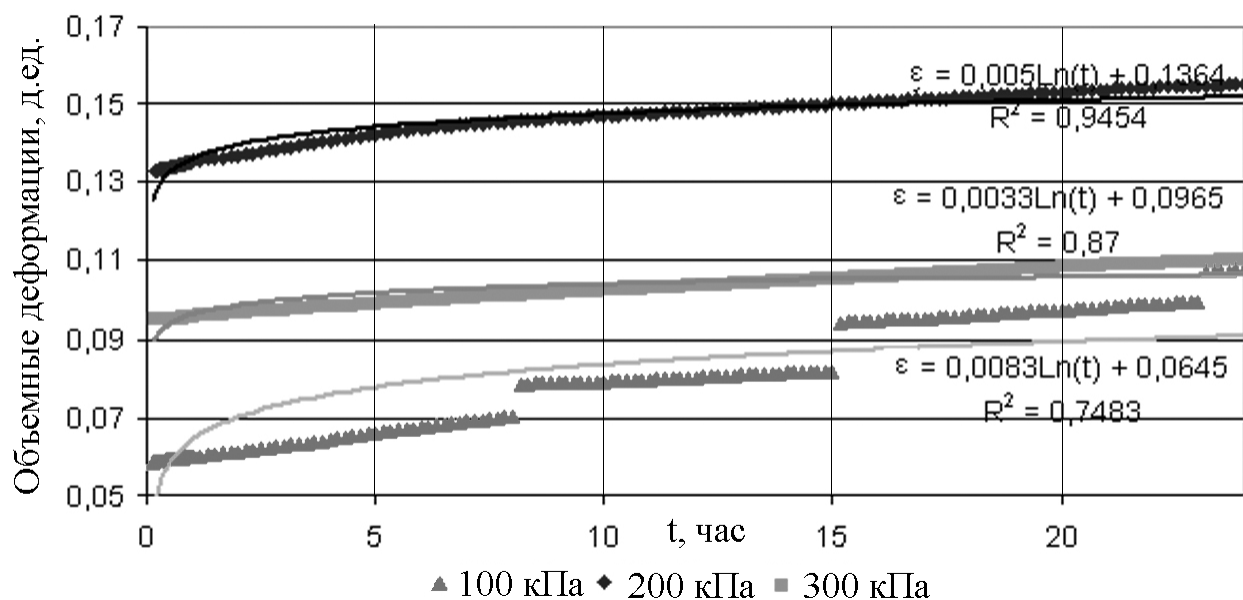


Рисунок 2.6 – Результаты фильтрационных испытаний лессовых пород при фильтрации перпендикулярно напластованию: 100, 200, 300 кПа – радиальные нагрузки



На рис. 2.7 приведены результаты лабораторных испытаний, которые показывают изменение коэффициента фильтрации лессовых пород ( $K_{\phi}$ ) во времени с учетом указанного направления фильтрации.

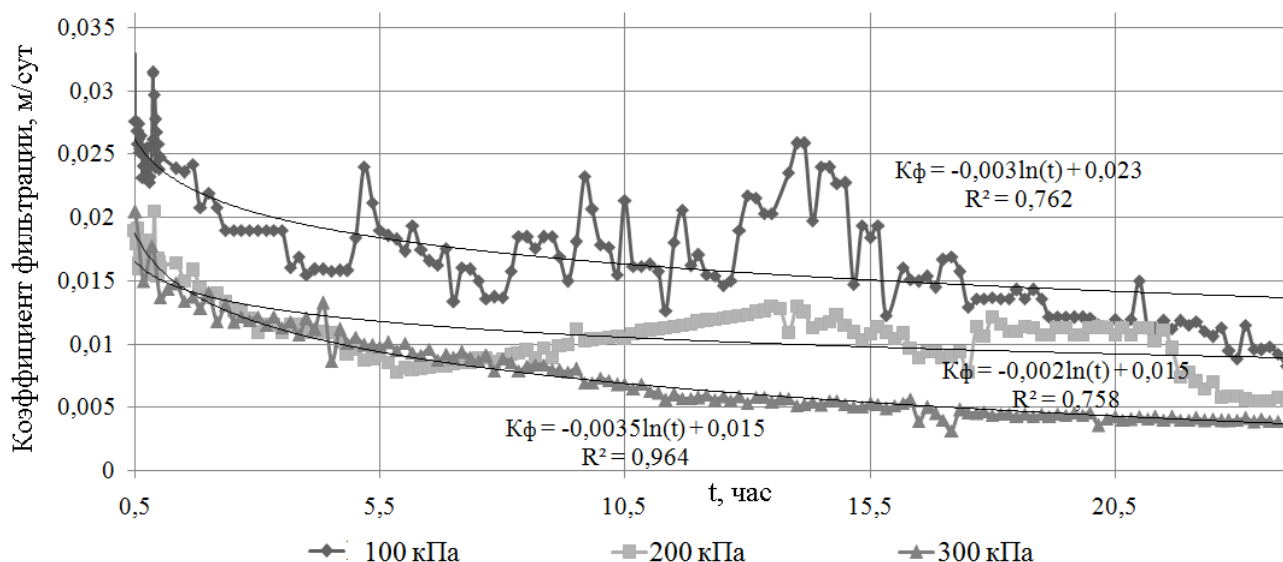


Рисунок 2.7 – Результаты фильтрационных испытаний лессовых пород при фильтрации параллельно напластованию: 100, 200, 300 кПа – радиальные нагрузки

В данном случае значения  $K_{\phi}$  при  $\sigma_r = 100$  кПа изменяются от 0,0082 до 0,0347 м/сут, при  $\sigma_r = 200$  кПа – от 0,0054 до 0,0207 м/сут, при  $\sigma_r = 300$  кПа – от 0,0038 до 0,0209 м/сут. Статистическая достоверность оценивается значениями  $R^2=0,76\dots0,96$ .

Интересные результаты дает сравнение двух серий испытаний, например  $K_{\phi}$  при перпендикулярной фильтрации меньше, чем при параллельной. Однако, при этом, для радиальной нагрузки 100 кПа (схема фильтрации перпендикулярно напластованию) верхнее значение  $K_{\phi}$  достигает 0,043 м/сут. Также не отмечается относительно равномерная фильтрация, как в предыдущем случае. Наблюдаются резкие скачки фильтрационных значений. Значения коэффициента

фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях отличаются до 9 раз.

При проведении испытаний с радиальной нагрузкой  $\sigma_r = 300$  кПа, отмечены следующие особенности. В промежутке времени от 3 до 9 часов во всех образцах породы наблюдалась суффозия, переходящая в формирование эрозионных каналов (рис. 2.8). При меньших давлениях также присутствовала суффозия, однако ее интенсивность была заметно слабее.



Рисунок 2.8 – Эрозионные каналы в образцах лессовых пород

Очевидно, из-за эрозионных промоин должны увеличиваться фильтрационные показатели грунта, однако (рис. 2.6) на обобщенной кривой результатов испытаний при  $\sigma_3=300$  кПа это не наблюдается. Возможным объяснением данного обстоятельства может быть существование двух стадий формирования эрозионной промоины. Вначале за счет суффозии образуется замкнутый канал, который не выполняет функций гидравлического проводника, а его стоковая поверхность инертна. В дальнейшем, при увеличении радиальных нагрузок до 300 кПа, которые превышают нейтральные напряжения внутри полости, происходит всплеск интенсивности суффозии и полость сообщается со стоковой зоной вне образца. Эта стадия соответствует переходу суффозии в глубинную

эрозию. Описанные стадии предшествовали формированию упоминавшегося оползня течения на ж/м “Тополь” в г. Днепропетровске [121].

На рис. 2.9, где показана зависимость объемных деформаций и проницаемости образцов, наиболее тесной является корреляция для испытаний с радиальной нагрузкой 300 кПа. Заметно, что объемная деформация наиболее чувствительна к суффозионным и эрозионным процессам внутри грунтовых образцов.

Из анализа результатов испытаний не отмечается влияния известной анизотропии структуры лессов природного сложения [9, 24, 32, 46, 64]. Можно сделать вывод, что происходит смена природных доминирующих факторов на техногенные (геомеханическое и фильтрационное нагружение), которые определяют поведение лессовых массивов.

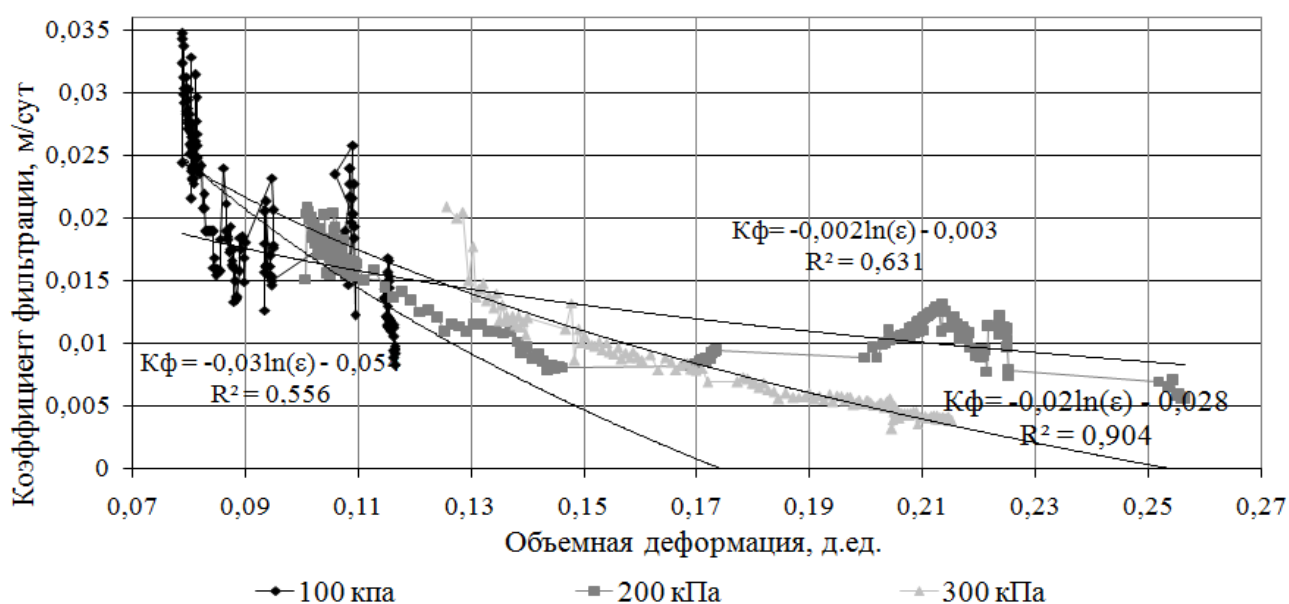


Рисунок 2.9 – Результаты фильтрационных испытаний лессовых пород при фильтрации параллельно напластованию: 100, 200, 300 кПа – диапазон нагружения

Таким образом, в этой серии испытаний были оценены изменения, происходящие в лессах при их насыщении и фильтрации грунтового потока, которые провоцируют процесс перехода структуры лесса в качественно новый с из-

менением характера структурных связей и новыми геомеханическими показателями. Для фильтрации перпендикулярно напластованию прослеживается зависимость уменьшения проницаемости с увеличением геостатического давления при неизменном значении гидравлического градиента. Получена близкая к логарифмической зависимость между относительной объемной деформацией и проницаемостью во времени. Значения относительной объемной деформации подтверждают процессы разрушения и перестройки структуры лессовой породы при значительной статистической достоверности параметров ( $R^2=0,55\dots 0,91$ ). Гидрогеомеханика горизонтальной фильтрации показывает изменение коэффициента фильтрации лессовых пород во времени в диапазоне  $0,0038\dots 0,0209$  м/сут при корреляции  $R^2=0,75\dots 0,96$ .

По результатам экспериментов установлена инверсия фильтрационной анизотропии лессов в сравнении с ее природным положением, что следует отнести к техногенным изменениям грунтовых массивов. При радиальной нагрузке  $\sigma_r = 300$  кПа наблюдается суффозия, переходящая в эрозионный размыв с предваряющей фазой формирования гидравлически инертных полостей.

На основании установленных закономерностей, с целью описания механизма протекания перестройки структуры породы при фильтрации, а также для представления количественного характера процесса выноса грунтового материала и его изменениях в различных условиях проведена вторая серия испытаний лессовых пород, представленная ниже.

### **2.3. Формирование механизма суффозионных и эрозионных деформаций лессовых пород**

В предыдущем разделе были оценены изменения, происходящие в лессах при их насыщении и фильтрации техногенного грунтового потока, которые провоцируют процесс перехода структуры лесса в качественно новый с изменением характера структурных связей и новыми геомеханическими показате-

лями. По результатам экспериментов была установлена инверсия фильтрационной анизотропии лессов в сравнении с ее природным положением. При радиальной нагрузке  $\sigma_r = 300$  кПа наблюдалась суффозия, переходящая в эрозионный размыв с предваряющей фазой формирования гидравлически инертных полостей. Исходя из полученных результатов проведена дополнительная серия испытаний лессовых пород с целью установления механизма протекания перестройки структуры породы при фильтрации, а также для представления количественного характера процесса выноса грунтового материала и его изменениях в различных условиях. Для этого также проведены гранулометрические анализы как породы в целом, так и выносимого материала.

Аналогично предыдущему разделу в процессе испытаний исследовалось воздействие на грунт фильтрационного потока, направленного параллельно и перпендикулярно поверхностям наслоений, однако основное внимание уделялось фильтрации, которая формируется параллельно напластованию. Учитывая отсутствие прямых доказательств того, что при фильтрации перпендикулярно напластованию, не происходит формирования эрозионных размывов, была проведена дополнительная серия испытаний. Образцы лессовых пород четвертичного возраста балок Тоннельная и Тополиная (г. Днепропетровск) исследовались в режиме трехосного сжатия. Для того, чтобы уточнить диапазоны нагрузки, при которой появляются эрозионные промоины, геостатическое давление задавалось 250–300–350 кПа. Гидравлический градиент в образце составлял 20 кПа, что соответствовало реальным условиям грунтового массива. Строгих диапазонов времени не устанавливалось, эксперимент прерывался при установлении постоянного затухающего характера объемных изменений в образце и затухании выноса материала или возникновения эрозионного размыва (выходящего на поверхность).

Первая серия испытаний отвечала условиям фильтрации перпендикулярно напластованию. На рис. 2.10 приведены результаты лабораторных испыта-

ний, которые показывают изменение объемной деформации во времени. Статистическая достоверность оценивается значениями  $R^2=0,98\dots0,99$ .

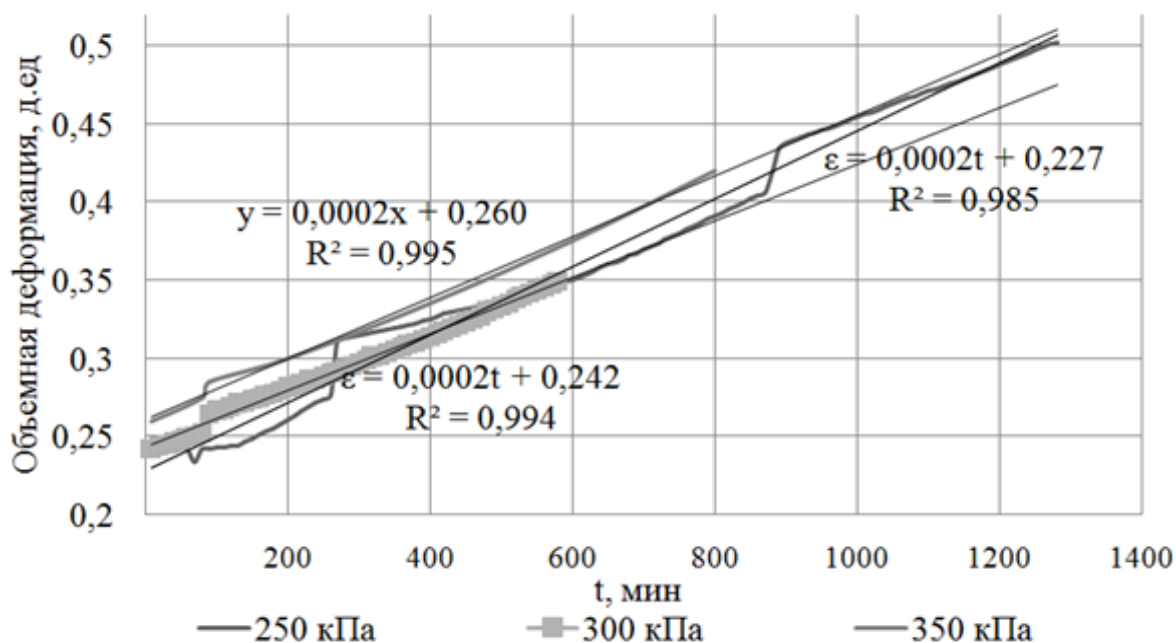


Рисунок 2.10 – Результаты испытаний лессовых пород при фильтрации перпендикулярно напластованию: 250, 300, 350 кПа – радиальные нагрузки

Зафиксирована суффозия с небольшим процентом вынесенных частиц и наибольшей активностью в первые часы после начала фильтрации (первые 4 – 5 часов). Как видно по значениям объемной деформации, определенные импульсы выноса материала происходили в период до 2 часов, затем вынос приобрел минимальный характер, с затуханием в течение 12 часов, что соответствовало постепенной перестройке структуры образца. При последующем визуальном обследовании в испытанных образцах нарушений, каверн, пустот, а также видимых зон разрыхления обнаружено не было.

Существенно отличаются результаты, полученные при схеме фильтрации параллельно напластованию. На рис. 2.11 приведены изменения объемной деформации во времени для нагрузок 250 и 300 кПа соответственно. Статистическая достоверность оценивается значениями  $R^2=0,98\dots0,99$ .

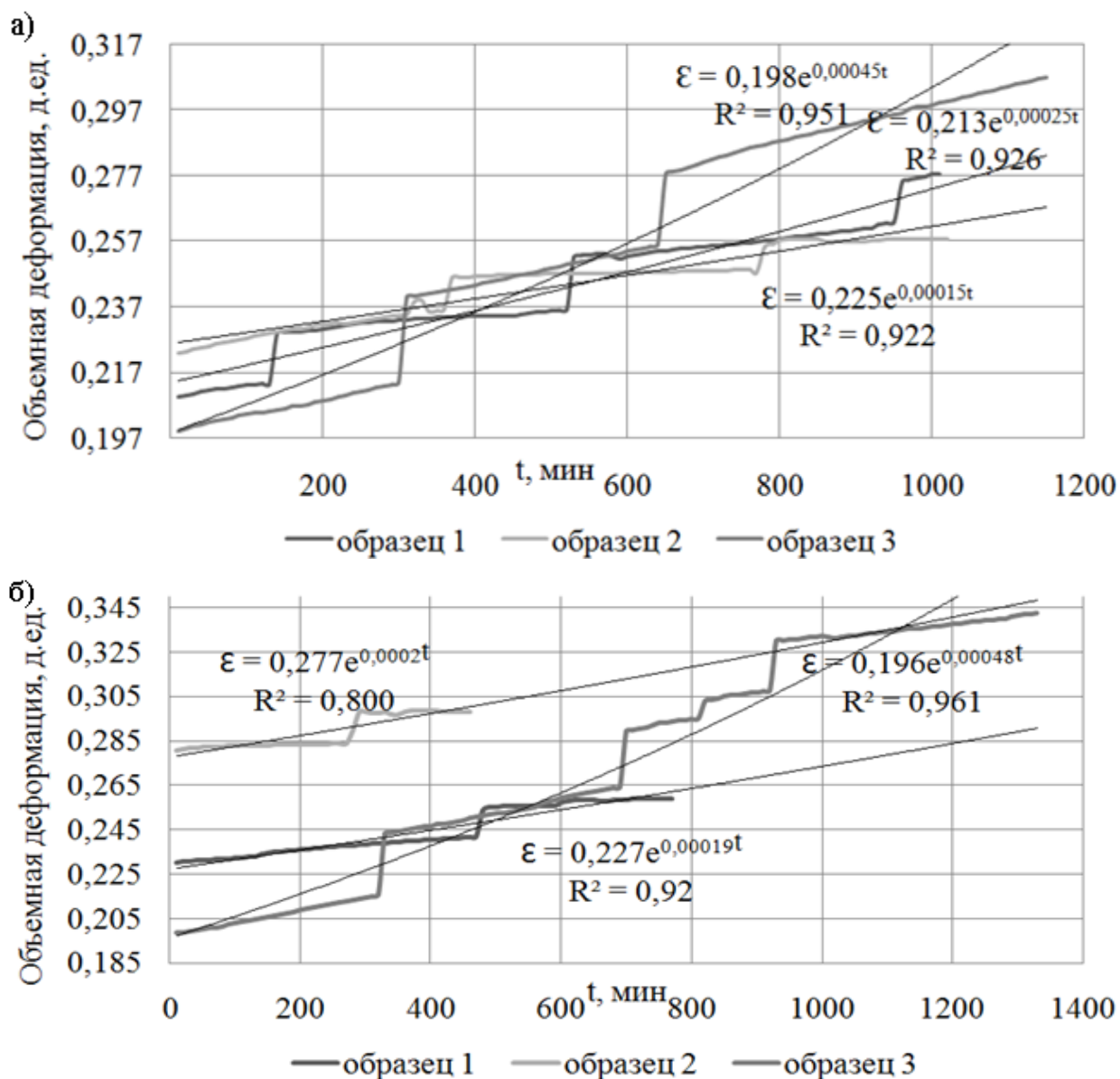


Рисунок 2.11 – Результаты испытаний лессовых пород при фильтрации параллельно напластованию со значением геостатического давления 250 кПа (а), 300 кПа (б): 1, 2, 3 – номера образцов

Для всех образцов, испытанных при  $\sigma_r = 300$  кПа и для одного при  $\sigma_r = 250$  кПа, было визуально зафиксировано образование эрозионной промоины, выходящее на поверхность образца, после 6 – 8 часов от начала фильтрации. Зафиксировано количество выходящих частиц во время опыта и проведен

гранулометрический анализ [41] как исходного, так и вынесенного породного материала (рис. 2.12). Видимые изменения образцов показаны на рис. 2.13.

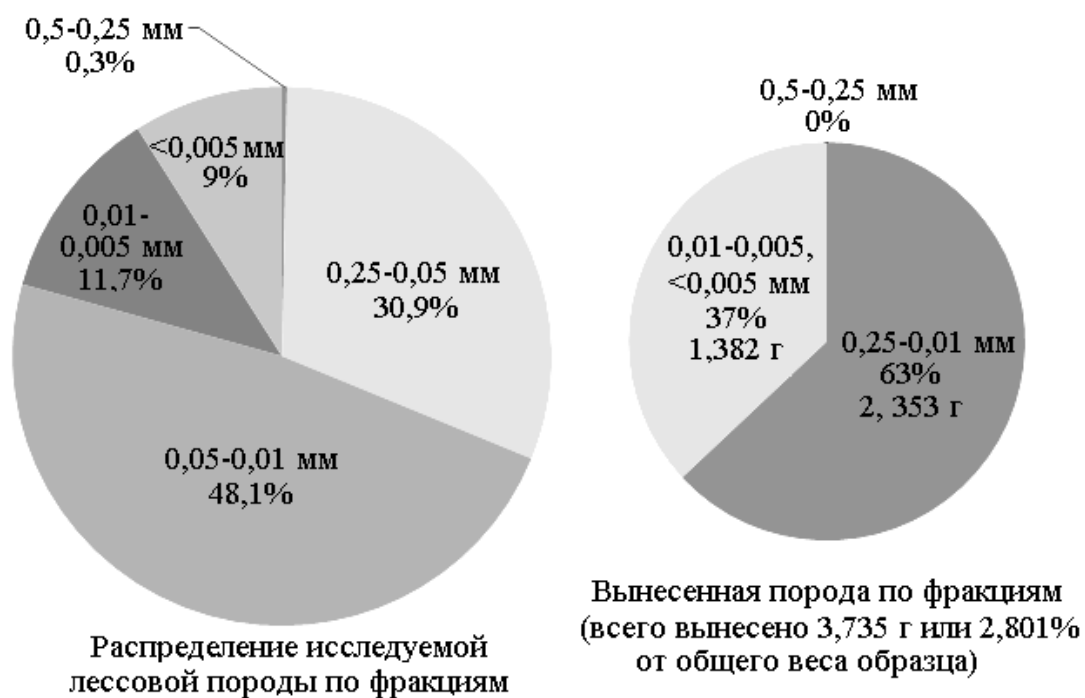


Рисунок 2.12 – Результаты гранулометрического анализа исследуемой лессовой породы в процессе суффозии



Рисунок 2.13 – Эрозионные нарушения в образцах лессовых пород для схемы фильтрации параллельно напластованию



Наиболее интенсивный вынос частиц (72 % от общей массы) происходил в период от 2,5 до 6,0 часов от начала фильтрации. На рис. 2.11 видно, что в большинстве случаев, на этот промежуток времени приходятся заметные изменения значений объемной деформации образца.

Характер распределения вынесенных частиц в лессовых породах можно объяснить следующим образом. В глинистых грунтах возникновение суффозии определяется размерами пор в этих грунтах, а в лессах выявлены отдельные поры, диаметр которых может превышать 0,01 мм (в данном случае имеет значение также то, что фильтрация формируется параллельно напластованию) [128].

Исходя из этого, вследствие недостаточных размеров пор, агрегаты превышающие их, не могут быть вытолкнуты из толщи грунта и для отрыва частиц меньших размеров требуются большие напряжения. Отрыв агрегатов грунта (при значительном молекулярном сцеплении между агрегатами) может произойти при градиентах значительно меньших, чем для явления выноса из грунта отдельных частиц [66].

По гранулометрическому соотношению выходящих частиц, а также их периодичности и изменениям объемных деформаций можно сделать вывод, что в исследованных лессовых породах имеет место отрыв агрегатов грунта, а не отдельных частиц. Это становится возможным за счет образования микротрещин (начиная с раскрытия трещин в 0,2 – 5 м, а возможно и меньшего), фильтрация по которым подчиняется гидравлическим закономерностям напорного движения воды [82] и соответственно начинается процесс размыва. Именно на начальных стадиях фильтрации происходил вынос относительно однородной фракции грунта, а впоследствии фракционный состав выноса соответствует суммарному, то есть, если бы имел место лишь отрыв отдельных частиц, то структура бы перестраивалась, образуя зону разрыхления, а не эрозионную полость.

На основе полученных результатов сформулировано первое научное положение: **анизотропия лессового массива подвергается инверсии вследствие техногенного влияния фильтрационных и деформационных процессов**

в присклоновых областях при девиаторе напряжений 150-200 кПа, что приводит к возникновению и активизации глубинной эрозии в лессовых породах и провоцирует оползни течения, при этом значения коэффициента фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях отличаются до 9 раз.

Рассмотрим вопрос о растворимых соединениях, которые содержатся в лессовых грунтах и выносятся при длительной фильтрации, в частности солей. Представление о выносе солей при длительной фильтрации воды через грунт в лабораторных условиях основывается на сравнении состава водных вытяжек из грунта до увлажнения и после увлажнения и при анализе фильтрата, вытекающего из образца в процессе длительных испытаний. В процессе длительной фильтрации из грунта выносятся как легкорастворимые, так и труднорастворимые соли. В начале процесса увлажнения преобладает вынос легкорастворимых солей. На рис. 2.14 показана динамика выноса солей из лессовых грунтов при длительной фильтрации [60].

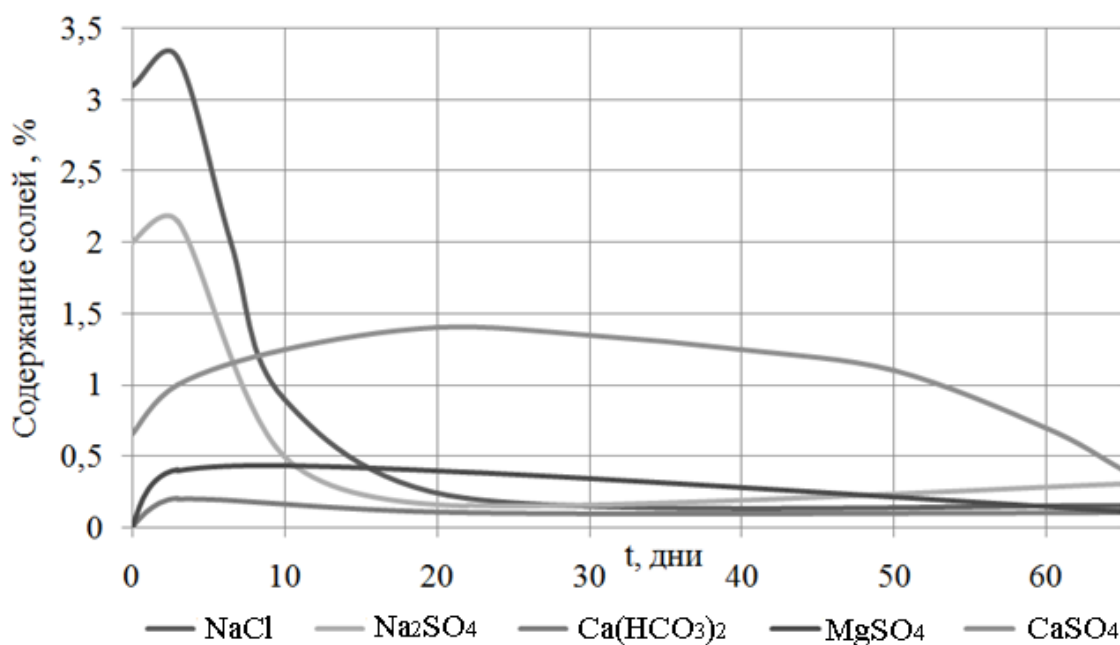


Рисунок 2.14 – Динамика выноса солей из лессовых грунтов при длительной фильтрации [60]

Исходя из вышеприведенных данных, и соотнеся их с проведенными исследованиями, установлено, что время опытов не достаточно длительно по времени, чтобы происходил значительный вынос солей. Возможными деформациями, вследствие этого процесса, на данном этапе можно пренебречь.

Анализ полученных результатов изменения объемных деформаций, количественные диапазоны вынесенных частиц, а также визуальные наблюдения дали возможность выделить прогнозную зону перехода суффозии в первую стадию размыва и образования замкнутого канала с инертной стоковой поверхностью (рис. 2.15).

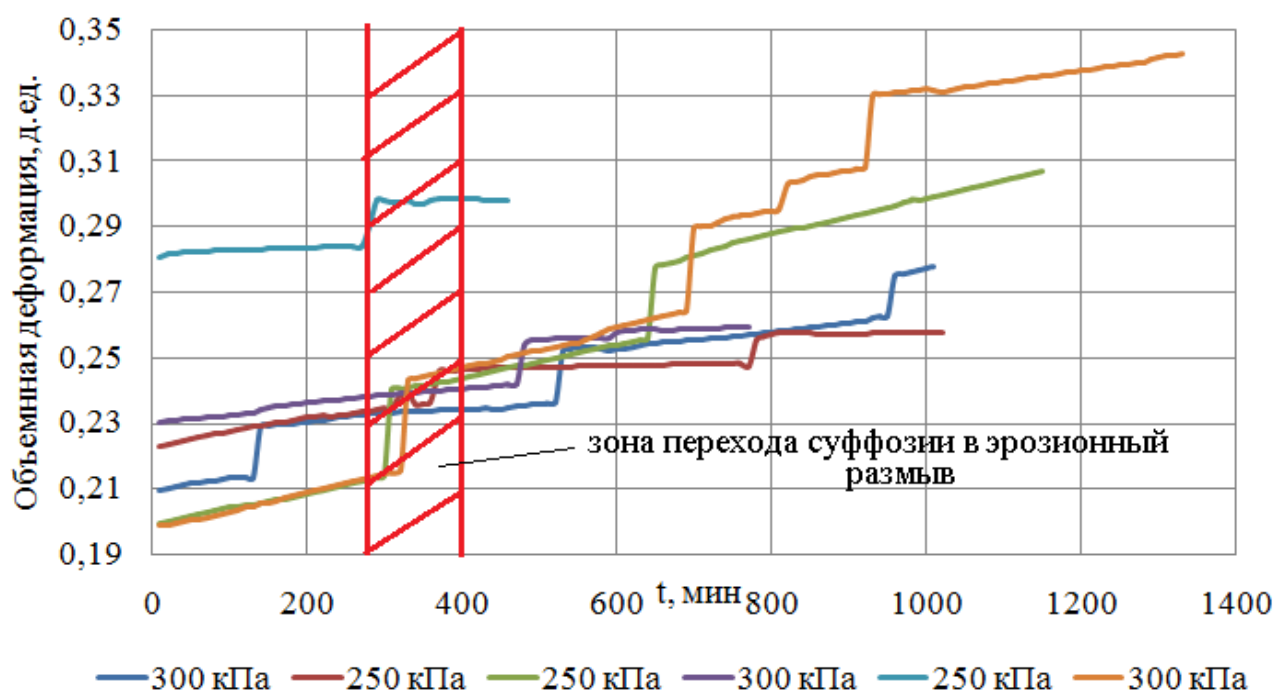


Рисунок 2.15 – Обобщенные результаты испытаний лессовых пород при фильтрации параллельно напластованию: 250, 300 кПа – диапазоны нагружения

По этой серии испытаний можно сделать следующие выводы. При фильтрации перпендикулярно напластованию эрозионные процессы не формируются, а при фильтрации параллельно напластованию, по изменению объемной деформации, а также количеству и периодичности выноса частиц, установ-

лены прогнозные границы перехода суффозионных процессов в эрозионные. Получены средние значения выноса частиц, а также их гранулометрический состав для Приднепровского лессового суглинка (2,801 % от веса образца). Проведенные испытания являются основой для прогнозирования оползней течения, возникающих при техногенном фильтрационном нагружении склонов.

#### **2.4. Обоснование энергетической модели устойчивости лессовых массивов и методика прогнозирования оползней**

Известны два подхода к оценке устойчивости лессовых склонов (см. раздел 1) – механистический и энергетический [54, 70, 136]. Первый базируется на учете сил гравитации и реакции грунтов, причем различия в методиках расчетов устойчивости касаются геометризации предполагаемых поверхностей скольжения. Прогнозируемое расчетом неустойчивое состояние должно совпадать с фазой “мгновенного” оползня. В реальных инженерно-геологических условиях это состояние не отвечает расчетному.

Второй подход основан на учете состояния структурных связей в лессовых грунтах. Количественно это оценивается энергией этих связей весьма приближенно [70] и ее сопоставлением с работой, которая должна осуществиться при оползневом процессе. Последнюю величину можно зафиксировать по фактическому положению оползневого тела, однако вопрос прогнозируемого положения границы, где энергия связей недостаточна для устойчивости склона остается открытым.

Энергия, которая может реализоваться в виде работы в оползневом процессе представляется в виде суммирования энергий:

- недоуплотнения лессов в период их геологического образования;
- положения лессовых слоев в поле гравитации;
- давления на каждый слой вышележащих грунтов.

Уплотнение дисперсных пород является сложным геологическим процессом, зависящим от гравитационного поля Земли и от состава и структуры самих

пород. Физико-химические процессы при литогенезе вносят дополнительные усложнения в процесс уплотнения породы. Уплотнение рассматривается преимущественно как механическая работа, которая учитывает также диффузию, поверхностное натяжение, электрические, магнитные поля и т.д.

В результате влияния гравитационного поля на литогенез дисперсных отложений происходит их уплотнение (уменьшение пористости) в зависимости от их собственной массы и массы накапливающихся вышележащих отложений. Этот процесс сопровождается диссипацией механической потенциальной энергии.

Изменение суммарной потенциальной энергии частиц грунта при их перемещении на величину  $dl$  составляет [70]

$$\Delta U = gS \int_0^{h-H} mdl, \quad (2.1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $m$  – масса единицы объема частиц;  $S$  – площадь горизонтального сечения грунтового массива, для которого рассматривается изменение энергии;  $H$  – мощность слоя;  $l$  – длина пути перемещения частиц, зависящая от глубины, структуры (пористости) породы и прочности структурных связей;  $h$  – высота столба породы, для которого производится подсчет энергии  $\Delta U$ .

Таким образом, согласно (2.1), если не происходит энергетическое возбуждение грунта под влиянием каких-либо сил, то геологическая эволюция грунта состоит в снижении энергетического уровня. Наиболее низкий энергетический уровень соответствует максимально плотной упаковке частиц и состоянию устойчивого равновесия. Другие энергетические уровни и меньшая плотность упаковки частиц отвечают состояниям неустойчивого или относительно устойчивого равновесия грунтового массива.

Эволюция плотности пород отражается законом сохранения энергии. Этот закон в виде первого начала термодинамики имеет вид

$$dQ = dU + PdV + d'A', \quad (2.2)$$

где  $dQ$  – тепловой эффект;  $dU$  – изменение внутренней энергии;  $P$  – давление;  $dV$  – изменение объема;  $d'A'$  – работа, совершаемая электрическими силами, молекулярным натяжением и диффузией. При рассмотрении уплотнения грунтов допустимо принять  $d'A' = 0$ .

Уравнение (2.1) удобно использовать в виде

$$\Delta U = \int_0^H P(h)dl, \quad (2.3)$$

где  $P(h) = gS\gamma h$  – вес столба грунта с основанием  $S$  на глубине  $h$ ;  $\gamma$  – плотность грунта;  $S$  – площадь горизонтального сечения столба.

Для бесконечно малых величин перемещения частицы грунта и высоты столба породы  $dh$  можно принять, что  $dl = \delta dh$ , где  $\delta$  – коэффициент пропорциональности. Видно, что  $\delta$  представляет собой относительную просадочность лесса при природном давлении. Значение  $\delta$  может быть определено при испытании грунта в лаборатории или при замачивании котлованов. Таким образом

$$\Delta U = \int_0^H P(h)\delta dh = gS \int_0^H \gamma \delta h dh. \quad (2.4)$$

В простейшем случае для одного слоя, проинтегрировав (2.4)

$$\Delta U = \frac{gS\gamma\delta H^2}{2}. \quad (2.5)$$

Из уравнения (2.4) можно найти потенциальную энергию недоуплотненности для любого слоя лесса с глубинами его подошвы  $H_1$  и кровли  $H_2$

$$\Delta U = \frac{g\gamma\delta(H_1^2 - H_2^2)}{2}. \quad (2.6)$$

В частном случае, когда кровля слоя совпадает с поверхностью земли ( $H_2 = 0$ ), имеем выражение (2.5).

Кроме энергии недоуплотнения лессовых слоев склона, которая ограничена взаимным положением частиц грунта, потенциальный энергетический ресурс этих частиц обусловлен положением базиса возможного перемещения оползневого тела по вертикали вследствие сил тяжести. Для учета энергии положения следует в формуле (2.1) рассматривать ( $H$ ) как расстояние от слоя до плоскости эрозионного вреза склона в рельефе.

Третья составляющая потенциальной энергии лессового массива обусловлена силами реакции в слое лесса на воздействие сил тяжести  $n$ -го количества вышележащих слоев, т.е.

$$\Delta U_p = gSh \sum_{i=1}^n \gamma_i \frac{H_i}{2}. \quad (2.7)$$

Таким образом, реальный подход к оценке устойчивости лессового склона может состоять в численном сопоставлении конечно-элементных сечений, с рассчитанными составляющими энергий недоуплотнения, положения, давления и энергии связей. Учет последних, как было отмечено, проблематичен. В связи с этим, в качестве реальной предпосылки принято наличие плотной корреляции показателей энергии внутренних связей в лессе и показателей его физико-механических свойств – плотности, модуля общей деформации, удельного сце-

пления, угла внутреннего трения, коэффициента Пуассона и коэффициента консолидации. Это набор доступных стандартных определений, причем учет изменения этих показателей во времени требует повторения однотипной процедуры отбора образцов грунта из массива и их испытаний.

Адекватным методом отображения напряженно-деформированного состояния грунтового склона может быть построение численной конечно-элементной модели с указанными стандартными характеристиками грунта. Например, хорошие результаты дает использование алгоритма с учетом нелинейности и деформационного аналога предельной огибающей главных напряжений [131].

Наиболее важным является, кроме выбора алгоритма численной реализации уравнений равновесия и совместности деформаций, подход к заданию граничных условий и интерпретации результатов решений. Очевидным для конечного элемента модели будет выражение энергии его деформирования

$$\Delta U_i = E \Delta S_i b, \quad (2.8)$$

где  $E$  – модуль деформации грунта;  $\Delta S_i$  – изменение площади сечения конечного элемента;  $b$  – его единичная толщина.

Строго говоря, выражение (2.8) для произвольного конечного элемента должно обращаться в нуль, если модель адекватно отражает устойчивый грунтовой склон с известной геологической историей его образования. Однако, на практике задание условия весоного массива в поле гравитации всегда приводит к появлению деформаций. Обычно, их интерпретация для выявления потенциальных поверхностей скольжения затруднена. Предполагая, что появление поля деформаций является отражением геологической истории формирования склона, наиболее удобно анализировать градиенты деформаций по координатным осям. В этом случае пересечения изолиний градиентов деформаций и изолиний суммарной потенциальной энергии в лессовом массиве должны отображать положение критических поверхностей внутри грунта.



Были проведены экспериментальные исследования механических и деформационных характеристик лессового грунта на стабилометре.

Образцы для испытаний были отобраны в лессовых склонах балки Тоннельной (г. Днепропетровск), где наблюдаются оползневые процессы. Характерные графики изменения прочностных и деформационных показателей грунта представлены на рис. 2.16.



Рисунок 2.16 – Графики нагружения и деформирования образцов (1,2,3): а) зависимость осевых деформаций от девиатора напряжений; б) предельная огибающая кругов напряжений Мора.

По результатам испытаний установлено, что для лессовидных суглинков четвертичного возраста при увеличении влажности от 10 до 15% значения удельного сцепления снижаются на 60%, а значения угла внутреннего трения –

соответственно на 20 – 25%. Режим нагружения существенно влияет на изменение модуля деформации лесса в пределах одного порядка.

В результате моделирования с использованием реальных деформационных и прочностных характеристик грунта получено (рис. 2.17) поле физических градиентов вертикального сечения лессового склона балки Тоннельная, где было и произведено опробование грунтов и их испытания в стабилометре.

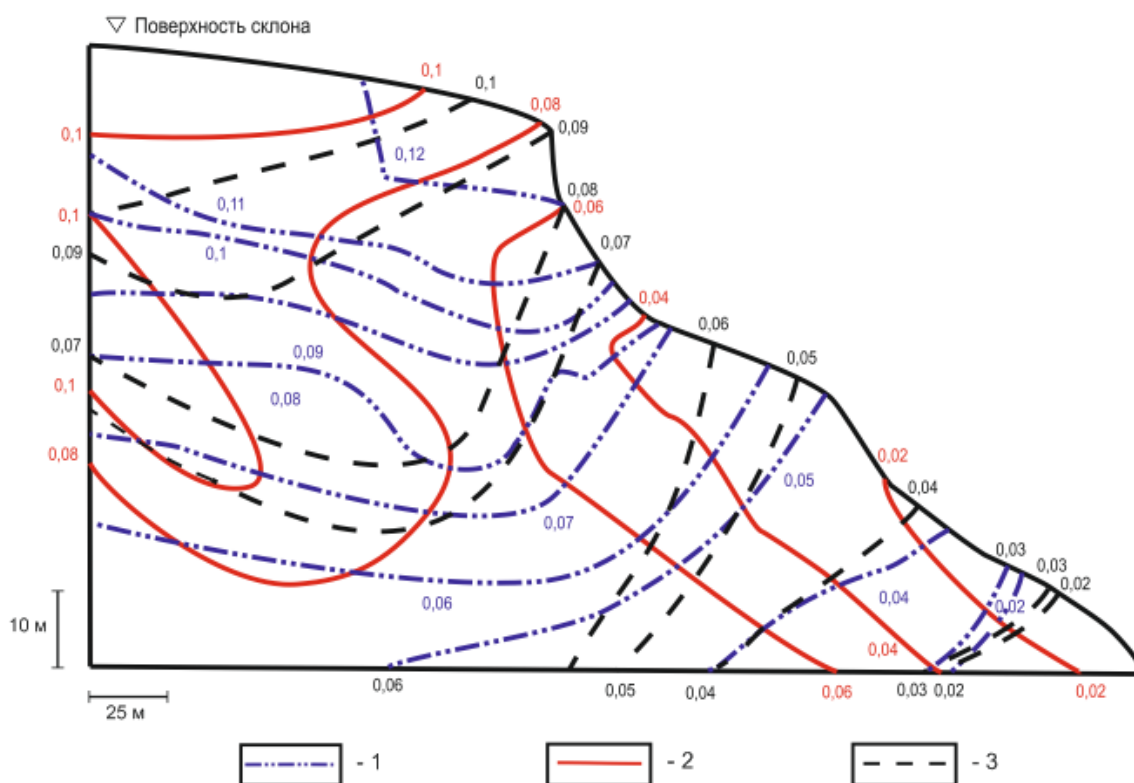


Рисунок 2.17 – Изолинии суммарных градиентов деформаций 1, градиентов энергии лессового склона 2, потенциалов активации склона 3

Отметим, что два первых показателя (рис. 2.17), полученные по результатам моделирования и отличающиеся от известных подходов формой их представления, позволяют предложить новое понятие – потенциал активации склона в полуэмпирическом толковании в виде суммы градиентов полной энергии и градиентов деформаций конечных (или бесконечно малых) элементов лессового массива

$$\Pi_a = \text{grad}\varepsilon + \text{grad}U_p. \quad (2.9)$$

Принятая в физике интерпретация поля потенциалов (в нашем случае потенциалов активации) позволяет по нормальям выделить прогнозные зоны существенно различных процессов течения, ступенчатого оседания и линий скольжения в теле оползня [18] с их количественной характеристикой по величине потенциалов активации.

В результате можно констатировать следующее. Динамика деформационных процессов лессовых склонов формируется в результате сложного сочетания естественно-геологических и геодинамических факторов. Предложенная выше методика моделирования устойчивости лессовых грунтов учитывает это сочетание в виде комплекса энергетической и механистической моделей, которые базируются на исходных параметрах стабилметрических испытаний образцов грунта. Введенное понятие потенциала активации лессового массива и его количественные диапазоны создают предпосылки для прогнозного разделения различных фаз оползневых процессов.

### **Выводы**

1. При фильтрации в вертикальном направлении прослеживается зависимость уменьшения проницаемости с увеличением геостатического давления при неизменном значении гидравлического градиента.

2. Получена близкая к логарифмической зависимость между относительной объемной деформацией и проницаемостью во времени. Значения относительной объемной деформации подтверждают процессы разрушения и перестройки структуры лессовой породы при значительной статистической достоверности параметров ( $R^2=0,63\dots0,91$ ).

3. Гидрогеомеханика горизонтальной фильтрации показывает изменение коэффициента фильтрации лессовых пород во времени в диапазоне  $0,0038\dots0,0209$  м/сут при корреляции  $R^2=0,75\dots0,96$ .

4. По изменению объемной деформации, а также количества и периодичности выноса частиц, установлены прогнозные границы перехода суффозионных процессов в эрозионные. Для всех образцов, испытанных при  $\sigma_r = 300$  кПа

и для одного при  $\sigma_r = 250$  кПа и девиаторе напряжений 150 – 200 кПа, было зафиксировано образование эрозионной промоины, выходящее на поверхность образца, после 6 – 8 часов от начала фильтрации.

5. Получены средние значения выноса частиц, а также их гранулометрический состав для Приднепровского лессового суглинка (2,801 % от веса образца). Наиболее интенсивный вынос частиц (72 % от общей массы) происходил в период от 2,5 до 6,0 часов от начала фильтрации – на этот промежуток времени приходится заметные изменения значений объемной деформации образца. Т.о. выделена прогнозная зона перехода суффозии в первую стадию размыва и образования замкнутого канала с инертной стоковой поверхностью.

6. Анизотропия лессового массива подвергается инверсии вследствие техногенного влияния фильтрационных и деформационных процессов в присклоновых областях при девиаторе напряжений 150 – 200 кПа, что приводит к активизации процессов глубинной эрозии в лессовых породах, при этом значения коэффициента фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях отличаются до 9 раз.

7. Обоснована методика оценки устойчивости лессовых массивов, основанная на учете энергии недоуплотнения, положения, давления и энергии связей, учитывающий сложное сочетание естественно-геологических и геодинамических факторов, которые базируются на исходных параметрах стабиллометрических испытаний образцов грунта.

8. Введено понятие потенциала активации лессового массива и его количественные диапазоны, что создает предпосылки для прогнозного разделения различных фаз оползневых процессов.

9. На основе полученных результатов сформулировано первое научное положение – анизотропия лессового массива подвергается инверсии вследствие техногенного влияния фильтрационных и деформационных процессов в присклоновых областях при девиаторе напряжений 150-200 кПа, что приводит к возникновению и активизации глубинной эрозии в лессовых породах и провоцирует оползни течения, при этом значения коэффициента фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях отличаются до 9 раз.

## РАЗДЕЛ 3

### ТЕХНОГЕННЫЕ УСЛОВИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД – КАК ОСНОВНОЙ ФАКТОР АКТИВИЗАЦИИ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

Предыдущий этап работы показал, что гидрогеомеханические процессы в лессах являются решающими в формировании оползней течения. Характер развития оползневых процессов в лессовых массивах напрямую зависит от подтопления территории. Установление динамики водонасыщения лессовых пород и его влияние на геотехническое состояние застроенной территории исследовались на примере ж/м “Тополь” (г. Днепропетровск). Уже отмечалось, что в 1997 г. здесь произошел катастрофический оползень, вследствие которого пострадал ряд жилых и административных зданий. Оползень был приурочен к массиву лессовых пород и произошел вследствие ряда факторов, одним из которых было подтопление ж/м. Целью данного раздела является оценка и выявление локальных техногенных угроз развития оползневых процессов в качестве основы для разработки предупредительных технических решений.

#### **3.1. Обоснование схемы исследований и геофильтрационные условия объекта**

Методика моделирования фильтрационных процессов в условиях оползневых склонов включает в себя обоснование геофильтрационной и расчетной схем, а также решение прогнозных и обратных задач.

##### ***3.1.1. Характеристика результатов предыдущих исследований и геоморфология объекта***

В основе анализа геоморфологических условий, климатических особенностей, геологического строения, гидрогеологических и инженерно-геологических условий района и участка исследований лежат материалы

“ДнепроГИИНТИЗ”, “ХарьковГИИНТИЗ”, “УкрвостокГИИНТИЗ”, КП “Юж-укргеология”, ДГПИ “Днепрогражданпроект”, ДО ГГРИ и др., полученные в результате инженерно-геологических изысканий для проектирования и строительства объектов гражданского назначения, изучения процессов подтопления территории и деформации отдельных домов, создания сети режимных скважин для мониторинга подземных вод, проведения мероприятий по защите территории от воздействия негативных инженерно-геологических явлений и процессов [7, 8, 57, 90, 91, 92, 95, 99, 100].

Здесь требуется отметить ряд особенностей исследуемой территории важных с позиций обоснования и создания численной геофильтрационной модели геотехнической среды. Жилые массивы “Тополь-2” и “Тополь-3” рассматриваются как составляющие единой гидрогеологической системы, сбалансированной в своих гидродинамических границах.

*Физико-географические условия района исследований.* Территория исследований административно относится к Бабушкинскому району г. Днепропетровска и находится в пределах жилого массива “Тополь-2”, плотно застроенного многоэтажными домами и торгово-развлекательными комплексами.

В геоморфологическом отношении территория ж/м “Тополь-2” приурочена к водоразделу рек Мокрая Сура и Днепр, глубоко и интенсивно прорезанного овражно-балочной сетью. Жилой массив непосредственно расположен на склоне водораздела, а именно на левом склоне балки Встречная (геоморфологическое название б. Попова) на участке между двумя отрогами: с южной стороны – балкой Тополиной, с северной – полузасыпанным отрогом, где проходит Евпаторийский путепровод.

Балка Встречная сформирована длительными экзогенными процессами и простирается с севера на юг длиной примерно 3000 м. Форма балки трапециевидная, асимметричная, правый склон более пологий, а левый – крутой. Глубина вреза балки изменяется от 10 – 15 м в верховье до 30 – 40 м в ее устье.

В пределах территории исследований выделяют следующие геоморфологические элементы: днища балок (абс. отм. 90,0 – 95,0 м); склоны балок крутизной от 15° до 30° (абс. отм. 95,0 – 115,0 м) с развитием всех видов эрозии; склоны балок крутизной от 5° до 15° (абс. отм. 115,0 – 120,0 м) с преимущественным развитием процессов плоскостного смыва и линейной эрозии; склоны водораздельного плато крутизной 2° – 5° (абс. отм. 120,0 – 125,0 м) с процессами плоскостного смыва; склоны водораздельного плато крутизной 0° – 2° (абс. отм. 125,0 – 135,0 м).

Рельеф территории спланирован террасами высотой 1 – 3 м, где имеются подпорные стенки. Общий уклон дневной поверхности в юго-западном и западном направлениях от ул. Паникахи к днищам балок Встречная и Тополиная. Перепад в абсолютных отметках дневной поверхности составляет около 40,0 м (рис. 3.1).

Днище балки Встречной шириной 70 – 100 м спланировано в 20-е годы прошлого века в связи с прокладкой железной дороги. На глубину 3 – 5 м вреzano русло постоянного водотока, образованного за счет стока поверхностных вод и сброса промышленных стоков, в связи с чем наблюдается процесс донной эрозии. Ширина русла изменяется от 1,5 м до 5,0 м, глубина 0,2 – 0,6 м, скорость течения 1,5 – 3,5 м/сек. Борта русла крутые, на отдельных участках пологие, покрыты насыпными грунтами. С обеих сторон русла днище балки засыпано бытовым и строительным мусором, поросло травой, деревьями и кустарниками.

В южной и юго-западной части территории ж/м “Тополь-2”, в районе перекрестка улиц Паникахи и Тополиной, находится засыпанное верховье левого отрога балки Встречной – балка Тополиная, которая имеет прямолинейную форму протяженностью около 1000 м, пологие склоны. Правый склон балки искусственно террасированный, левый – естественный. Со стороны ул. Паникахи в верховье балки построены гаражи. Глубина вреза балки 10 – 20 м, в днище проложен сливной коллектор. Правый склон балки Тополиной и левый склон балки Встречной (вдоль ул. Тополиной с обеих сторон) нагружены высотными

жилыми домами и зданиями детских учреждений. В нижней части балки Тополиной есть озеро, заполненное сточными водами.

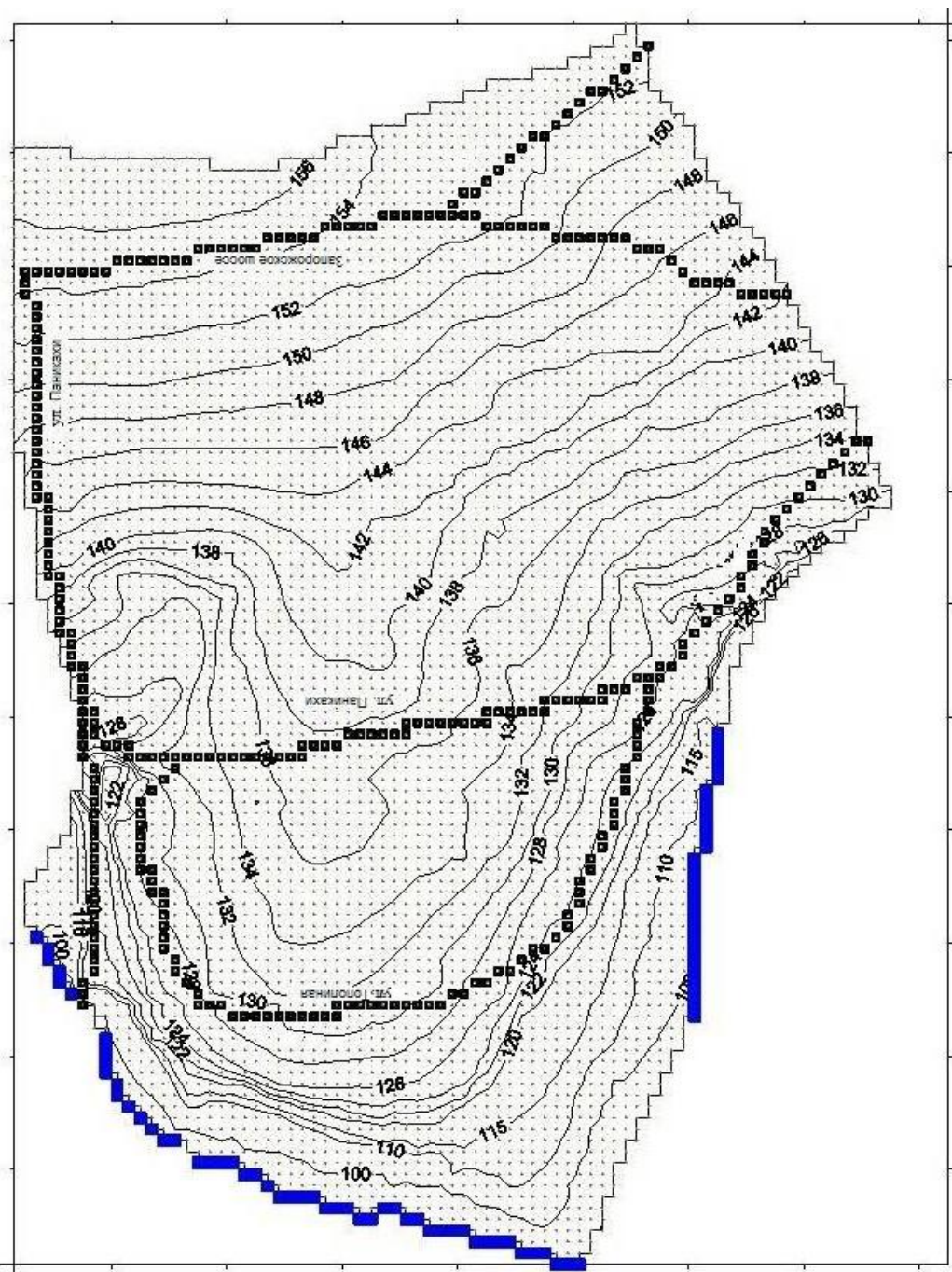


Рисунок 3.1 – Гипсометрия дневной поверхности исследуемой территории

За период наблюдений более 110 лет Днепропетровским гидрометеоцентром зафиксировано, что годовые суммы атмосферных осадков изменяются от



251 до 802 мм. Среднее количество атмосферных осадков составляет 558 мм/год. За последние 50 лет зафиксированы 39 случаев ливневых дождей, которые происходят, в основном, в июне-июле месяце. Среднегодовое количество атмосферных осадков практически не отличается от нормы (474 – 537 мм) за исключением 1988 и 1997 гг., когда зафиксировано 589 и 801 мм осадков. Испаряемость составляет 700 – 800 мм, что почти в два раза превышает годовую сумму атмосферных осадков. Среднегодовое значение относительной влажности воздуха около 70 – 80%. Минимальное значение относительной влажности в период май-август (58 – 59%), максимальное – ноябрь-март (83 – 89%).

### ***3.1.2. Геолого-гидрогеологическое строение и формирование техногенного режима подземных вод***

В геологическом отношении участок исследований представлен отложениями четвертичной, неогеновой и палеогеновой систем. Характерной особенностью толщи средне- и верхнечетвертичных отложений является чередование слоев лесса с лессовидными суглинками и супесями, а также размыв отдельных слоев в тальвеге и на бортах балок Встречной и Тополиной (рис. 3.2).

В гидрогеологическом отношении в пределах исследуемой территории распространены два водоносных горизонта: первый от дневной поверхности – четвертичный, второй – в песчаных отложениях неогена.

*Четвертичный водоносный горизонт* вследствие интенсивного техногенного воздействия имеет нарушенный режим фильтрации. Горизонт безнапорный, уровень подземных вод по состоянию на май-июнь 2012 г. зафиксирован на глубинах от 2,5 м до 15,6 м (абс. отм. 97,75 – 129,50 м).

В центральной и северной частях территории (от ул. Паникахи) поток подземных вод направлен в сторону балки Встречной, а глубины залегания уровня изменяются от 8,4 м до 15,6 м (абс. отм. 129,5 – 108,7 м).

В южной части движение подземных вод наблюдается в сторону балки Тополиной, а в районе жилых домов (ул. Тополиная, 22) отмечено куполообразное увлажнение грунтов на глубине 1,2 – 1,8 м (в подвалах отдельных бло-

ков домов зафиксирована вода). В нижней части склона балки Встречной глубина залегания уровня подземных вод составляет 2,5 – 4,2 м.

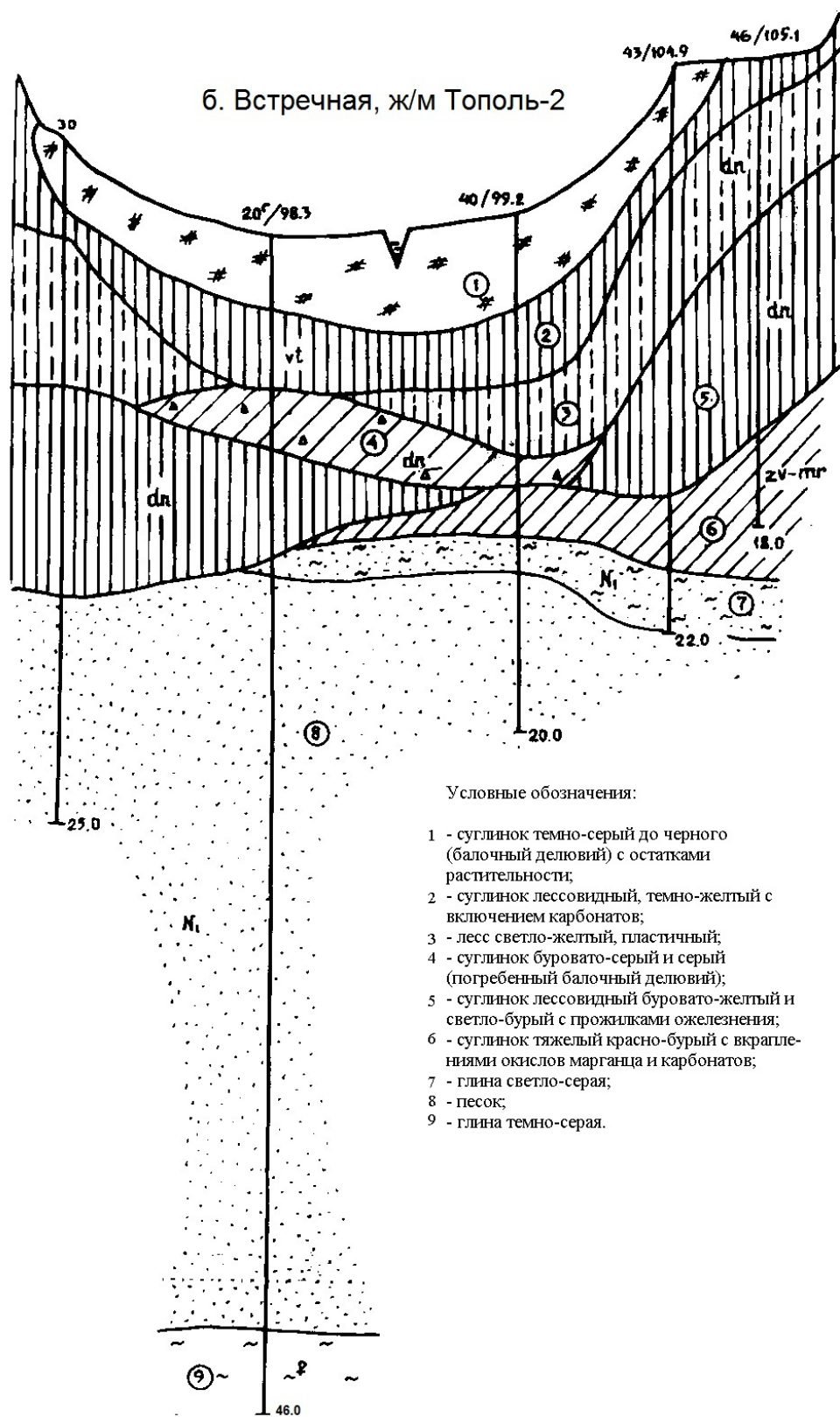


Рисунок 3.2 – Геологическое строение участка исследований с инженерно-геологическими элементами

Вследствие засыпки балки Тополиной и застройки ее правого склона высотными зданиями и гаражами разгрузка водного потока в сторону естественной дрены является затрудненной. Зафиксирован подпор подземных вод со стороны балки. Уклон водной поверхности здесь составляет 0,024.

Максимальное положение уровня наблюдается в апреле-мае месяце, минимальное – в октябре-ноябре, амплитуда сезонных колебаний составляет 0,6 – 1,0 м.

Относительным водоупором являются плотные красно-бурые суглинки и глины (коэффициент фильтрации, соответственно, равен  $5 \times 10^{-3}$  и  $3,9 \times 10^{-5}$  м/сут). Коэффициент фильтрации грунтов зоны аэрации и водонасыщенных суглинков – 0,38 м/сут, супесей – 0,6 м/сут, суглинков – 0,15 м/сут.

Питание водоносный горизонт получает за счет инфильтрации атмосферных осадков и утечек из подземных водонесущих коммуникаций. Разгрузка горизонта происходит в балки Встречная и Тополиная.

*Неогеновый водоносный горизонт* представлен кварцевыми песками и песчаниками от пылеватых до средних. Горизонт напорно-безнапорный. Коэффициенты фильтрации грунтов изменяются от 0,053 до 3,2 м/сут. Установившийся уровень подземных вод зафиксирован на абсолютной отметке около 83 м.

Питание водоносный горизонт получает за счет перетока воды из четвертичного водоносного горизонта, а также инфильтрации атмосферных осадков в нижней части склонов балок Встречная и Тополиная, где отсутствует верхний водоупор. Поток подземных вод неогенового горизонта направлен в сторону реки Днепр, где и разгружается.

*Формирование техногенного режима подземных вод.* В пределах жилого массива развиты все типы водонесущих коммуникаций: водопровод, канализация, теплосеть, ливневая канализация.

Питание грунтовых вод в естественных условиях происходит, в основном, за счет атмосферных осадков, выпадающих в холодные периоды года. Влияние атмосферных осадков, выпадающих в теплое время года, незначитель-

но в связи с преобладанием величины испарения в водном балансе. Многолетние колебания уровня грунтовых вод в естественных условиях повторяют колебания атмосферных осадков с задержкой на один год [99]. Известно, что сезонные колебания уровня грунтовых вод в естественных условиях уменьшаются с глубиной. На глубинах 15 – 20 м они слабо выражены и многолетние колебания не превышают 1 – 2 м. На начало строительства ж/м “Тополь-2, 3” в 70-х годах водоносный горизонт на водоразделе отсутствовал, а на других участках формировался на глубине 19 – 25 м и почти на поверхности земли в балках, где грунтовые воды разгружались.

Отметим ряд особенностей формирования урвенной поверхности грунтовых вод в нарушенных условиях. Подъем уровня подземных вод по данным изысканий разных лет происходил неравномерно (табл. 3.1).

В связи с этим направление фильтрации несколько изменялось во времени при сохранении общего движения в сторону балок. Наибольший подъем уровня подземных вод характерен для периода 1980 – 1990 гг., когда основное строительство объектов было уже завершено. Скорость подъема уровня составила 0,95 – 2,25 м/год в центральной части ж/м “Тополь-2,3”. Между ул. Паникахи и ул. Тополиной в этот период сформировался купол подземных вод. Увеличение скорости подъема уровня подземных вод во времени свидетельствует о росте величины инфильтрационного питания. Количество осадков в этот период составляет 359 – 627 мм/год, преимущественно 462 – 581 мм/год. На июнь 1989 – 1991 гг. уровень грунтовых вод по сравнению с естественными условиями повысился на 13 – 18 м [99]. С 1989 – 1991 гг. до 1997 г. по данным режимных наблюдений Новомосковской ГРЭ динамика подъема уровня сохраняется. По состоянию на период 1997 – 1998 гг. уровень грунтовых вод залегает на глубине 11 м вдоль Запорожского шоссе; 3,9 – 6,8 м – на территории ж/м “Тополь-3”; 3,1 – 8,9 м – на территории ж/м “Тополь-2”; 3,5 – 11 м – на склоне б. Встречной.

Таблица 3.1 – Динамика формирования уровня грунтовых вод во времени

№ скв.	Абс. отм. уровня, м/год	№ скв.	Абс. отм. уровня, м/год	$\frac{\Delta H}{\Delta t}$	Скорость изменения положения уровня, м/год
1	2	3	4	5	6
7	<u>122,2</u> <b>1974</b>	C-5	<u>140,1</u> <b>1997</b>	<u>17,9</u> 24	0,74
236	<u>140,7</u> <b>1991</b>	30	<u>138,32</u> <b>1997</b>	<u>-2,38</u> 7	-0,34
C-57	<u>119,2</u> <b>1975</b>	242	<u>137,96</u> <b>1991</b>	<u>18,76</u> 17	1,1
267	<u>138,57</u> <b>1991</b>	31	<u>137,85</u> <b>1997</b>	<u>-0,72</u> 7	-0,1
C-15	<u>104,5</u> <b>1977</b>	110	<u>115,7</u> <b>1987</b>	<u>11,2</u> 11	1,01
22	<u>117,9</u> <b>1984</b>	52 <sup>a</sup>	<u>121,3</u> <b>1989</b>	<u>3,4</u> 6,0	0,56
52 <sup>a</sup>	<u>121,3</u> <b>1989</b>	3	<u>119,9</u> <b>1997</b>	<u>-1,4</u> 9	-0,16
C-30	<u>109,65</u> <b>1977</b>	9	<u>110,1</u> <b>1980</b>	<u>0,45</u> 4	0,11
233	<u>109,65</u> <b>1977</b>	9	<u>110,1</u> <b>1980</b>	<u>1,52</u> 4	0,38
32	<u>100,8</u> <b>1973</b>	19	<u>117,3</u> <b>1977</b>	<u>16,5</u> 25	0,66
248	<u>112,4</u> <b>1989</b>	4	<u>116,4</u> <b>1997</b>	<u>4,0</u> 9	0,44
266	<u>128,38</u> <b>1991</b>	C-10	<u>129,0</u> <b>1997</b>	<u>0,62</u> 7	0,08
17	<u>131,5</u> <b>1987</b>	225	<u>128,9</u> <b>1989</b>	<u>-2,6</u> 3	-0,87
C-100	<u>120,05</u> <b>1977</b>	C-100	<u>127,9</u> <b>1989</b>	<u>7,85</u> 11	0,71
110	<u>124,2</u> <b>1983</b>	110	<u>133,7</u> <b>1997</b>	<u>9,5</u> 15	0,63
48	<u>126,0</u> <b>1989</b>	48	<u>128,73</u> <b>1991</b>	<u>2,73</u> 3	0,91
48	<u>128,73</u> <b>1991</b>		<u>129,53</u> <b>1997</b>	<u>0,83</u> 7	0,12
139	<u>116,23</u> <b>1985</b>	139	<u>124,3</u> <b>1991</b>	<u>8,07</u> 7	1,15
139	<u>124,3</u> <b>1991</b>	139	<u>123,64</u> <b>1997</b>	<u>-0,66</u> 7	0,26
137	<u>124,4</u> <b>1985</b>	137	<u>132,0</u> <b>1992</b>	<u>7,6</u> 8	0,95
140	<u>125,16</u> <b>1986</b>	140	<u>132,6</u> <b>1991</b>	<u>7,44</u> 6	1,24
140	<u>132,6</u> <b>1991</b>	140	<u>132,1</u> <b>1996</b>	<u>-0,5</u> 6	-0,08

Повышению уровня подземных вод способствовало строительство высотных зданий со значительным водопотреблением и утечками из подземных водонесущих коммуникаций. Естественная разгрузка подземного потока затруднена вследствие засыпки отрогов балки Встречной для обустройства ул. Паникахи и строительства домов, гаражей и прокладки Евпаторийского путепровода, разделяющего жилые массивы “Тополь-1” и “Тополь-2”.

После аварии на ж/м “Тополь-1” в июне 1997 г. в пределах участка оползня сформировался пониженный базис дренирования. Проведенные мероприятия по снижению уровня подземных вод, а именно ревизия подземных водонесущих сетей с укладкой новых трубопроводов, переоснащение сетей теплоснабжения с подземных на поверхностные, ремонт асфальтовых отмолок и др., отразились на динамике уровня поверхности подземных вод.

По состоянию на 2012 г. снижение уровня подземных вод зафиксировано на всей территории исследований за исключением участка, прилегающего к засыпанной части б. Тополиная (южная часть). Так в северной, северо-западной и западной частях уровень подземных вод понизился на 3,0 – 9,0 м (по сравнению с положением уровня, зафиксированным в июне 1997 г.), а скорость снижения уровня составила 0,2 – 0,6 м/год.

В целом, гидрогеологический режим, начиная с застройки и эксплуатации территории ж/м “Тополь-2” до настоящего времени, имеет колебательный характер с недостаточно прогнозируемыми величинами понижения и подъема уровня подземных вод.

В естественных условиях исследуемая территория расположена в зоне переменного увлажнения и представлена фильтрационно-анизотропными лесовыми отложениями.

По состоянию на 2012 год большая часть территории исследований с глубиной залегания уровня подземных вод более 5,0 м относится к III типу условий по потенциальному подтоплению.

Южная часть территории, прилегающая к засыпанной части б. Тополиная, а также днище б. Встречной, где глубина до уровня подземных вод менее

5,0 м, относится к подтопленной подземными водами. Глубина до уровня подземных вод при выпадении обильных дождей и снеготаянии достигает 2,0 м от дневной поверхности.

### ***3.1.3. Инженерно-геологические условия исследуемой территории***

В пределах исследуемой территории инженерно-геологические изыскания выполнялись начиная с 1970 года до настоящего времени. Детальная характеристика инженерно-геологических элементов, нормативные и расчетные показатели физико-механических и просадочных свойств грунтов приведены в материалах [7, 8, 57, 90, 91, 92, 95, 99, 100].

Особенностью инженерно-геологического строения территории является наличие в разрезе лессовых суглинков и супесей, которые проявляют просадочные свойства при замачивании, как в условиях естественного давления, так и при дополнительных нагрузках (рис. 3.3).

В пределах жилого массива мощность просадочных грунтов изменяется от нескольких сантиметров до 13,4 м (в днищах балок просадочные грунты отсутствуют), а суммарные просадки грунтов от собственного веса достигают 0,13 м.

Преимущественно, исследуемая территория относится к первому типу грунтовых условий по просадочности (суммарная просадка грунтов от собственного веса не превышает 5,0 см), а незначительная часть, где суммарное проседание грунтов от собственного веса превышает 5,0 см – относится ко второму типу грунтовых условий (рис. 3.3). Следует отметить, что приведенные показатели существенно отличаются от тех, что предшествовали застройке. Это является одним из последствий техногенеза.



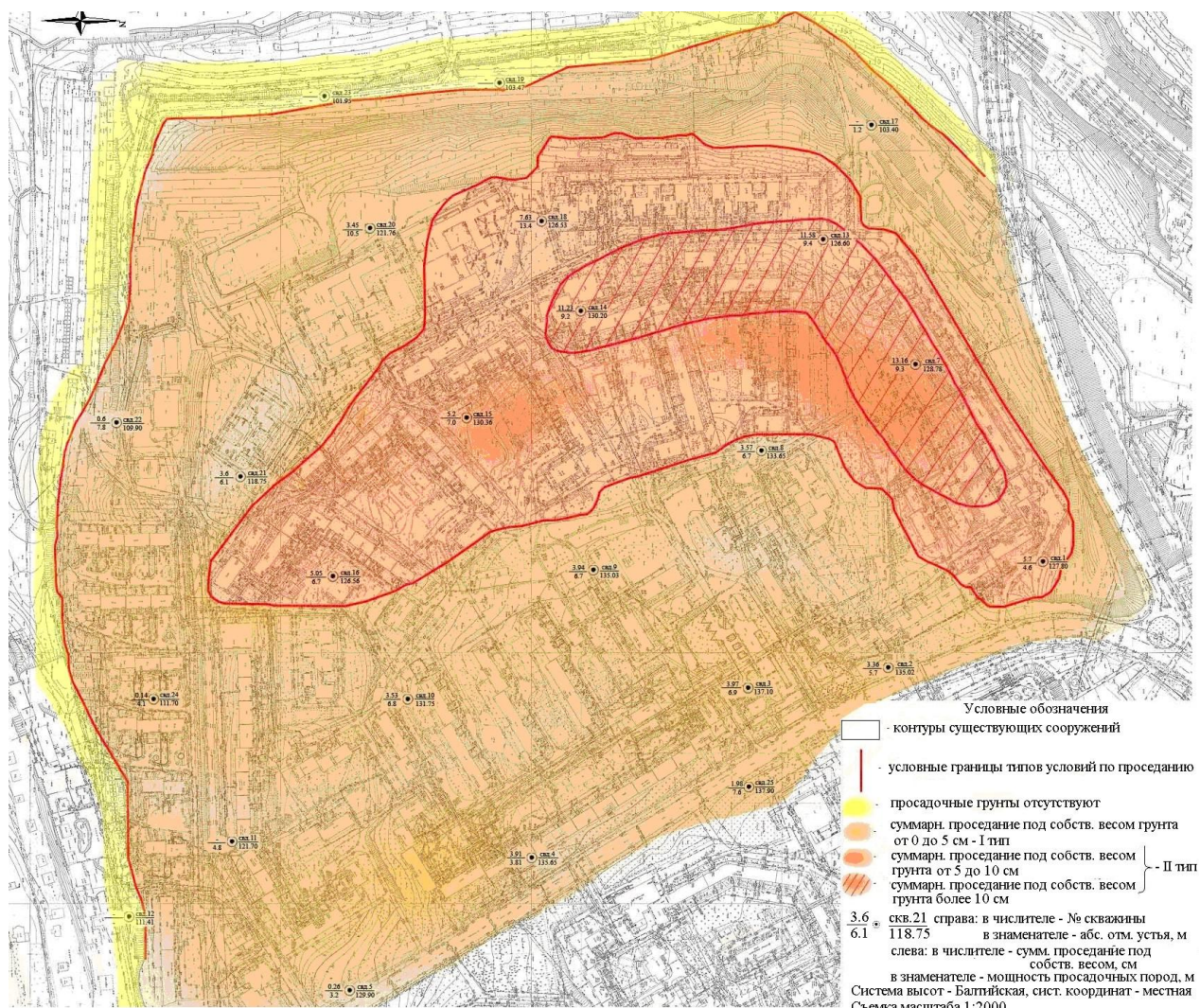


Рисунок 3.3 – Схематическая карта просадочности грунтов в пределах ж/м “Тополь-2” [91]

В пределах территории исследований под воздействием природных и техногенных факторов наблюдаются негативные физико-геологические явления и инженерно-геологические процессы:

- а) увлажнение зоны аэрации и как следствие проявление просадочных свойств грунтов, о чем свидетельствуют деформации зданий жилого массива;
- б) суффозионной вынос грунтов в нижней части склона в подвалы гаражей, дач и железнодорожного туннеля;
- в) плоскостной смыв, линейная эрозия на склоне балки;
- г) техногенный оползень (ж / м “Тополь-1”).



При эксплуатации жилых домов микрорайона увеличивается инфильтрационное питание грунтового водоносного горизонта за счет утечек из подземных водонесущих коммуникаций. В результате этого происходит локальное замачивание лессовых просадочных грунтов и как следствие деформации зданий. По истечению 10 – 15 лет с момента ввода в эксплуатацию микрорайонов были зафиксированы трещины деформационного характера на стенах домов, нарушения отмосток вокруг них, провалы коммуникационных люков, наличие влажности на стенах подвалов и воды в них.

Поскольку жилые массивы “Тополь-1” и “Тополь-2” имеют аналогичные инженерно-геологические и гидрогеологические условия, следует привести фактические данные, предшествовавшие течению оползня в 1997 г. на ж/м “Тополь-1”.

Неупорядоченный сток поверхностных вод, отсутствие дернового покрова, вырубка деревьев и подрезка склонов привели к тому, что на их поверхности образовались промоины V-образной формы длиной до 50 м, шириной до 3 м, отмечено образование вторичных оврагов в придонной части, заболачивание.

В 1989 году южнее детского комбината №356 и жилых домов № 20 и 22 была зафиксирована бровка отрыва фронтального оползня, который начал развиваться в нижней более крутой части склона б. Встречной. Бровка отрыва имела дугообразную форму длиной 300 – 350 м, трещина отрыва – ширину 0,2 – 0,5 м и глубину до 0,8 м. Смещение по вертикали на отдельных участках достигало 0,3 м и было зафиксировано городским противооползневым управлением.

Непосредственно на склоне балки, вблизи жилого дома № 29 и спортплощадки школы, были расположены канализационный и ливневый коллекторы диаметром 600 мм, проложенные под стадионом и двором школы № 99, в результате чего на склоне образовалась глубокая эрозионная промоина под углом 70°.

В 1997 году на данной территории произошел техногенный оползень вследствие чего были полностью разрушены жилой дом № 22, школа № 99 и

частично – детские комбинаты № 320 и № 356. В плане оползень имел грушевидную форму с расширенной верхней частью шириной 100 – 130 м и более узкой нижней частью на выходе в балку до 40 м. Длина оползня составила 280 м, высота стенки отрыва в голове оползня достигала 11 м. В нижней части стенок отрыва просачивались подземные воды.

До застройки микрорайонов вблизи котельной (“Тополь-3”) находилось верховье отрога левого склона балки Встречная с глубиной вреза 3 – 10 м. При планировке территории, строительстве автодороги и Евпаторийского путепровода отрог был засыпан насыпными грунтами, а под полотном пути – уплотненными суглинками. В направлении днища балки отрог не засыпанный, прилегающий склон крутой, имеет вертикальные не задернованные обрывы высотой 3 – 12 м (результат подрезки склона при строительстве гаражей).

С северо-западной стороны ж/м “Тополь-3”, а также между микрорайонами “Тополь-3” и “Тополь-2” (верховье балки Тополиной) вследствие барражного эффекта от искусственно погребенных эрозионных форм рельефа (засыпанные и спланированные отроги балок) развивается подтопление территории.

Нарушение почвенно-растительного слоя, рытье траншей и уступов, засыпка отрогов и подрезка склона при строительстве гаражей привели к развитию площадной и линейной эрозии, суффозионных явлений, оврагообразованию. Также для развития неблагоприятных геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических процессов существуют природные предпосылки. Территория расположена в пределах межбалочного водораздела, сложенного лессовыми, легко размокаемыми грунтами большой мощности (до 35 – 40 м), которые по своей несущей способности относятся к категории слабых грунтов, характеризуются чередованием водопроницаемых и водоупорных слоев и залегают на региональном водоупоре нижнечетвертичных и неогеновых глин, что в условиях нарушенного водообмена способствует развитию процесса подтопления.

### 3.1.4. Закономерности формирования поля инфильтрационного питания

Основную приходную часть водного баланса грунтовых вод исследуемой территории составляет инфильтрационное питание, как за счет атмосферных осадков, так и техногенных утечек. Величина естественного питания подземных вод определяется неравномерным распределением осадков в многолетнем разрезе и в течение года, а также их видом. Зимние осадки способствуют накоплению большого количества влаги на поверхности земли, а когда температура повышается, происходит интенсивное формирование поверхностного стока и инфильтрации.

Пополнение грунтовых вод в осенне-зимний период подтверждается и результатами лизиметрических исследований. Они свидетельствуют, что при неглубоком залегании уровня подземных вод в условиях, характерных для Центральной Европы (Р. Келлер), наиболее значительное питания грунтовых вод происходит в зимние и осенние месяцы (табл.3.2).

Таблица 3.2 – Распределение инфильтрационного питания в течение года

Месяцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Всего
Осадки													
мм	86	53	32	59	79	114	113	85	49	55	35	45	755
Инфильтрация													
мм	18	39	27	20	13	5	-	6	-	-	-	4	132
% от количества осадков	21	74	84	34	16	4	-	7	-	-	-	9	17,5

По результатам исследований зарубежных (Ретхати Л.) и отечественных (Баер Р.А., Зеленин И.В., Лютаев Б.В. и др.) авторов на балансовой станции в Гессене (центральная часть Германии) на глубине 2 м и станциях Асканийская, Ингулецкая, Шкодогорская установлено, что суммарная инфильтрация в холодный период года больше, чем в теплый (табл. 3.3).

Таблица 3.3 – Результаты лизиметрических исследований Гессенской станции

Грунт	Инфильтрация, %		Среднее значение, %
	зимний	летний	
Песок	96	55,5	72
Песок пылеватый	71,3	24,4	44,2
Чернозем	72,0	27,0	46,0

Для исследуемой зоны установлено, что зависимость между величинами инфильтрации и атмосферных осадков за период ноябрь-март в интервалах глубин залегания грунтовых вод от 0,5 м до 5,0 м для зоны аэрации, которая представлена лессовыми суглинками, близка к прямолинейной (рис. 3.4). Коэффициент корреляции изменяется по глубине от 0,75 до 0,25 (табл. 3.4), т.е. степень связи между инфильтрацией и количеством осадков уменьшается с глубиной или увеличением мощности зоны аэрации [99].

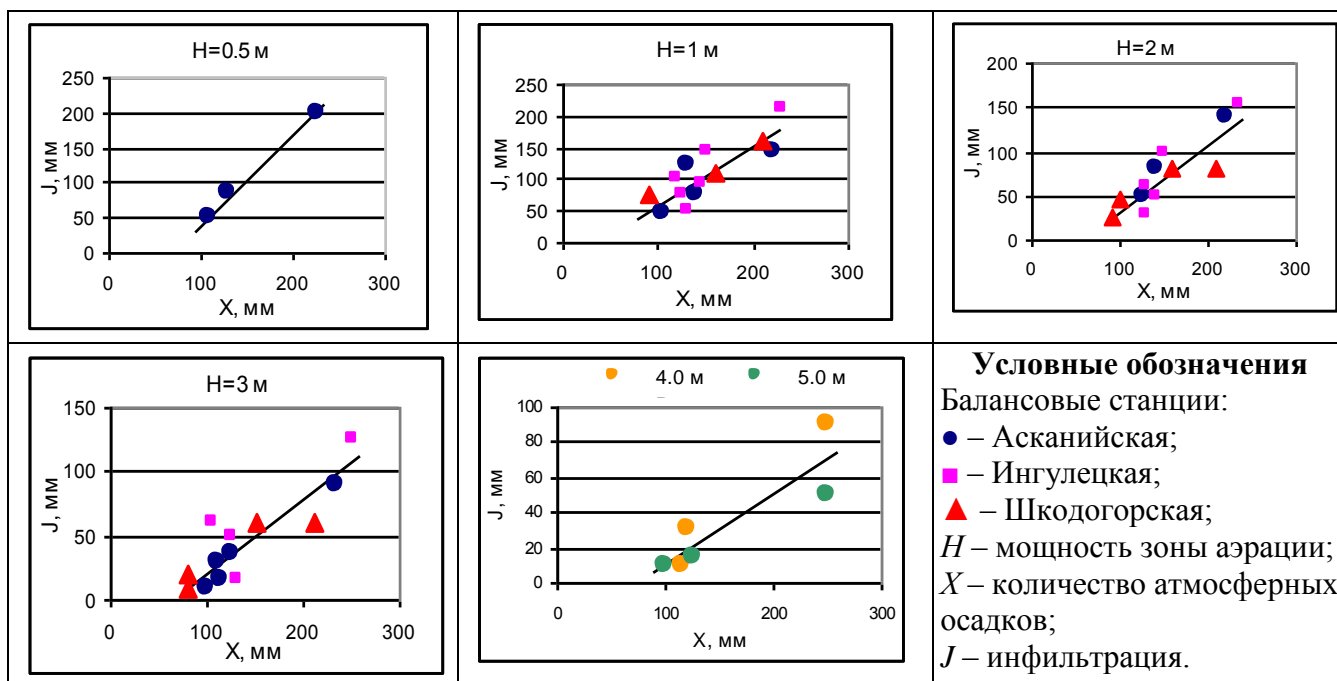


Рисунок 3.4 – Графики зависимости инфильтрации от количества атмосферных осадков в период с ноября по сентябрь

Таблица 3.4 – Изменения корреляционной связи с глубиной

Глубина до уровня подземных вод, м	Количество осадков, мм/год	Инфильтрация, мм/год	Коэффициент корреляции
0,5 – 1,0	170	128	0,75
2,0	170	94	0,55
3,0	170	51	0,3

При определении величины инфильтрационного питания исследуемой территории ж/м “Тополь-2” необходимо учитывать длительность маловодных и многоводных лет. Применение методов статистического анализа многолетних данных инструментальных наблюдений за стоком рек, атмосферными осадками и температурой воздуха позволяет выделить периодические и циклические составляющие режимобразующих факторов подземных вод. Анализ изменений суммарного количества годовых осадков за последние 50 лет (рис. 3.5) указывает на тенденцию их увеличения до 2006 года [117], до 2015 года – уменьшения, а с 2016 года – последующее увеличение.

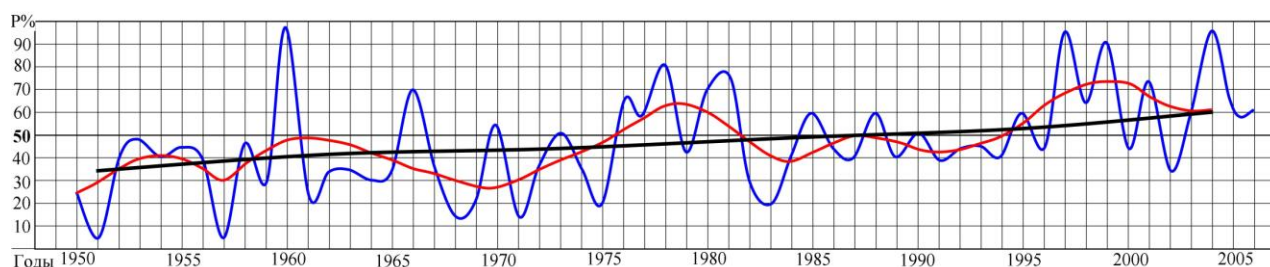


Рисунок 3.5 – Распределение количества атмосферных осадков в многолетнем разрезе по данным гидрометеорологической станции г. Днепропетровск (синим цветом показано количество атмосферных осадков, черным и красным – линейный и нелинейный тренд, соответственно)

В центральной Украине почти повсеместно увлажнение осуществляется за счет прямой инфильтрации и конденсации, особенно на участках относительно глубокого залегания грунтовых вод под покровом слабопроницаемых лессовых пород.

При анализе распределения инфильтрационного питания по площади и глубине рассматриваются ландшафтные гидрогеологические комплексы (ЛГГК). Это участки распространения первого от поверхности водоносного горизонта, отражающие строение зоны аэрации, водовмещающей и водоупорной толщ, которое определяет особенности питания и разгрузки грунтовых вод, коллекторские свойства пластов горных пород, где происходит их формирование. ЛГГК занимают верхний слой зоны активного водообмена. Их верхней границей служит дневная поверхность, а нижней – поверхность первого регионального водоупора.

На территории г. Днепропетровск распространены ЛГГК двух типов 5а (9) и 4а (7). Величины инфильтрационного питания, полученные по результатам анализа информационных сводок [117], приведены в таблице 3.5 и представлены на рис. 3.6.

Таблица 3.5 – Величины инфильтрационного питания ( $W$ , мм)

№	Породы зоны аэрации	Водоотдача, $\mu$	Интервал глубин, м	50 % обеспеченности		95 % обеспеченности	
				Год	$W$ , мм	Год	$W$ , мм
1	суглинок	0,05	2,4-3,3 (0-3)	1993	57	1976	36
2	суглинок	0,05	3,6-4,4 (3-5)	1986	68,5	1976	37
3	суглинок	0,05	3,9(3-5)4,6	1986	63	1991	29
4	суглинок, песок	0,075	3,2(3-5)3,9	1986	157	1991	104
5	суглинок, песок	0,15	6,7(5-10)7,3	1986	63	1991	37
6	суглинок	0,05	4,7(3-5)5,2	1981	90	1986	50
7	суглинок	0,05	1,7(0-3)2,4	1981	52	1986	29
8	суглинок	0,05	4,8(3-5)5,2	1978	74	1976	36
9	суглинок	0,05	4,0(3-5)4,7	1971	47	1976	29
10	суглинок	0,05	5,0(5-10)5,6	1983	52	1986	30
11	суглинок	0,05	3,6(3-5)4,2	1968	57	1976	37
12	суглинок	0,05	4,8(3-5)5,2	1978	62	1975	28
13	суглинок	0,05	8,0(5-10)8,7	1969	19	1976	9
14	суглинок	0,05	2,8(0-3)3,2	1986	68	1975	35

В соответствии с результатами вышеприведенных исследований, с учетом геоморфологического строения, литологического состава, глубины залегания

ния уровня грунтовых вод и расположения источников техногенной нагрузки, созданы массивы данных природного и техногенного инфильтрационного питания подземных вод в пределах территории исследований. Это позволяет в процессе решения обратных задач количественно установить степень влияния природной и техногенной составляющей на формирование гидродинамического режима подземных вод ж/м “Тополь-2”.

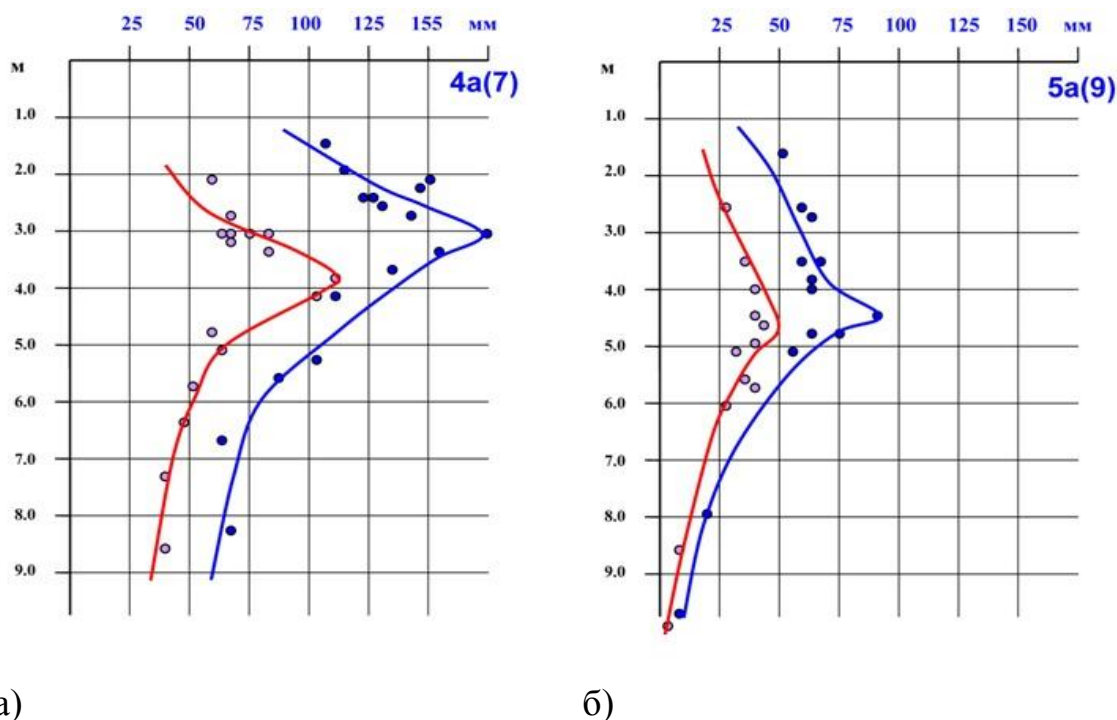


Рисунок 3.6 – Изменение величины инфильтрационного питания по глубине в годы 50 % (синий цвет) и 95 % (красный цвет) обеспеченности в зависимости от мощности зоны аэрации и ее литологического состава: а) суглинки; б) суглинки и песок

### 3.2. Математическая и физическая основа численного моделирования гидродинамических процессов

#### 3.2.1. Математическая реализация модели геофильтрации

Практика и опыт решения задач прогнозирования гидродинамических изменений в геотехнической среде показывает, что метод численного матема-

тического моделирования является наиболее гибким и обоснованным в условиях неопределенности и многофакторности природных и искусственно созданных процессов [7, 8, 28, 76, 84, 95, 104].

На геофильтрационных моделях имеется возможность учитывать особенности техногенной нарушенности грунтового массива в результате эксплуатации инженерных сооружений, взаимосвязь подземных и поверхностных вод, перетекание через разделяющие слабопроницаемые слои, инфильтрационное питание за счет атмосферных осадков и техногенных утечек, испарение в зависимости от глубины залегания грунтовых вод, высачивание на поверхность, изменение граничных условий и параметров во времени, анизотропию фильтрационных свойств и др. Кроме того, физической основой модели фильтрации является закон сохранения баланса, что позволяет в явном виде найти зависимость динамики уровней и расходов во времени и по площади.

Под гидродинамическим моделированием понимают процесс воспроизводства на специально построенных аналогах сложных гидрогеологических объектов с целью изучения их параметров. Математическая модель аналогична объекту по совокупности и тождественности уравнений, описывающих процессы и явления, протекающие на объекте и модели.

Так, в основу численного моделирования режима формирования уровня поверхности подземных вод на ж/м “Тополь-2” положено основное дифференциальное уравнение фильтрации (3.1), которое решается численными итерационными методами с помощью системы конечно-разностных уравнений [6, 55, 81]

$$T_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \pm W = \mu^* \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (3.1)$$

где  $H$  – искомая функция напора,  $m$ ;  $T_x$ ,  $T_y$  – проводимость водоносного горизонта по линейным координатам  $x$  и  $y$ , соответственно,  $m^2/сут$ ;  $W$  – питание (разгрузка) по водоносному слою;  $\mu^*$  – коэффициент упругой водоотдачи;  $t$  – время,  $сут$ .

Конечно-разностная аппроксимация основана на дискретном



представлении геофильтрационного потока в пространстве и времени, при котором непрерывное фильтрационное поле  $H(x, y, t)$  заменяется фиктивной сеточной областью, характеризующейся величинами напоров  $H(x_j, y_i, t_k)$  во всех узловых точках сетки на ряд моментов времени с шагом  $\Delta t$  (рис. 3.7). Фильтрационное сопротивление (величина обратная водопроницаемости) между центрами соседних блоков представляет собой отношение потерь напора к расходу потока на выбранном участке ( $\text{сум}/\text{м}^2$ )

$$\Phi = \frac{\Delta H}{Q} = \frac{\Delta H}{K\omega \frac{\Delta H}{\Delta x}} = \frac{\Delta x}{K\omega}, \quad (3.2)$$

где  $\omega$  – площадь поперечного сечения потока подземных вод,  $\text{м}^2$ .

Для планового потока подземных вод шириной  $\Delta y$  уравнение (3.2) принимает вид

$$\Phi = \frac{\Delta H}{q\Delta y} = \frac{\Delta H}{T\Delta y} = \frac{\Delta H}{T\Delta y \Delta H / \Delta x} = \frac{\Delta x}{T\Delta y} \quad (3.3)$$

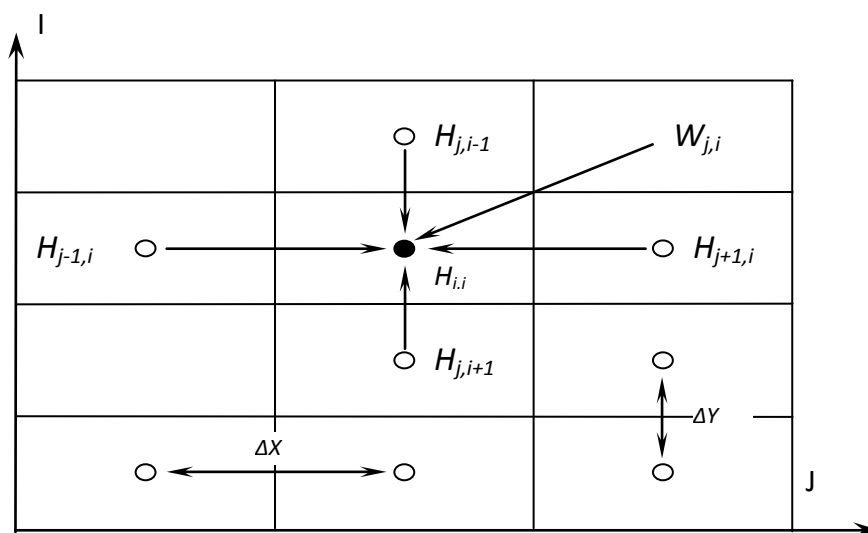


Рисунок 3.7 – Схема к составлению и анализу балансовых конечно-разностных уравнений:  $H_{j,i}$  – значение уровня подземных вод в блоке  $j, i$ ;  $W_{j,i}$  – величина притока (оттока) в расчетном блоке  $j, i$ ;  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – расстояние между центрами блоков по осям  $j$ ,  $i$ .

При движении воды перпендикулярно границе раздела сред с разной проводимостью их средние значения для участков  $[x_{j-1}, x_j]$ ,  $[x_j, x_{j+1}]$  и  $[x_{i-1}, x_i]$ ,  $[x_i, x_{i+1}]$  вычисляют по формулам

$$T_{j-1,j} = \frac{2}{1/T_{j-1} + 1/T_j} \quad T_{j,j+1} = \frac{2}{1/T_j + 1/T_{j+1}}$$

$$T_{i-1,i} = \frac{2}{1/T_{i-1} + 1/T_i} \quad T_{i,i+1} = \frac{2}{1/T_i + 1/T_{i+1}}$$

Для представления дифференциального уравнения баланса подземных вод (3.1) в конечно-разностной форме производные напора в расчетной точке выражают через разности значений напоров на концах пространственных или временных интервалов, отнесенных к расстоянию между границами соседних блоков.

Конечно-разностная аппроксимация (3.1) имеет вид

$$\frac{H_{j-1,i}^t - H_{j,i}^t}{\Phi_{j-1,j}} - \frac{H_{j,i}^t - H_{j+1,i}^t}{\Phi_{j,j+1}} + \frac{H_{j,i-1}^t - H_{j,i}^t}{\Phi_{i-1,i}} - \frac{H_{j,i}^t - H_{j,i+1}^t}{\Phi_{i,i+1}} \pm W_{j,i} \Delta x_j \Delta y_i = \mu_{j,i} \Delta x_j \Delta y_i \frac{H_{j,i}^t - H_{j,i}^{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (3.4)$$

Фильтрационное сопротивление ( $\Phi$ ) потока между расчетными блоками, выражают, согласно (3.3), через размеры блоков ( $\Delta x, \Delta y$ ) и значения водопроводимостей ( $T$ )

$$\Phi_{j-1,j} = \frac{2\Delta y_i T_{j,i} T_{j-1,i}}{T_{j,i} \Delta x_{j-1} + T_{j-1,i} \Delta x_j}; \quad \Phi_{j,j+1} = \frac{2\Delta y_i T_{j,i} T_{j+1,i}}{T_{j,i} \Delta x_{j+1} + T_{j+1,i} \Delta x_j};$$

$$\Phi_{i-1,i} = \frac{2x_j T_{j,i} T_{j,i-1}}{T_{j,i} \Delta y_{i-1} + T_{j,i-1} \Delta y_i}; \quad \Phi_{i,i+1} = \frac{2x_j T_{j,i} T_{j,i+1}}{T_{j,i} \Delta y_{i+1} + T_{j,i+1} \Delta y_i};$$

Параметр  $W$ , отражающий питание (разгрузку) пласта по площади

распространения, в данной постановке задачи отражает перетекание через слабопроницаемые (разделяющие) слои. Его численное значение определяется соотношением

$$W = \frac{H - H'}{m_0/k_0},$$

где  $H, H'$  – напоры подземных вод в рассматриваемом и смежном водоносных горизонтах;  $k_0, m_0$ , – коэффициент фильтрации и мощность разделяющего слоя.

Выразив из уравнения (3.4) искомое значение напора  $H_{j,i}^t$  и обозначив сомножители при уровнях через коэффициенты  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \alpha$ , получают

$$H_{j,i}^t = \frac{\beta_1}{\alpha} H_{j-1,i}^t + \frac{\beta_2}{\alpha} H_{j+1,i}^t + \frac{\beta_3}{\alpha} H_{j,i-1}^t + \frac{\beta_4}{\alpha} H_{j,i+1}^t + \frac{1}{\alpha} W_{j,i} \Delta x_j \Delta y_i + \frac{\beta_5}{\alpha} H_{j,i}^{t-\Delta t} \quad (3.5)$$

где

$$\beta_1 = \frac{T_{j,i} \Delta x_{j-1} + T_{j-1,i} \Delta x_j}{2 \Delta y_i T_{j,i} T_{j-1,i}}; \quad \beta_2 = \frac{T_{j,i} \Delta x_{j+1} + T_{j+1,i} \Delta x_j}{2 \Delta y_i T_{j,i} T_{j+1,i}};$$

$$\beta_3 = \frac{T_{j,i} \Delta y_{i-1} + T_{j,i-1} \Delta y_i}{2 \Delta x_j T_{j,i} T_{j,i-1}}; \quad \beta_4 = \frac{T_{j,i} \Delta y_{i+1} + T_{j+1,i} \Delta y_i}{2 \Delta x_j T_{j,i} T_{j+1,i}};$$

$$\beta_5 = \frac{\mu_{j,i} \Delta x_j \Delta y_i}{\Delta t}; \quad \alpha = \sum_{i=1}^5 \beta_i.$$

Уравнение (3.5) представляет собой неявную конечно-разностную схему, где определение неизвестного значения напора  $H_{j,i}^t$  становится возможным лишь после решения системы уравнений вида (3.5) для всех узловых точек сетки на время  $t$ .

В случае, если производные  $\partial^2 H / \partial^2 x$  и  $\partial^2 H / \partial^2 y$  в исходном дифференциальном уравнении выражены через значения напоров, отвечающие началу расчетного временного интервала, становится возможным в явном виде получить

искомое значение уровня  $H_{j,i}^t$ . Часто неустойчивость явной схемы при определенных соотношениях величин  $\Delta t$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $T$ , и  $\mu$  делает ее применение ограниченным. Поэтому в практике гидродинамического моделирования основное развитие получили неявные и явно-неявные схемы, устойчивость и сходимость которых математически доказана.

Простейшим примером явно-неявной схемы может служить следующее конечно-разностное представление уравнения (3.1)

$$\begin{aligned} \left( H_{j,i}^t - H_{j,i}^{t-\Delta t} \right) \beta_5 = & \sigma \left[ \frac{\beta_1 H_{j-1,i}^t + \beta_2 H_{j+1,i}^t + \beta_3 H_{j,i-1}^t + \beta_4 H_{j,i+1}^t}{\alpha} \right] + \\ & + (1-\sigma) \left[ \frac{\beta_1 H_{j-1,i}^{t-\Delta t} + \beta_2 H_{j+1,i}^{t-\Delta t} + \beta_3 H_{j,i-1}^{t-\Delta t} + \beta_4 H_{j,i+1}^{t-\Delta t}}{\alpha} \right] + \frac{1}{\alpha} W_{i,j} \Delta x_j \Delta y_i, \end{aligned} \quad (3.6)$$

где  $\sigma$  – весовой коэффициент, определенный в пределах  $0 \leq \sigma \leq 1$ .

При  $\sigma=1$  уравнение (3.6) переходит в неявное уравнение (3.5), при  $\sigma=0$  – принимает явный вид, а при промежуточных значениях – становится явно-неявным.

Геофильтрационные задачи, как правило, решаются итерационными методами, сущность которых состоит в последовательном приближении получаемого решения к точному. Критерием завершения итерационного процесса является условие близости результатов двух последовательных итераций

$$\max_{j,i} \left| H_{j,i}^{k+1} - H_{j,i}^k \right| \leq \xi.$$

Полагается, что расчетная итерация отличается от точного решения не более, чем на заданное малое число  $\xi$ . Дополнительным критерием служит соблюдение поточечного баланса по всей области фильтрации.

Представленный алгоритм численного решения дифференциального уравнения фильтрации подземных вод положен в основу программного обеспечения, использованного для создания геофильтрационной модели ж/м “Тополь-2”.

### ***3.2.2. Требования к схематизации объекта и ее последовательность***

Схематизация гидрогеологических условий предполагает обобщение природных условий и действующих факторов в пределах исследуемой территории. В результате строятся сначала фильтрационная, а затем модельная схемы исследуемого объекта [76, 106].

Основными задачами схематизации являются:

- а) выявление главных и второстепенных факторов, а также факторов, которыми можно пренебречь;
- б) определение наиболее достоверной схемы строения пласта и расчетных значений параметров;
- в) обоснование необходимости учета смежных пластов, гидравлически связанных с основным;
- г) выявление зоны влияния инженерных сооружений в плане и разрезе;
- д) упрощение форм границ и возможных их изменений во времени.

Схематизация гидрогеологических условий является важной стадией моделирования геофильтрационных процессов, от качества которой зависит достоверность построенной модели и выполненных инженерных прогнозов.

Схематизация при моделировании должна удовлетворять следующим требованиям:

- предусматривать максимально полный, но обоснованный учет гидрогеологических условий исследуемой территории и действующих на ней факторов, в результате чего модель по содержанию наиболее близко соответствует естественной обстановке;
- обеспечивать возможность построения надежной модели, которая гарантирует решение задачи с требуемой точностью;

– хранить мобильность метода и обеспечивать возможность корректировки модели, а также внесение дополнений в процессе приобретения новых фактов относительно объекта исследований;

– выполнять моделирование при соблюдении заданной точности решения относительно простыми способами и в экономически эффективные сроки.

Процесс схематизации гидрогеологических условий состоит из двух этапов. Первый этап включает упрощение природных условий и составление фильтрационной схемы. Последняя представляет собой специальную гидрогеологическую карту или разрез, на которых условными знаками показаны все гидродинамические особенности изучаемого объекта: а) размеры исследуемой области и конфигурация ее границ; б) строение пласта и значение расчетных параметров; в) типы граничных условий и законы их трансформационных изменений в плане и разрезе; г) факторы прогноза и их изменение за расчетное время.

При этом отмечается достоверность всех элементов схемы и выделяются те из них, которые будут подвергаться на следующем этапе последующей схематизации и уточнению. На основе общего гидрогеологического анализа устанавливаются возможные диапазоны изменения параметров и граничных условий, которые будут использоваться в качестве критериев физического правдоподобия при построении модели и корректировке ее обратными задачами.

Второй этап схематизации состоит в дальнейшем упрощении гидрогеологических условий в отношении выбранного метода моделирования, принятого типа модели (сплошная, дискретная и т. п.) и способа ее построения и обоснования (методом факторно-диапазонной оценки или обратными задачами в стационарной или нестационарной постановке). На этом этапе уточняется структура модели, гидродинамическая роль границ, виды водообмена и их интенсивность, распределение параметров по площади. Завершается этап построением модельной гидродинамической схемы. Она строится в том же масштабе, что и фильтрационная схема, условными обозначениями показываются все элементы модели и их соответствие фильтрационной схеме. Принятые упрощения анали-

зируются и оцениваются. Так вычисляются погрешности метода моделирования, оценивается суммарное влияние неучтенных в модели факторов, по критериям гидрогеологического правдоподобия оцениваются внесенные в модель уточнения и т. п.

Оценка качества модели является первым шагом в обосновании достоверности гидрогеологических прогнозов, поскольку она позволяет неформально оценить качество использованной информации, а величины погрешности входят как составляющие в общую оценку результатов решения обратных и прогнозных задач.

### ***3.2.3. Геофильтрационная схематизация объекта исследований***

Территория исследований, включающая жилые массивы “Тополь-2, 3”, общей площадью около 2,36 км<sup>2</sup> выделена в пределах естественных гидродинамических границ. На севере линия тока совпадает с ул. Паникахи и теплотрассой, на юге – с естественной дренажной линией в балке Тополиной, на востоке – с линией водораздела выше Запорожского шоссе, а на западе – с зоной разгрузки подземных вод в балке Встречная.

В соответствии с геолого-гидрогеологическим строением района исследований в вертикальном разрезе область фильтрации схематизирована двухслойной водоносной толщей. Первый расчетный слой отражает водоносный горизонт четвертичных отложений, второй – неогеновых песков. Водоносные горизонты имеют гидравлическую связь через разделяющий слабопроницаемый слой красно-бурых суглинков и глин.

В плане фильтрационное поле представлено сеткой размером 84×113 ячеек с равномерным шагом 20 м и содержит 5898 расчетных блоков (рис. 3.8).

*Граничные условия.* В первом слое на внешнем контуре модели по линиям тока задано граничное условие II-го рода с  $Q=0$ , а на участках притока подземных вод со стороны сопредельных территорий  $Q=const$  (рис. 3.8).



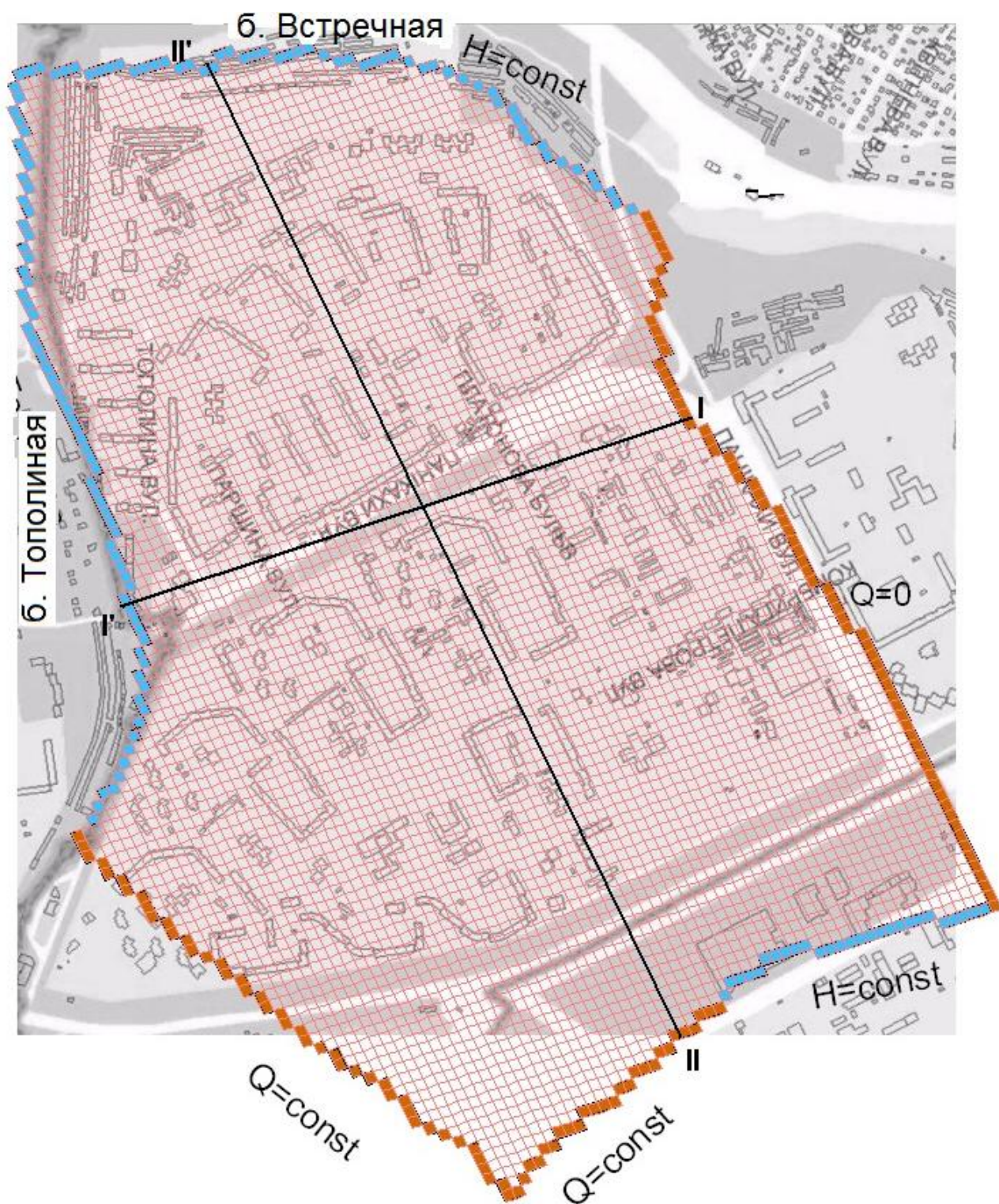


Рисунок 3.8 – Модельная схема объекта исследований

Ручьи в б. Встречной и Тополиной заданы граничным условием III-го рода и являются границами несовершенного типа, как по характеру вскрытия водоносного горизонта, так и по наличию слабопроницаемых подрусловых отло-



жений. Параметры взаимосвязи подземных вод с поверхностными водотоками рассчитаны по следующей зависимости [76]

$$DL = \frac{TS \cdot N}{L + \Delta L}, \quad (3.7)$$

где  $TS$  – водопроводимость водовмещающей толщи;  $N$  – длина водотока в расчетном блоке;  $L$  – расстояние от центра блока до водотока;  $\Delta L$  – гидродинамическое несовершенство.

Гидродинамическое несовершенство водотока определено в соответствии с формулой [76]

$$\Delta L = \sqrt{\frac{k \cdot m \cdot m_0}{k_0}},$$

где  $k_0$ ,  $m_0$  – коэффициент фильтрации и мощность балочного аллювия;  $km$  – водопроводимость водоносного горизонта.

Параметр взаимосвязи подземных вод с поверхностными задан на различных участках от 0,09 до 0,51 м<sup>2</sup>/сут, что соответствует коэффициенту фильтрации балочного делювия  $2 \times 10^{-2} - 4 \times 10^{-3}$  м/сут.

Во втором расчетном слое на восточной границе задано граничное условие III рода, что обеспечивает отток подземных вод за пределы исследуемой территории. С учетом того, что уровенный режим водоносного горизонта неогеновых отложений формируется не только в пределах территории исследований, но и на смежной территории (например, в промышленной зоне на правом склоне б. Встречная), абсолютные отметки и фильтрационные свойства на границах изменяются во времени при наличии фактических данных.

Коэффициент фильтрации водосодержащих пород, рассчитанный как средневзвешенный в разрезе по данным разных источников, представлен в табл. 3.6 [100].

Расчетное значение коэффициента фильтрации пород на период до освоения территории составляло 0,1 – 0,2 м/сут. Зоны с различными значениями

коэффициента фильтрации пород заданы с учетом фильтрационных свойств водовмещающих пород и геоморфологических особенностей территории.

Таблица 3.6 – Средние значения коэффициентов фильтрации водовмещающих пород

Индекс пород	К, м/сут
$\rho c+df$	0,2–0,24
$Bg$	0,3–0,32
$vt+ud$	0,1
$kd+pl$	0,019–0,089
$Dn$	0,03–0,3
$Mr$	0,005

*Водоотдача гравитационная* составляет 0,06 для первого четвертичного водоносного горизонта и 0,1 – для второго неогенового.

*Параметр взаимосвязи водоносных горизонтов* рассчитан по соотношению коэффициента фильтрации разделяющего слабопроницаемого слоя к его мощности ( $k_0/m_0$ ). Литологически слой представлен завадовскими, тилигульскими, мартоношскими и лубенскими тяжелыми суглинками и верхнеплиоценовыми глинами. Их мощность уменьшается от водораздела к балкам, соответственно, от 1 до 30 м (рис. 3.11). В тальвеге б. Встречная и в устье б. Тополиная зафиксировано выклинивание суглинков и глин, и разделяющим слоем здесь являются неогеновые песчаники. Коэффициент фильтрации слабопроницаемого разделяющего слоя принят по аналогии с данными, полученными при гидродинамическом моделировании на территории ж/м “Тополь-1” [100], а именно  $4 \times 10^{-4}$  м/сут – в балках и  $4 \times 10^{-5}$  м/сут – на остальной территории.

*Абсолютные отметки поверхностных водотоков* заданы на основе анализа топографических планшетов масштаба 1:500, 1:2000, 1:5000 и результатов инженерно-геологических изысканий. Абсолютные отметки уровня воды в ручье б. Встречная постоянны во времени и изменяются вниз по потоку от 99,3 до 90,4 м. На отдельных участках, где ручей заключен в трубы, взаимосвязь подземных вод с поверхностными не отображалась. Абсолютные отметки ручья в

б. Тополиной на период до 1981 г. заданы в пределах 107,5 – 94,5 м, а с 1982 г. на участке дренажа – 111,8–94 м.

*Абсолютные отметки поверхности земли* изменяются от 157,4 м до 91,3 м (рис. 3.1). Изменение положения поверхности земли во времени задавалось только на тех участках, где происходила смена условий питания и разгрузки подземных вод. Например, изменение поверхности земли в б. Встречная на участке ул. Паникахи – путепровод учтено при решении стационарной задачи на период до застройки территории, а подсыпка территории на склоне в б. Тополиной – с 1982 г.

*Абсолютные отметки кровли и подошвы водоносных горизонтов.* Абсолютные отметки кровли первого от поверхности водоносного горизонта совпадают с отметками поверхности земли.

Положение кровли (103,0 – 78,0 м) и почвы (53,0 – 48,5 м) водоносного горизонта неогеновых отложений отображается на модели достаточно условно из-за недостатка фактических данных [99]. Кровля водоносного горизонта имеет уклон с востока и юго-востока на запад и юго-запад, а подошва – с запада на восток.

*Инфильтрационное питание.* Территория ж/м “Тополь-2, 3” имеет достаточно высокую плотность застройки. Водонесущие коммуникации согласно схеме их расположения распределены равномерно по площади, но имеют более высокую концентрацию в районе улиц Паникахи, Тополиной и Запорожского шоссе. Из опыта моделирования гидрогеологической ситуации на ж/м “Тополь-1” установлено, что инфильтрационное питания за счет техногенных утечек на участках застройки и вдоль коммуникаций диаметром более 200 мм значительно превышает естественное. В этой связи выделены три типа зон. Первый – незастроенная территория, два других – территория застройки и эксплуатации инженерных сооружений и участки высокой концентрации трасс водонесущих коммуникаций. Количество зон определены в зависимости от времени ввода в эксплуатацию инженерных сооружений с учетом геоморфологических особенностей территории (водораздельное плато, склон водораздельного плато, склон балок, тальвег балок). Следует отметить, что до 1982 г. инженерная застройка

микрорайона была практически завершена. С 1982 г. до настоящего времени строятся отдельные объекты.

Для воспроизведения поля природного инфильтрационного питания грунтовых вод до застройки территории (1973 – 1974 гг.) на модели заданы минимальные значения инфильтрации атмосферных осадков от 10 мм/год до 65 мм/год.

При решении идентификационных задач на период до 1997 года инфильтрационное питание грунтовых вод не разделялось на естественное и техногенное. Начиная с 1997 года, инфильтрация на модели воссоздана двумя отдельными массивами для установления степени участия природной и техногенной составляющей в формировании гидродинамического режима территории исследований.

Минимальные глубины залегания уровня грунтовых вод зафиксированы на склонах балок и составляют 1 – 3 м, максимальные до 15 м и более – на водоразделах. Природная составляющая инфильтрации атмосферных осадков определена с учетом результатов исследований по установлению зависимости между глубиной залегания уровня грунтовых вод и величиной инфильтрации.

При определении величины техногенного питания учтены плотность застройки территории жилого массива, распределение по площади водонесущих коммуникаций и их диаметр. Нормативные потери согласно СНиП111–30–74 представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Нормативные утечки из водонесущих коммуникаций

Тип коммуникаций	Материал	Диаметр, мм	Режим работы	Нормативные утечки, м <sup>3</sup> /сут на 1 км	
Водопровод	сталь	300	напорный	1,22	22,3
Канализация	чугун	200	напорный	2,23	40,7

Коррекция поля инфильтрационного питания осуществлялась в процессе решения многочисленных обратных задач. В соответствии с планом застройки территории во времени менялись и величины техногенного питания. Так, на один расчетный блок площадью 400 м<sup>2</sup> величина нормативных потерь из водо-

провода составляла 22,3 мм/год, из канализации – 40,7 мм/год. Если в блок попадает и водопровод, и канализация, то суммарная величина потерь равна 63 мм/год. По результатам решения обратных задач выполнена корректировка величин утечек из водонесущих коммуникаций.

*Величина испаряемости* определена по формуле

$$Q_u = F \cdot W \cdot \left(1 - \frac{Z}{Z_k}\right)^n, \quad (3.8)$$

где  $F$  – площадь расчетного блока;  $W$  – испарение, включая транспирацию, принято равным 500 мм/год до 1985 г. и 800 мм/год – с 1986 г.;  $Z_k$  – критическая глубина залегания уровня грунтовых вод (4 м – до 1985 г. и 5 м – с 1986 г.);  $Z$  – глубина до воды по результатам моделирования;  $n$  – коэффициент, учитывающий особенности конкретных условий, принят равным 2.

Для центральных и южных районов Украины критическая глубина испарения составляет 3 – 5 м. Для исследуемой территории принята критическая глубина 3 – 4 м. Высачивание на поверхность земли рассчитано по формуле

$$Q_6 = DL_6 \cdot F \cdot (H_3 - H), \quad (3.9)$$

где  $H$  и  $H_3$  – абсолютные отметки уровня подземных вод и дневной поверхности, соответственно,  $DL_6$  – параметр взаимосвязи поверхностных и подземных вод ( $k_0/m_0$ ) равный 0,03.

Исходные фильтрационные параметры и массивы данных подтверждены или скорректированы в процессе решения вариантного ряда обратных задач в нелинейной постановке.

### **3.3. Постановка и анализ результатов решения обратных идентификационных задач. Адаптация модели к объекту**

Идентификация математической модели и объекта исследований происходит в два этапа, где на первом устанавливают их физическое соответствие, а

на втором – динамическое. То есть, модель по строению и реакции на определенные изменения и процессы должна быть адекватной реакции геотехнической среды.

В этой связи, решение обратных задач представляет собой последовательный многовариантный ряд нелинейных расчетов в стационарной и нестационарной постановке, в результате решения которых оценивают влияние на уровенный режим подземных вод изменений фильтрационных параметров, инфильтрационного питания, параметра взаимосвязи смежных водоносных горизонтов, несовершенства водотоков. По результатам факторно-диапазонного анализа обосновывают массивы входных данных для решения стационарной задачи, позволяющие получить баланс притоков и оттоков близкий к нулю и положение уровня, близкое к фактическому. Контрольными данными при решении задач идентификации служат данные, полученные при проведении инженерно-геологических изысканий в период с 1973 – 2012 гг. [57, 90, 91, 92, 95, 99, 100] и результаты многолетних режимных наблюдений.

### ***3.3.1 Идентификация модели по физической аналогии***

Первый этап идентификационных решений предполагает воспроизведение на модели уровенной поверхности и баланса подземных вод в стационарной постановке на период до застройки жилых массивов (1973 – 1974 гг.).

Если коэффициенты фильтрации водовмещающих пород являются величинами достоверными (табл. 3.6), то корректируются величины инфильтрационного питания, параметр взаимосвязи водоносных горизонтов, приток со стороны сопредельных территорий (со стороны ж/м “Тополь-1” и вершины левого склона балки Тополиная) и параметр взаимосвязи подземных вод с поверхностными.

Для обоснования величин принятых параметров и граничных условий оценивается их влияние на изменение уровня подземных вод (факторно-диапазонный анализ). Увеличение коэффициента фильтрации водосодержащих четвертичных отложений в 1,5 раза приводит к снижению уровня подземных

вод на водоразделе на 0,03 – 0,1 м, в центральной части – на 0,15 – 2,0 м, на склоне балок – на 0,04 – 0,05 м, а в тальвеге – на 0,3 – 0,7 м.

Изменение величины инфильтрационного питания подземных вод с 10 до 15 мм/год приводит к подъему уровня от 0,1 м в районе балок до 0,6 м на водоразделе в районе Запорожского шоссе.

Уменьшение параметра взаимосвязи подземных вод с поверхностными водами ручья в б. Тополиной на порядок приводит к росту уровня на 0,8 – 2,0 м в полосе шириной около 200 м, примыкающей к ручью.

С учетом результатов проведенных экспериментов фильтрационные параметры водоносных горизонтов и разделяющих слабопроницаемых толщ скорректированы таким образом, чтобы уровни на модели были близки фактическому положению уровенной поверхности на 1973 – 1974 гг. Таким образом:

- коэффициент фильтрации разделяющего слоя составляет преимущественно  $(1,8-2,8) \times 10^{-5}$  м/сут; в балке Встречной около ручья –  $(0,9-2,4) \times 10^{-4}$  м/сут и  $(3,2-4,0) \times 10^{-5}$  м/сут – в тальвеге; в балке Тополиной –  $(1,6-8,0) \times 10^{-5}$  м/сут (устье) и  $(0,3-1,6) \times 10^{-5}$  м/сут (верховье);

- коэффициент фильтрации водовмещающих четвертичных суглинков на водоразделе между балкой Тополиной и балкой вдоль путепровода – 0,1 м/сут, на остальной территории – 0,18-0,2 м/сут; для неогеновых песков установлен коэффициент фильтрации равный 1,6 м/сут;

- инфильтрационное питание составляет преимущественно 10 – 15 мм/год и 20 мм/год в тальвегах балок Встречная и Тополиная. По результатам предыдущих исследований инфильтрационное питание на период до застройки территории составляет 6–10 мм/год. Суммарная величина инфильтрационного питания – 71,2 м<sup>3</sup>/сут. Приток подземных вод со стороны смежных территорий – 7 м<sup>3</sup>/сут с северо-востока и 6 м<sup>3</sup>/сут – с юго-востока;

- параметр взаимосвязи подземных вод с поверхностными в б. Встречной – 0,6-5,1 м<sup>2</sup>/сут, в б. Тополиной – 1,0-6,7 м<sup>2</sup>/сут.

При указанных параметрах гидродинамическая модель территории исследований сбалансирована в пределах своих гидродинамических границ (табл. 3.8).

Таблица 3.8 – Баланс подземных вод на период до застройки территории

Приходные элементы баланса, м <sup>3</sup> /сут		Расходные элементы баланса, м <sup>3</sup> /сут	
<b>Слой 1</b>			
Инфильтрационное питание	71,2	Переток в неогеновые пески	93,3
Приток на внешнем контуре	44,3	Разгрузка в ручей б. Тополиная	11,3
		Испарение	9,1
		Высачивание	0,6
		Емкостная составляющая	1,1
<b>Всего</b>	<b>115,5</b>	<b>Всего</b>	<b>115,4</b>
<b>Слой 2</b>			
Переток через кровлю	93,3	Разгрузка на внешнем контуре (на востоке)	92,1
Емкостная составляющая	0	Емкостная составляющая	1,3
<b>Всего</b>	<b>93,3</b>	<b>Всего</b>	<b>93,49</b>

Воспроизведенное на модели положение урвневной поверхности грунтовых вод близко к фактическому, зафиксированному первыми инженерно-геологическими изысканиями в 1973 – 1974 гг. (рис. 3.9).

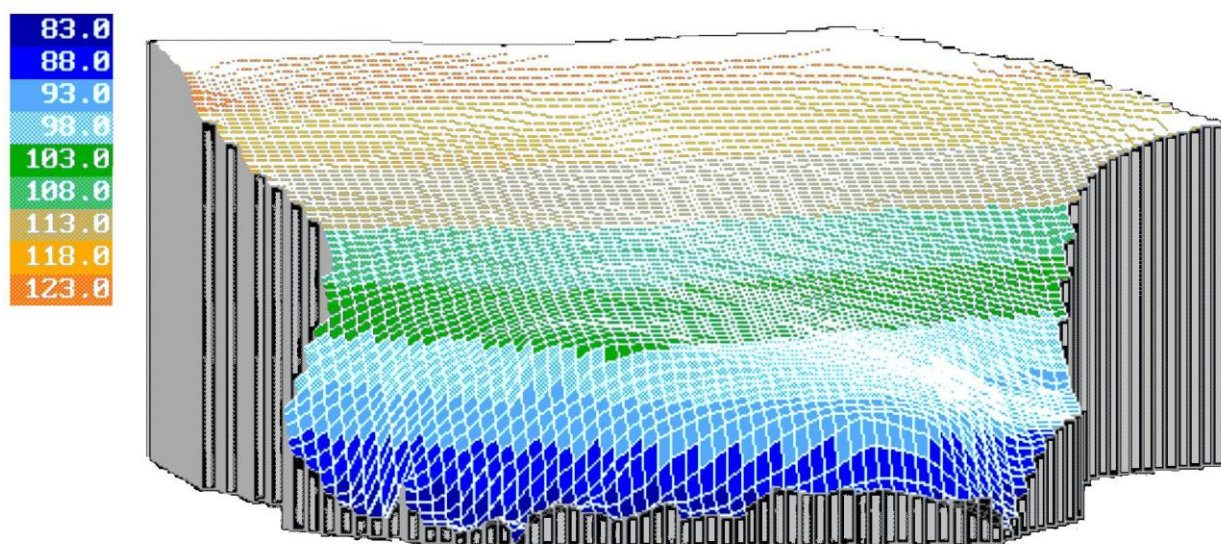


Рисунок 3.9 – Урвневная поверхность грунтовых вод (абс. отм., м) по состоянию на 1973 г.



При этом уровень грунтовых вод в ненарушенных условиях формировался на бóльшей части территории (кроме балок) на глубинах от 20 до 28 м (рис. 3.10).

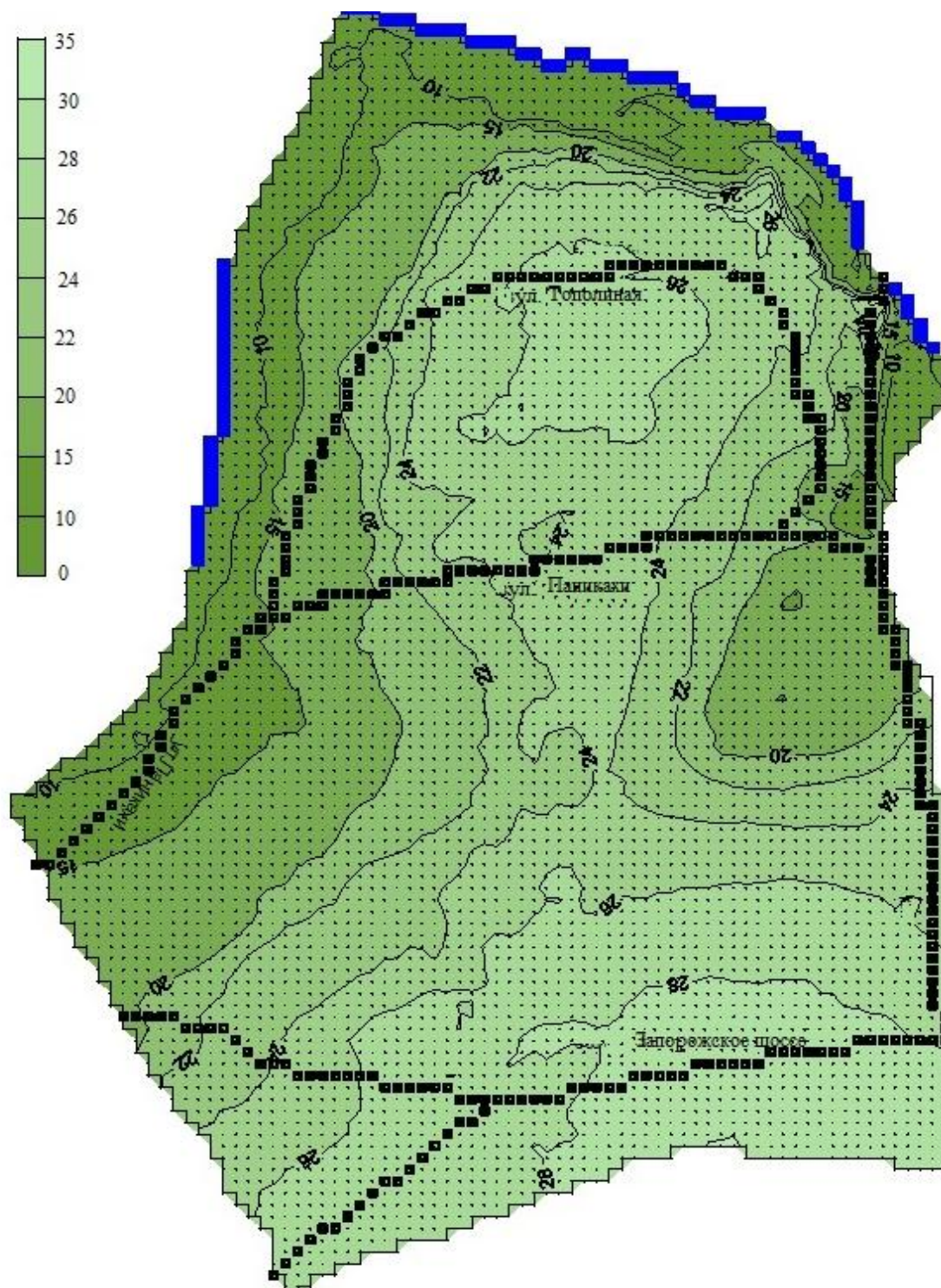


Рисунок 3.10 – Карта глубин залегания уровня грунтовых вод (м) на период до застройки территории

Отдельные сведения о положении уровня подземных вод неогенового водоносного горизонта свидетельствуют о том, что уровенная поверхность второго расчетного слоя имеет уклон с запада на восток с перепадом отметок от 61,0 м в балке Встречной до 52 м в районе Запорожского шоссе (рис. 3.11).

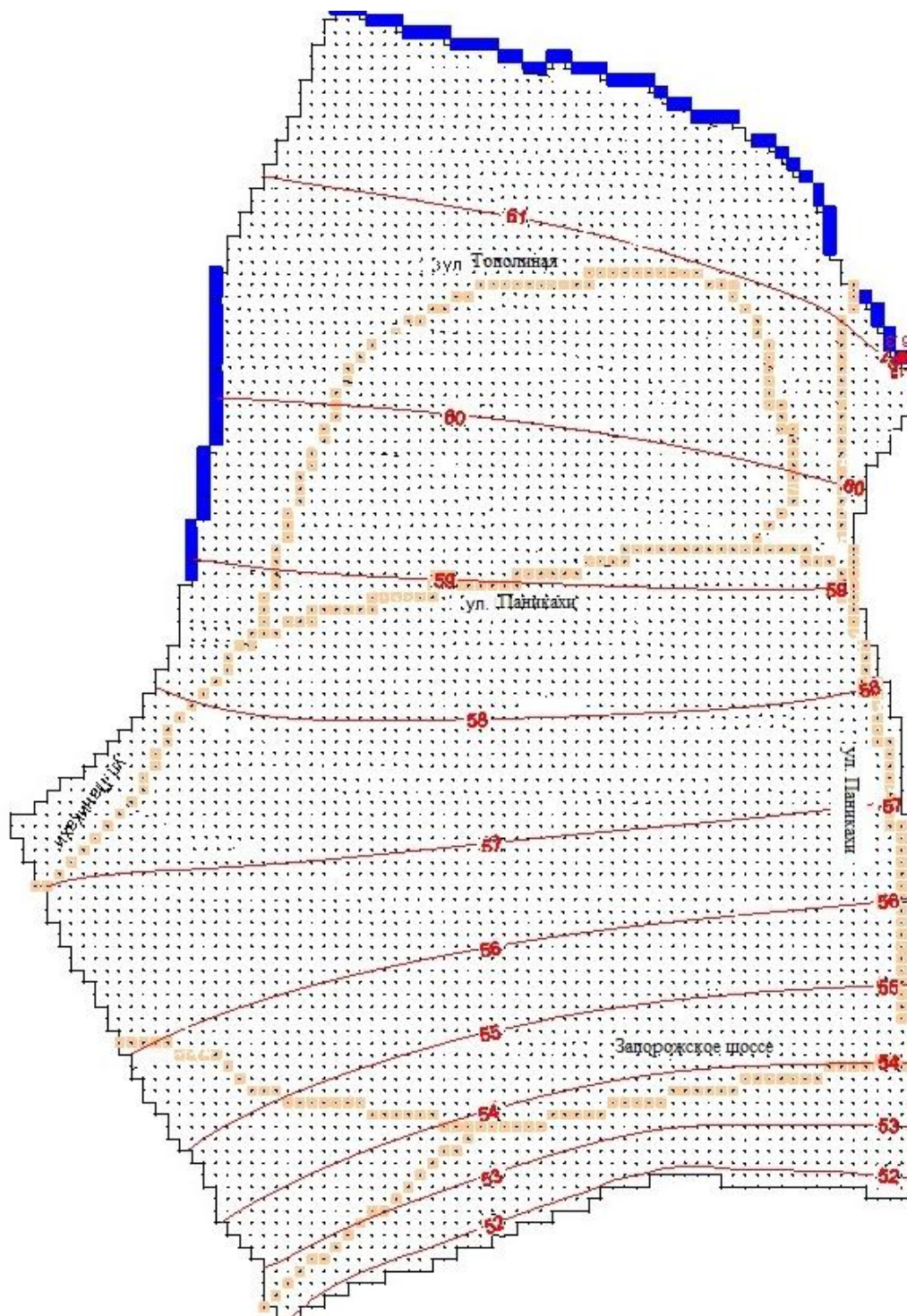


Рисунок 3.11 – Уровенная поверхность подземных вод (абс. отм., м) неогеновых отложений на период до застройки территории



Следует отметить, что водоток в б. Встречной является одновременно зоной разгрузки для подземных вод грунтового горизонта и зоной питания для водоносного горизонта неогеновых отложений.

### ***3.3.2. Обоснование динамического соответствия модели и объекта***

Результаты решения обратных нестационарных задач воссоздают динамику формирования уровенной поверхности грунтовых вод с 1975 г. по 2012 г. по отдельным период. При этом параметры водоносного горизонта и граничные условия остаются величинами постоянными, а переменными во времени являются инфильтрационное питание подземных вод и расходы на границе области фильтрации. Начальными условиями для каждого последующего решения являются результаты решения предыдущего периода.

*1975 г.* Начальные условия – результаты решения стационарной задачи. Инфильтрационное питание за счет техногенных утечек на застраиваемых в 1975 г. участках составляет – 75-90 мм/год (преимущественно 75 мм/год). Суммарная величина инфильтрационного питания – 90,5 м<sup>3</sup>/сутки. Абсолютные отметки уровня подземных вод изменяются по площади от 83,0 м до 127,8 м (слой 1) и от 51,0 м до 61,9 м (слой 2). Скорость подъема уровня грунтовых вод на застраиваемых участках составила 0,7 м/год.

*1976 г.* Инфильтрационное питание за счет техногенных утечек на застраиваемых участках составляет 40 – 90 мм/год (преимущественно 75 мм/год). Суммарная величина инфильтрационного питания 125,9 м<sup>3</sup>/сут. Приток подземных вод в неогеновые пески с правого склона б. Встречной – 207,2 м<sup>3</sup>/сут. Уровни в 1976 г. по результатам моделирования находятся на отметках 83,0 – 128,4 м (слой 1) и 51,0 – 65,1 м (слой 2). Максимальный подъем уровня грунтовых вод в период с 1974 по 1976 гг. составляет 2,5 м.

*1977 – 1978 гг.* Инфильтрационное питание на застраиваемых участках достигает 100 мм/год. Суммарная величина инфильтрационного питания в 1977 г. – 273,1 м<sup>3</sup>/сут, а в 1978 г. – 298,0 м<sup>3</sup>/сут. Подъем уровня грунтовых вод по

сравнению с 1974 г. составил 4 м. Составляющие баланса подземных вод по результатам моделирования на данный период представлены в таблице 3.9.

*1979 – 1980 гг.* Положение уровня подземных вод неогеновых песков на контуре разгрузки меняется с отметки 51,0 м на 54,5 м. Инфильтрационное питание за счет атмосферных осадков и техногенных утечек на застраиваемых участках 75 – 100 мм/год. Суммарная величина инфильтрационного питания в 1980 г. – 309,8 м<sup>3</sup>/сут. Приток подземных вод в неогеновые пески с правого склона б. Встречная – 222 м<sup>3</sup>/сут. Уровенная поверхность в 1980 г. находится на отметках 83,0 – 130,9 м (слой 1) и 54,5 – 68,7 м (слой 2). Прирост уровня грунтовых вод с 1974 г. составил 5,3 м. Максимальный подъем уровня зафиксирован в центральной части жилых массивов.

*1981 г.* В данный период времени уровень грунтовых вод на участках, где отметки подошвы пласта имеют наибольшие значения, из слабопроницаемых отложений переходит в зону хорошо проницаемых пород, и поэтому, коэффициент фильтрации изменяется с 0,1 до 0,15 – 0,18 м/сут. Уровень подземных вод неогеновых песков на контуре их разгрузки увеличен до 55,5 м. Инфильтрационное питание за счет техногенных утечек на застроенных участках достигло 75 – 120 мм/год, на незастроенных – 10 – 30 мм/год. Суммарная величина инфильтрационного питания составила 369,7 м<sup>3</sup>/сут. Уровни в 1981 г. находились на отметках 83,0 – 131,4 м (слой 1) и 55,5 – 69,2 м (слой 2). Прирост уровня грунтовых вод с 1974 г. – до 6,2 м, межпластовых – до 6, 9 м. Величина подъема уровня грунтовых вод в 1981 г. достигла 1,75 м.

*1982 г.* На участках подсыпки поверхности земли вдоль б. Тополиная увеличены абсолютные отметки дневной поверхности на 2 – 5 м. Аналогичные изменения внесены в массив отметок кровли первого от поверхности водоносного горизонта. Уровень подземных вод неогеновых песков на контуре разгрузки повышается до отметки 56,5 м. Величина инфильтрационного питания остается неизменной. Прирост уровня грунтовых вод с 1974 г. составляет 7 м, а в водоносном горизонте неогеновых отложений – 7,4 м. Составляющие баланса подземных вод на 1982 г. приведены в табл. 3.2.

1983 – 1986 гг. Приток подземных вод в неогеновые пески с правого склона б. Встречная составляет 370,0 м<sup>3</sup>/сут. Уровень подземных вод неогеновых песков на контуре их разгрузки увеличен до 60 м. Инфильтрационное питание за счет техногенных утечек на застраиваемых участках возрастает до 100 – 200 мм/год, а на отдельных участках – до 350 – 500 мм/год, на незастроенной территории составляет 30 – 75 мм/год. Суммарная величина инфильтрационного питания на этот период 741,7 м<sup>3</sup>/сут. Уровни в 1986 г. находились на отметках 88,1 – 135,4 м (слой 1) и 60,0 – 74,7 м (слой 2). Прирост уровня грунтовых вод с 1974 г. до 1986 г. составляет до 17,9 м в верхнем слое и до 12,5 м – нижнем. Скорость подъема уровня грунтовых вод за этот период достигает в центральной части жилого массива 3,65 м/год.

Таблица 3.9 – Сводный баланс модели на период до 1982 года

Приходные элементы баланса	м <sup>3</sup> /сут			Расходные элементы баланса	м <sup>3</sup> /сут		
	До за- стройки	1977	1982		До застрой- ки	1977	1982
<b>Слой 1</b>							
Суммарное инфильтрационное питание	71,2	273,1	369,7	Переток в неогеновые пески	93,3	95,1	123,4
Приток на внешнем контуре	44,3	48,9	48,4	Разгрузка в ручей б. Тополиная	11,3	11,9	1,9
				Испарение	9,1	9,7	18,0
				Высачивание	0,6	4,0	19,9
				Емкостная составляющая	1,1	201,2	254,3
<b>Всего</b>	<b>115,5</b>	<b>322</b>	<b>418,1</b>	<b>Всего</b>	<b>115,4</b>	<b>321,9</b>	<b>417,5</b>
<b>Слой 2</b>							
Переток через кровлю	93,3	95,1	123,4	Разгрузка на внешнем контуре (на востоке)	92,1	92,4	17,2
Емкостная составляющая	0	0	0	Емкостная составляющая	1,3	210	328,3
Приток с правого склона б. Встречная	–	168,0	180,0		–	–	–
Приток с левого склона б. Тополиная	–	39,2	42,0		–	–	–
<b>Всего</b>	<b>93,3</b>	<b>302,3</b>	<b>345,4</b>	<b>Всего</b>	<b>93,49</b>	<b>302,4</b>	<b>345,5</b>

*1987 – 1989 гг.* Приток подземных вод в неогеновые пески с правого склона б. Встречной 444 м<sup>3</sup>/сут. Уровень подземных вод неогеновых песков на контуре их разгрузки увеличен до 62 м. В данный период времени практически завершена застройка территории. Инфильтрационное питание продолжает расти и достигает 841,8 м<sup>3</sup>/сут, в отдельных зонах – 30 – 500 мм/год (преимущественно 100 – 300 мм/год). На карте гидроизогипс по состоянию на 1989 г. видно, что абсолютные отметки уровня изменяются от 90,0 до 140, м (рис. 3.12). Прирост уровня грунтовых вод с 1974 г. по 1989 г. составляет 21,5 м (расчетный слой 1) и до 16,2 м (расчетный слой 2).

Подъем уровня грунтовых вод за период 1987 – 1989 гг. составляет 3,6 м/год и 0,6 м/год, соответственно в первом и втором расчетных слоях. Баланс подземных вод на 1989 г. приведен в табл. 3.10. Соответствие реакции модели и геотехнического состояния среды подтверждено графиками рассеяния на рис. 3.13, где видно достаточно тесная корреляционная связь между фактическими данными и данными, полученными на модели.

*1990 – 1991 гг.* Приток подземных вод в неогеновые пески с правого склона б. Встречная задан в размере 518,0 м<sup>3</sup>/сут. Уровень подземных вод неогеновых песков на контуре их разгрузки увеличен до 64 м, величина суммарной инфильтрации – 1011,5 м<sup>3</sup>/сут. К концу периода на большей части территории зафиксирована стабилизация уровня грунтовых вод преимущественно на глубине 4 – 5 м. Составляющие баланса подземных вод на 1991 г. приведены в таблице 3.10. Достаточно высокая корреляционная связь результатов моделирования уровня поверхности и фактических данных подтверждается графиком на рис. 3.13.

*1992 – 1995 гг.* Уровень подземных вод неогеновых песков на контуре разгрузки увеличен до 70 м. Суммарное инфильтрационное питание уменьшено до 791,5 м<sup>3</sup>/сут. Несмотря на уменьшение величины суммарной инфильтрации, положение уровня грунтовых вод практически не изменяется, а уровенная поверхность подземных вод неогеновых песков продолжает расти. Абсолютные отметки уровня в 1995 г. составили 89,8-144,0 м (слой 1) и 70,0-84,6 м (слой 2).

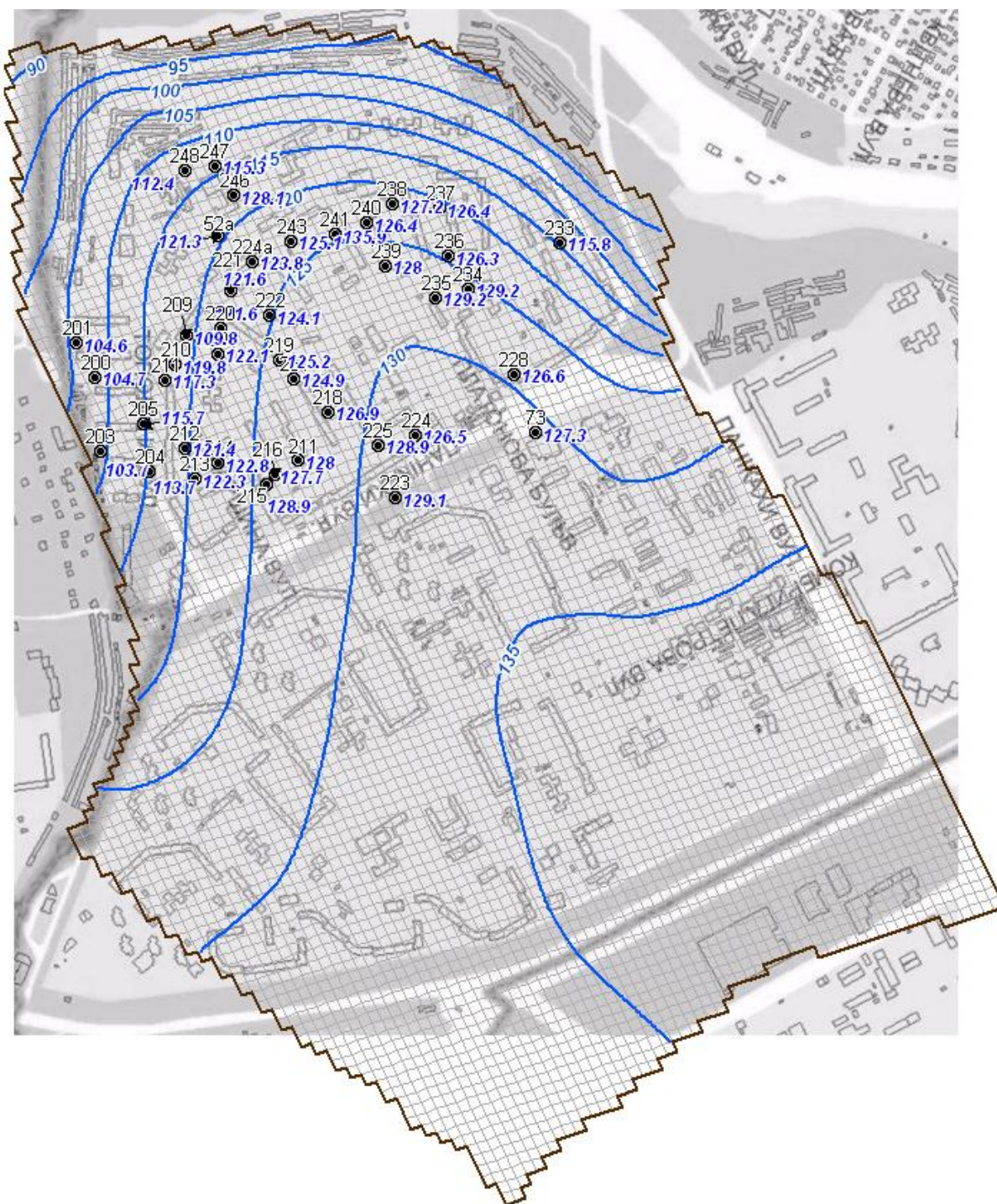


Рисунок 3.12 – Карта гидроизогипс (абс. отм., м) первого от поверхности водоносного горизонта состоянию на 1989 г.

1996 – 1997 гг. Приток подземных вод в неогеновые пески с правого склона б. Встречная  $420,0 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Уровень подземных вод неогеновых песков на контуре разгрузки –  $74,6 \text{ м}$ . Суммарное инфильтрационное питание –  $740$

м<sup>3</sup>/сут. Как и на предыдущий период его максимальное значение приурочено к территории ж/м “Тополь-2” между ул. Паникахи и Тополия (250 – 500 мм/год), при этом инфильтрационное питания вдоль водонесущих коммуникаций составляет 400 – 500 мм/год. Инфильтрация на территории ж/м “Тополь-3” значительно меньше – 100 – 200 мм/год. Составляющие баланса грунтовых вод представлены в таблице 3.10.

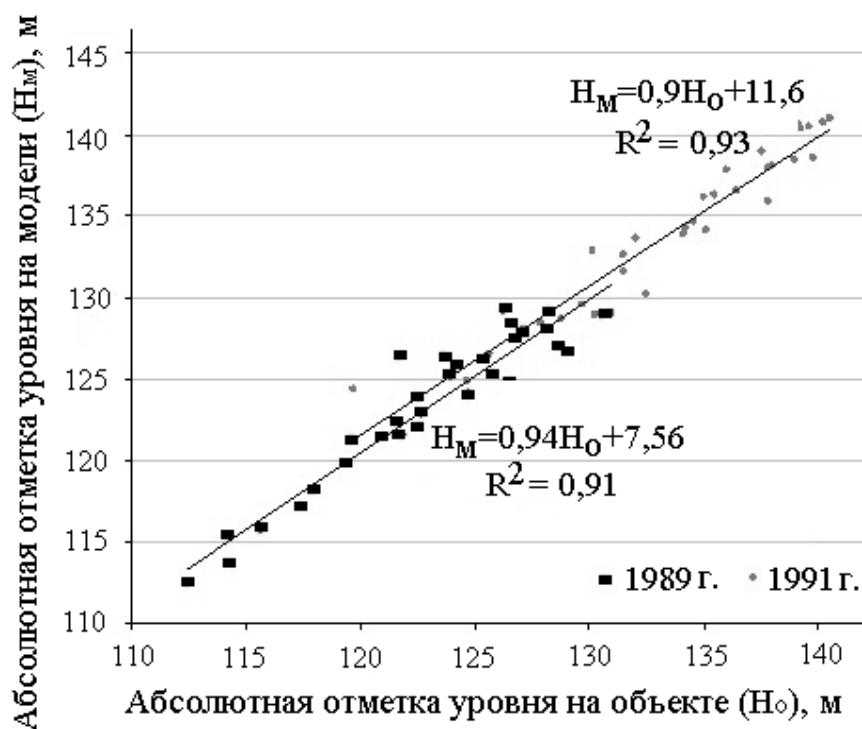


Рисунок 3.13 – Связь результатов моделирования уровенной поверхности и фактических данных по состоянию на 1989 и 1991 гг.

Уровень подземных вод неогеновых песков повышается. Абсолютные отметки составляют 90,1 – 144,1 м и 74,6 – 86,3 м, соответственно, в грунтовом и неогеновом водоносных горизонтах.

Тесная корреляционная связь между данными режимных наблюдений и отметками уровня на модели свидетельствуют об адекватности реакции модели на определенные изменения в геологической среде (рис. 3.14).



Таблица 3.10 – Баланс грунтовых вод на период до 1997 г.

Приходные элементы баланса	м <sup>3</sup> /сут			Расходные элементы баланса	м <sup>3</sup> /сут		
	1989	1991	1997		1989	1991	1997
<b>Слой 1</b>							
Суммарное инфильтрационное питание	841,8	1011,5	740	Переток в неогеновые пески	216,4	215,7	190,3
Приток на внешнем контуре	23,4	23,9	19,3	Разгрузка в ручей б. Тополиная	6,6	6,5	8,5
				Испарение	80,7	87,6	114,4
				Высачивание	324,3	366,5	456,5
Емкостная составляющая		0,3	20,8	Емкостная составляющая	237,4	358,6	10,3
<b>Всего</b>	<b>865,2</b>	<b>1035,7</b>	<b>880,1</b>	<b>Всего</b>	<b>865,4</b>	<b>1034,9</b>	<b>880,0</b>
<b>Слой 2</b>							
Переток через кровлю	216,4	215,7	190,3	Разгрузка на внешнем контуре (на востоке)	91,8	111,8	53,8
Емкостная составляющая				Емкостная составляющая	567,6	619,9	654,5
Приток с правого склона б. Встречная	360,0	420,0	420,0				
Приток с левого склона б. Тополиной	84,0	98,0	98,0				
<b>Всего</b>	<b>660,4</b>	<b>733,7</b>	<b>708,3</b>	<b>Всего</b>	<b>659,4</b>	<b>731,7</b>	<b>708,3</b>

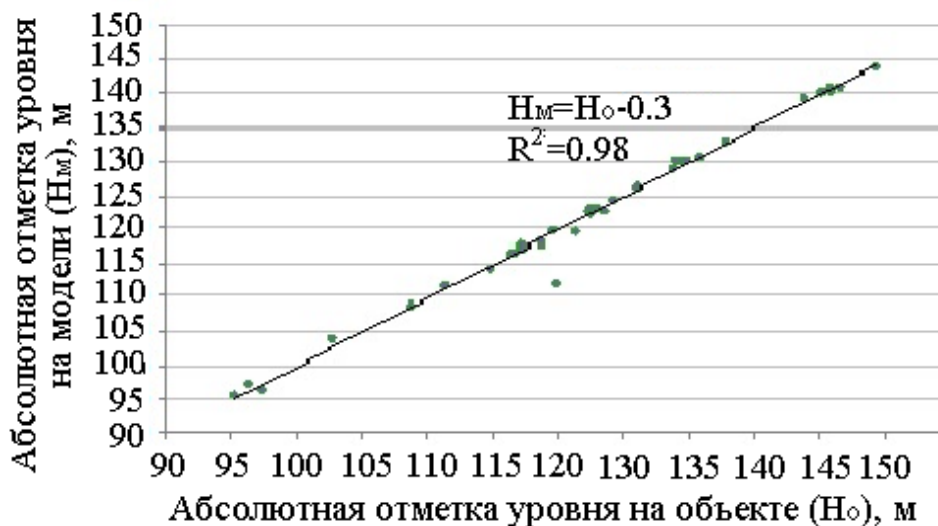


Рисунок 3.14 – Зависимость положения уровня грунтовых вод на модели и объекте по состоянию на 1997 г.

На период 1997 г. водопроницаемость водоносного горизонта четвертичных отложений составляет  $2,2 - 5,0 \text{ м}^2/\text{сут}$ , в тальвеге балок –  $0,3 - 2,5 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Уровень грунтовых вод зафиксирован на глубине 4 – 5 м на территории ж/м “Тополь-2”, 9 – 13 м – вдоль Запорожского шоссе; 3-9 м (преимущественно 4 – 5 м) – на территории ж/м “Тополь-3”; 0 – 2 м – в тальвеге б. Встречная и отроге вдоль ул. Паникахи – путепровод, а также в тальвеге б. Тополиная, 2 – 16 м – на склоне б. Встречная, 2 – 4 м – на склоне б. Тополиная (рис. 3.15).

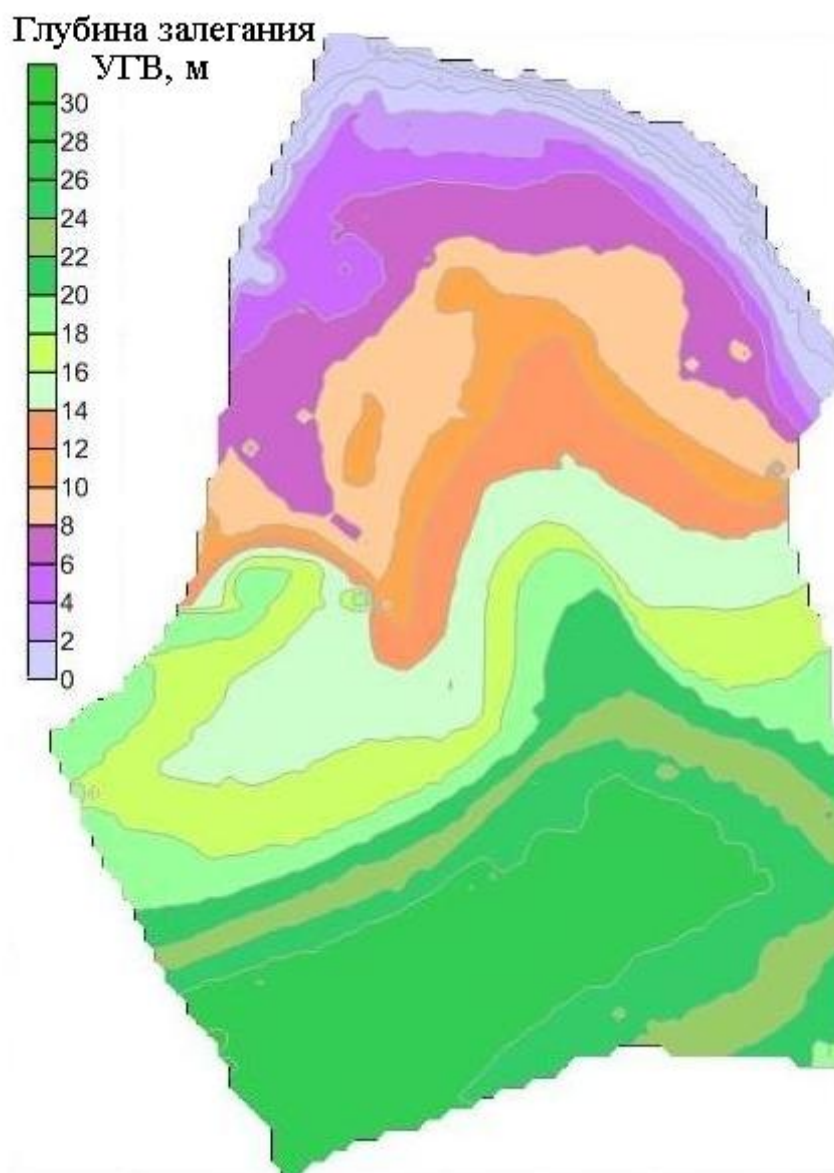


Рисунок 3.15 – Карта глубин залегания уровня грунтовых вод (м) по состоянию на 1997 год

Характеристика гидродинамического режима подземных вод на 1997 г. будет не полной без анализа ситуации, сложившейся на территории ж/м “Тополь-1”, поскольку жилые массивы “Тополь-1” и “Тополь-2” расположены на левом склоне балки Встречная, имеют аналогичные инженерно-геологические условия и находятся в рамках единой гидродинамической системы. Задачи, поставленные в данной работе, позволили разделить массивы по линии тока, но динамика поведения уровня подземных вод на территории исследований в последующий период 1997 – 2012 гг. определена реакцией массива на оползень в 1997 г. (ж/м “Тополь-1”) и проведенные инженерные мероприятия. В этой связи, следует кратко охарактеризовать условия, предшествовавшие нарушению геомеханической устойчивости склона в пределах ж/м “Тополь-1”.

При эксплуатации застроенной территории зафиксировано увеличение инфильтрационного питания грунтовых вод за счет утечек из подземных водонесущих сетей. Следствием локального замачивания лессовых просадочных грунтов стали различной степени деформации домов и сооружений жилого массива. В течение 10 – 15 лет с момента ввода в эксплуатацию микрорайонов зафиксированы трещины деформационного характера, нарушения отмосток вокруг них, провалы коммуникационных люков, влажность стен и вода в подвалах.

При воспроизведении на модели [100] гидродинамического режима, предшествовавшего оползню, инфильтрационное питание на участке канализации составило 800 мм/год.

В естественных условиях до застройки массива уровень грунтовых вод формировался на глубинах 19 – 23 м, а на июнь 1997 г. положение уровенной поверхности зафиксировано на глубине 4 – 6 м [7, 100]. Необходимо отметить особенности формирования уровенного режима грунтовых вод во времени по данным наиболее информативных скважин.

Скважина 141 (абс. отм. 142,6 м) расположена около водовода в 20-ти метрах от дома (ж/м “Тополь-1”). Наблюдения с 1985 по 1997 гг. велись с перерывами. В начале наблюдений уровень залегал на глубине 12,5 м (абс.отм. 130 м), на конец 1995 г. глубина до уровня составляла 6,5 м. Относительная стабиль-

лизация уровня поверхности зафиксирована в 1987, 1990, 1991 и 1993 гг., наибольший подъем уровня в 1995 г. – 2 м (рис. 3.16).

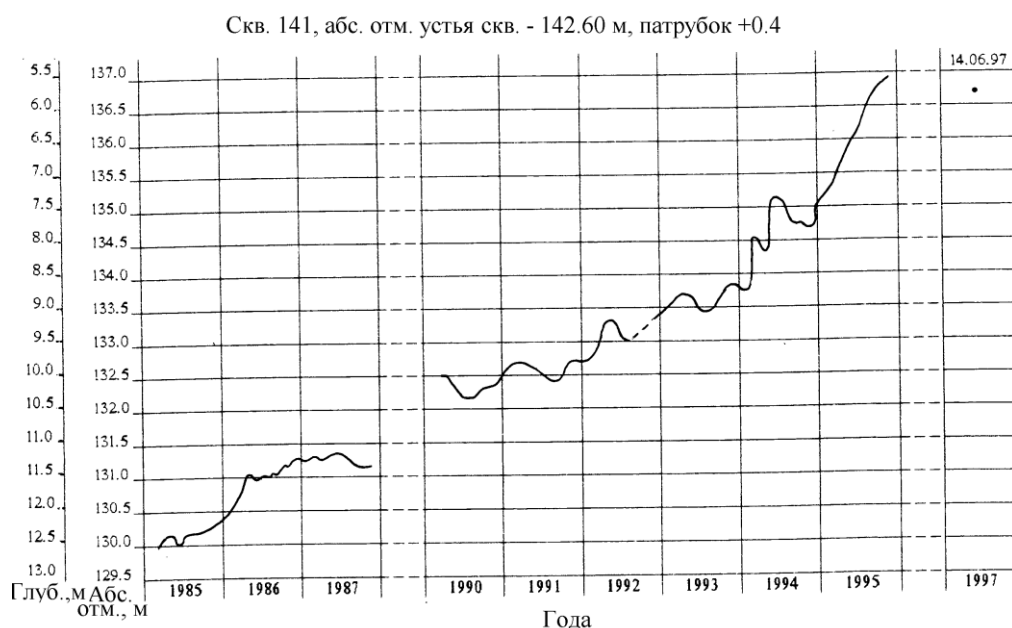


Рисунок 3.16 – Динамика формирования уровня грунтовых вод (скважина 141)

Скважина 8 (абс. отм. 144,2 м) находится около водовода, вблизи дома. За период наблюдений 1990 – 1995 гг. уровень подземных вод поднялся на 2,5 м. По данным инженерно-геологических изысканий в 1973 г. уровень зафиксирован на глубине 22,5 м (абс. отм. 121,3 м). На конец 1995 г. и 14.06.97 глубина до уровня составляла 5,7 м (рис. 3.17).

Скважина 139 (абс. отм. 129,3 м) расположена на ж/м “Тополь-2” (рис. 3.18). За период наблюдений 1985 – 1987 гг. глубина до уровня уменьшилась с 13,5 до 7 м. Наиболее интенсивный подъем уровня до 4,5 м зафиксирован в 1987 г.

Приведенные данные подтверждают, что динамика формирования уровня поверхности подземных вод (1973 – 1997 гг.) на ж/м “Тополь-1” и “Тополь-2”, имеет общие тенденции – наблюдается скачкообразное повышение уровня. Однако интенсивность подъема уровня на различных объектах достаточно сильно отличается, что свидетельствует о влиянии на процесс техногенной составляющей.

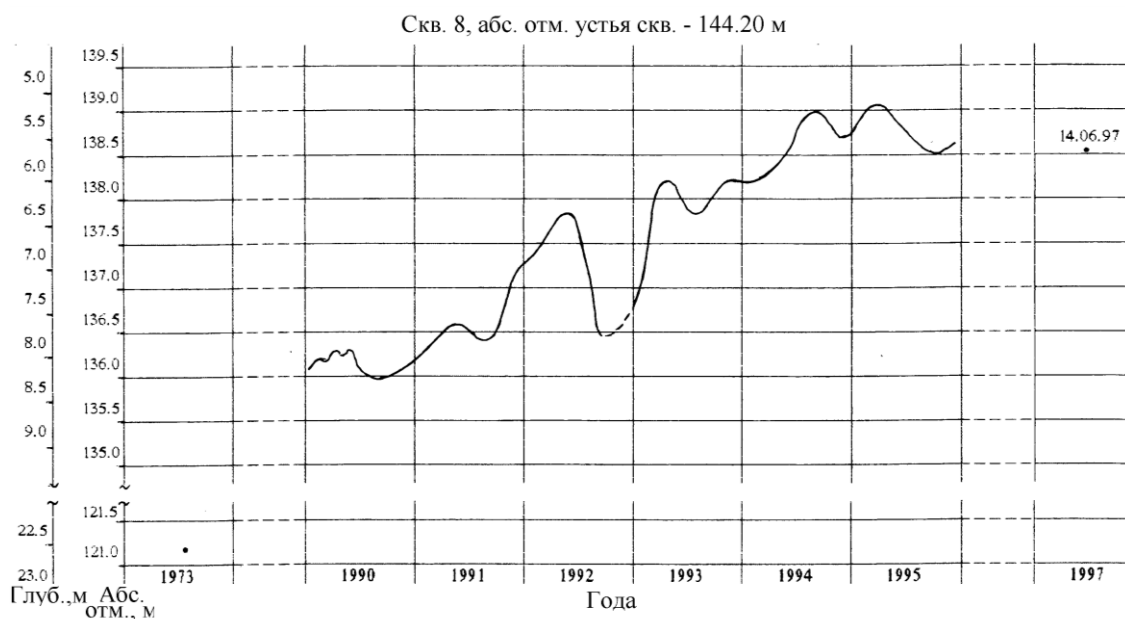


Рисунок 3.17 – Изменения положения уровня грунтовых вод (скважина 8)

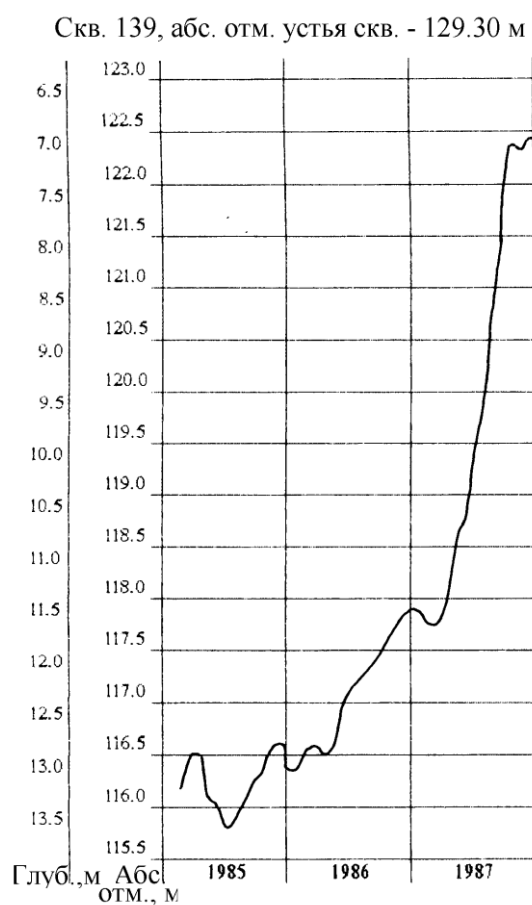


Рисунок 3.18 – График изменения уровня подземных вод (скважина 139)

Особо следует отметить реакцию уровенной поверхности подземных вод на оползень, произошедший 5 июня 1997 г. По данным режимных наблюдений

в скважинах “ДнепроГИИНТИЗ” [99], расположенных возле борта оползня, уже в ближайшее время наблюдалось снижение уровня подземных вод от 0,8 до 1,85 м (табл. 3.11).

Таблица 3.11 – Результаты режимных наблюдений постоползневоего периода

№ скважины	Абсолютная отметка устья скважины, м	Глубина до уровня грунтовых вод, м						
		07.06.97	19.06.97	20.06.97	23.06.97	02.07.97	4.07.97	14.07.97
1	141,90	5,00	5,35	5,4	5,45	5,61	5,72	5,82
2	–	–	5,30	5,35	5,40	5,68	5,82	5,86
3	–	5,00	5,60	5,70	5,80	6,06	6,16	6,29
4	140,50	5,00	6,85	6,90	6,90	7,09	7,24	7,24
5	139,30	4,70	4,15	4,20	4,15	4,30	4,45	4,51
6	141,25	5,00	5,50	5,60	5,60	5,75	5,87	5,97
7	137,20	4,50	5,50	5,60	5,65	5,87	5,95	6,05
8	138,50	–	–	6,65	6,50	6,88	6,95	7,10
9	131,75	–	–	1,70	1,95	2,11	2,05	2,55
10	–	–	–	0,95	1,45	1,61	1,52	2,80

## Выводы

1. Анализ гидрогеологических условий территории исследований свидетельствует о том, что жилые массивы “Тополь-1, 2, 3” приурочены к единой гидродинамической системе. Однако в данной работе массивы разделены по линии тока, где ж/м “Тополь-2 и 3” как неразрывная составляющая этой системы, являются сбалансированными в своих гидродинамических границах. Изменение режима подземных вод в пределах ж/м “Тополь-2” тесно связано с процессами, протекающими на смежной территории, и является реакцией на них, которая определена количественно.

2. В разрезе модель представлена двухслойной водоносной толщей, где первый расчетный слой отображает грунтовый водоносный горизонт четвертичных отложений, а второй – неогеновых песков. Водоносные горизонты имеют гидравлическую связь через разделяющий слабопроницаемый слой красно-бурых суглинков и глин. В плане фильтрационное поле представлено сеткой с шагом 20 м и содержит 5898 расчетных блоков. Гидродинамическая модель по физическому подобию соответствует объекту при параметрах:

– коэффициент фильтрации разделяющего слоя составляет преимущественно  $(1,8-2,8) \times 10^{-5}$  м/сут; в балке Встречной около ручья –  $(0,9-2,4) \times 10^{-4}$  м/сут и  $(3,2-4,0) \times 10^{-5}$  м/сут – в тальвеге; в балке Тополиной –  $(1,6-8,0) \times 10^{-5}$  м/сут (устье) и  $(0,3-1,6) \times 10^{-5}$  м/сут (верховье);

– коэффициент фильтрации водовмещающих четвертичных суглинков на водоразделе между балкой Тополиной и балкой вдоль путепровода – 0,1 м/сут, на остальной территории – 0,18–0,2 м/сут; для неогеновых песков – 1,6 м/сут;

– инфильтрационное питание составляет преимущественно 10–15 мм/год и 20 мм/год в тальвегах балок Встречная и Тополиная. Суммарная величина инфильтрационного питания –  $71,2 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Приток подземных вод со стороны смежных территорий –  $7 \text{ м}^3/\text{сут}$  с северо-востока и  $6 \text{ м}^3/\text{сут}$  с юго-востока;

– параметр взаимосвязи подземных вод с поверхностными в б. Встречной –  $0,6-5,1 \text{ м}^2/\text{сут}$ , в б. Тополиной –  $1,0-6,7 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

3. Решение вариантного ряда нестационарных обратных задач позволило сформировать полную ретроспективную картину формирования уровенного режима подземных вод, начиная с момента застройки территории (1973 г.), и сделать выводы относительно основных факторов его формирования.

4. Количественно оценены природная и техногенная составляющие водного баланса. Поле природного инфильтрационного питания, где инфильтрация от атмосферных осадков изменяется от 10 до 65 мм/год, выделено с учетом глубины залегания уровня грунтовых вод. Техногенная составляющая инфильтрации (0 – 200 мм/год) тесно коррелирует с плотностью застройки и водонесущих коммуникаций. Величина техногенного питания в балансе водоносного горизонта четвертичных отложений составляет  $335,7 \text{ м}^3/\text{сут}$ , что почти втрое больше естественного ( $120,5 \text{ м}^3/\text{сут}$ ). Таким образом, основным фактором формирования уровенной поверхности грунтовых вод во времени является составляющая инфильтрационного питания, которая почти на 75% определяется техногенной инфильтрацией.

5. Моделированием установлены зоны с максимальными величинами техногенных утечек, приуроченные к магистральному водоводу в районе Запорожского шоссе и плотной застройке ж/м “Тополь-2”. Зонами повышенной инфильтрации являются также участки застройки, расположенные на крутом склоне балки Встречная.

## РАЗДЕЛ 4

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ  
УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕССОВЫХ ПОРОД И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ  
ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ЗАСТРОЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

**4.1. Гидродинамические изменения послеоползневого периода на ж/м “Тополь”**

В послеоползневом периоде проведены мероприятия, направленные на уменьшение техногенных утечек из водонесущих коммуникаций, а именно их ревизия с прокладкой новых трубопроводов, переоборудованием подземных сетей теплоснабжения на поверхностные, ремонт асфальтовых отмосток, инженерные мероприятия по защите территории от подтопления, способствовали тому, что в последующий период с 1997 по 2012 гг. в режиме подземных вод грунтового водоносного горизонта наблюдается инверсия.

На территории ж/м “Тополь-2, 3” в период 1997 – 2012 гг. по результатам моделирования, которые идентичны данным фактических наблюдений (рис. 4.1), наблюдается снижение уровня подземных вод четвертичных отложений (рис. 4.2 – 4.3) на всей территории, за исключением балок и их отрогов.

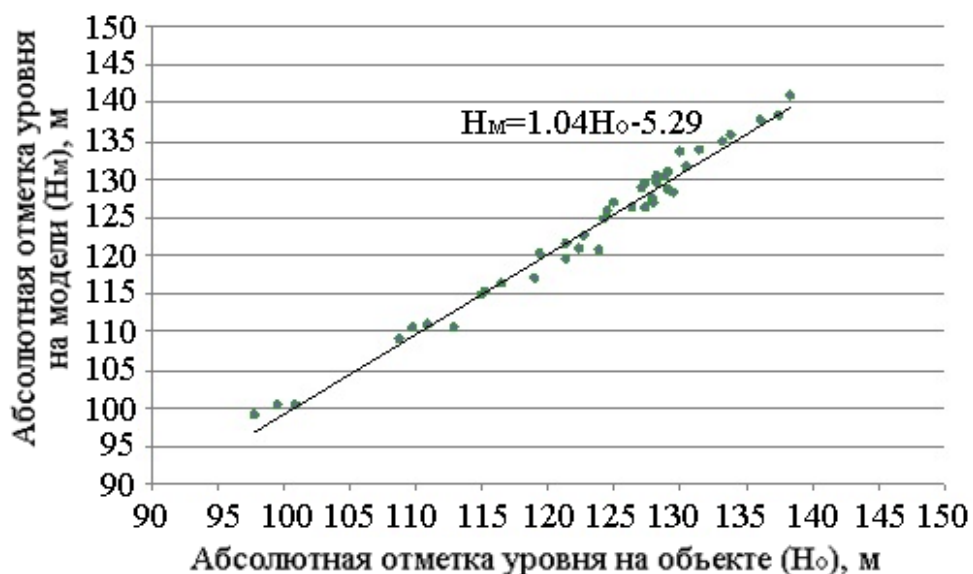


Рисунок 4.1 – Соответствие модели и объекта исследований по положению уровня подземных вод на 2012 г.



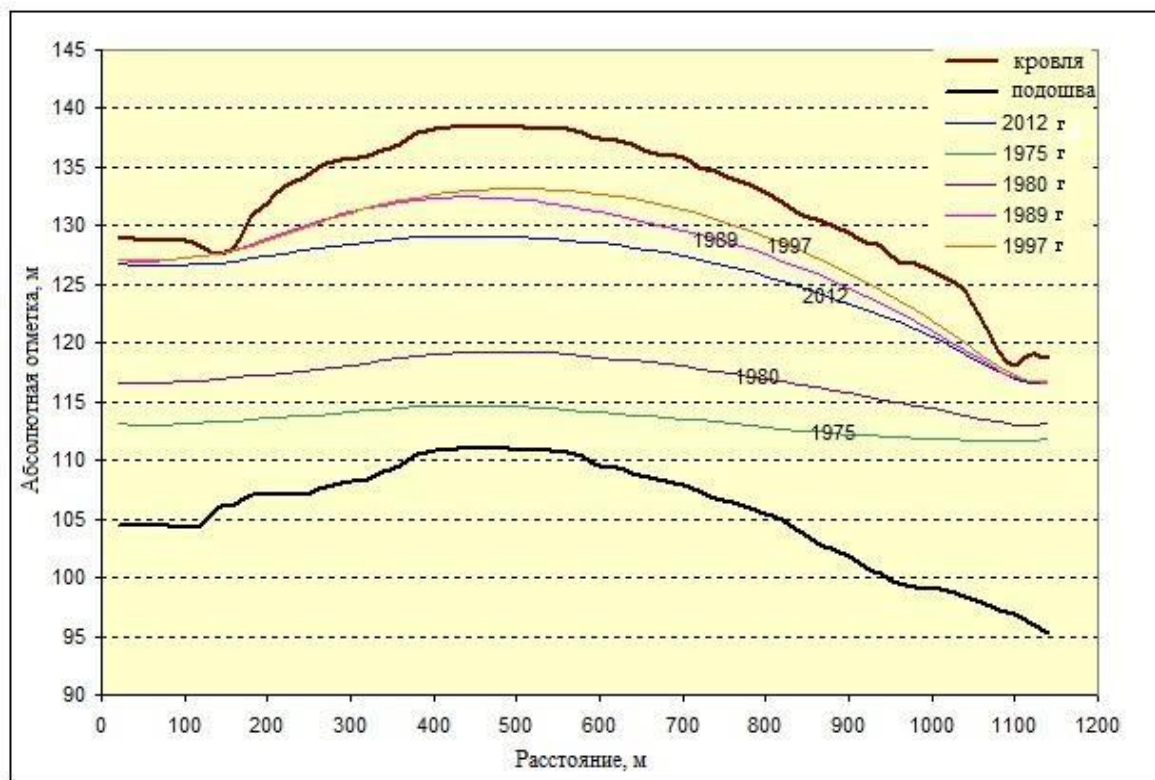


Рисунок 4.2 – Динамика уровенного режима подземных вод в многолетнем разрезе (линия разреза I – I' – с севера на юг по рис. 3.8)

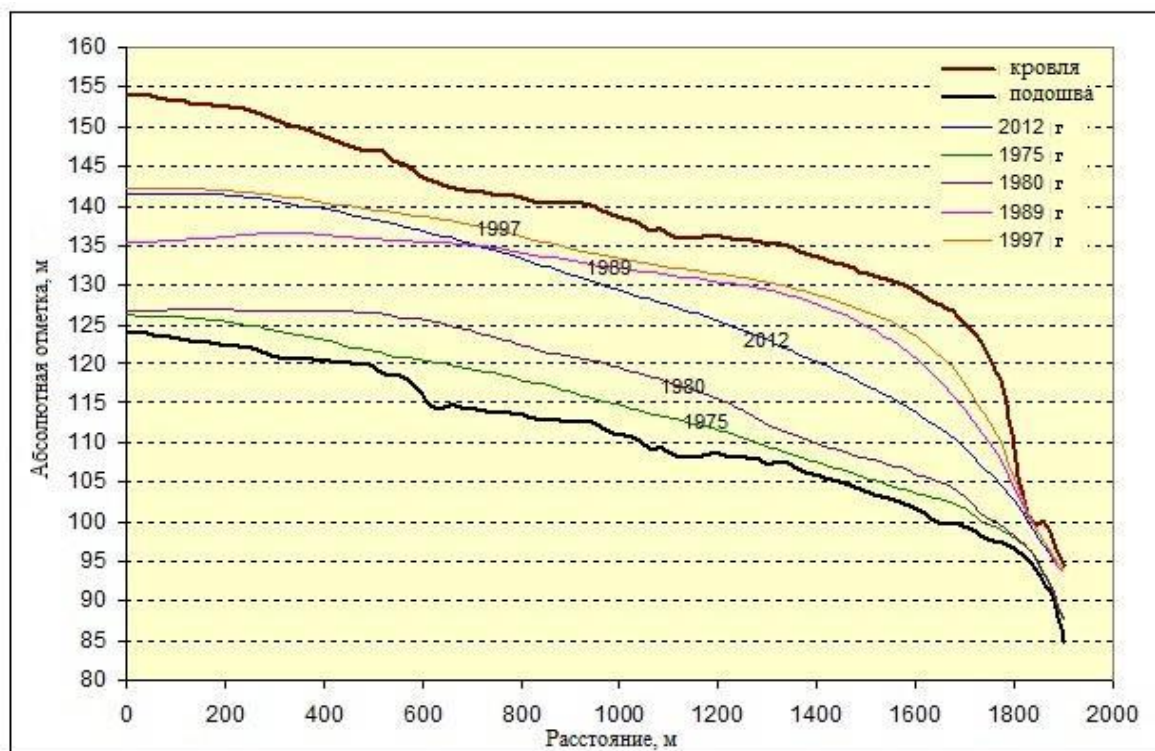


Рисунок 4.3 – Изменение уровенного режима подземных вод в многолетнем разрезе (линия разреза II – II' – с востока на запад по рис. 3.8)

Так в северной, северо-западной и западной частях ж/м “Тополь-2” уровень подземных вод понизился от 3,0 м до 9,0 м. При этом баланс модели в первом расчетном слое уменьшается почти вдвое за счет инфильтрационного питания, а во втором – увеличивается на 28% (табл. 4.1) за счет притока с правого склона б. Встречная, где расположены гидротехнические сооружения (аэротенки водоканала) и многочисленные промышленные объекты, а также перетока через кровлю водоносного горизонта в районе балок. Соответственно уровень неогенового водоносного горизонта в период с 1997 по 2012 гг. повышается на 6,0 м. Однако тенденция повышения уровня в неогеновых отложениях подтверждается лишь ограниченными данными отдельных наблюдательных скважин. Уровенная поверхность водоносного горизонта четвертичных и неогеновых отложений по состоянию на 2012 г. отражена на рис. 4.4.

Таблица 4.1 – Баланс подземных вод по состоянию на 2012 год

Приходные элементы баланса, м <sup>3</sup> /сут		Расходные элементы баланса, м <sup>3</sup> /сут	
<b>Слой 1</b>			
Естественное инфильтрационное питание	120,5	Переток в неогеновые пески	114,9
Техногенное инфильтрационное питание	335,7		
Переток через подошву	0,8	Разгрузка в ручей б. Тополиная	7,7
		Испарение	116,9
Емкостная составляющая	7,1	Высачивание	243,6
Приток на внешнем контуре	19,18	Емкостная составляющая	0,1
<b>Всего</b>	<b>483,28</b>	<b>Всего</b>	<b>483,2</b>
<b>Слой 2</b>			
Приток с правого склона б. Встречная	342	Разгрузка на внешнем контуре (на востоке)	518,0
	98		
Приток с левого склона б. Тополиная	114,9	Переток через кровлю	0,8
		Емкостная составляющая	35,5
<b>Всего</b>	<b>554,9</b>	<b>Всего</b>	<b>554,3</b>

По результатам фактических наблюдений и моделирования зона с максимальными глубинами залегания уровня подземных вод четвертичных отложений – до 16 м находится в юго-западной части ж/м “Тополь-2”, что связано с

особенностями рельефа территории, а минимальные значения глубин до 5 м зафиксированы в пределах балок и ее отрогов.

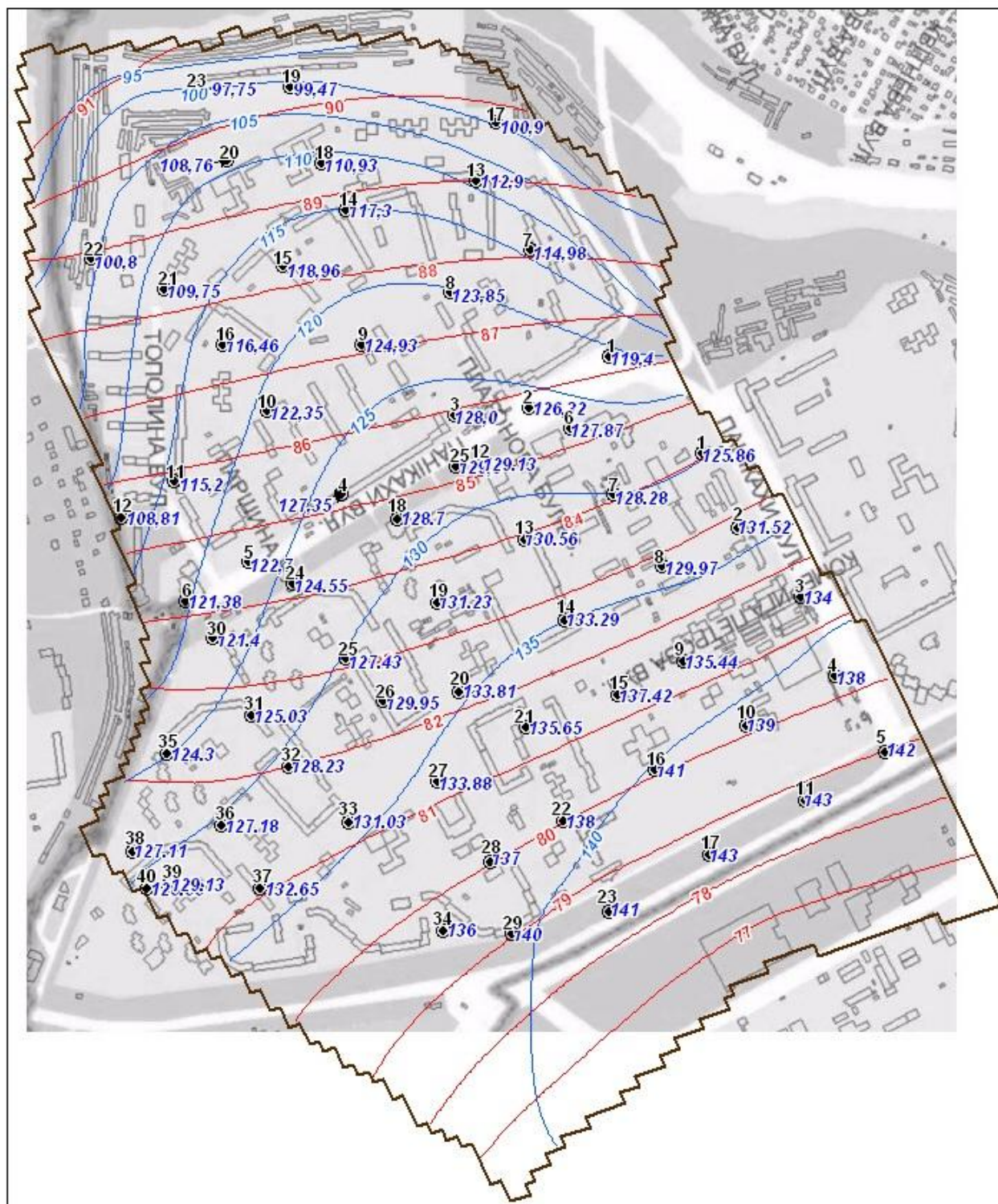


Рисунок 4.4 – Уровневая поверхность подземных вод грунтового и неогенового водоносных горизонтов (абс. отм., м) по состоянию на 2012 г



Для целостного восприятия картины формирования гидродинамического режима подземных вод исследуемой территории по состоянию на 2012 г. особое внимание следует уделить количественной оценке природных и техногенных составляющих водного баланса.

Поле инфильтрационного питания, где естественная составляющая от инфильтрации атмосферных осадков изменяется от 10 до 65 мм/год, а техногенная от 0 до 200 мм/год, представлено на рис. 4.5.

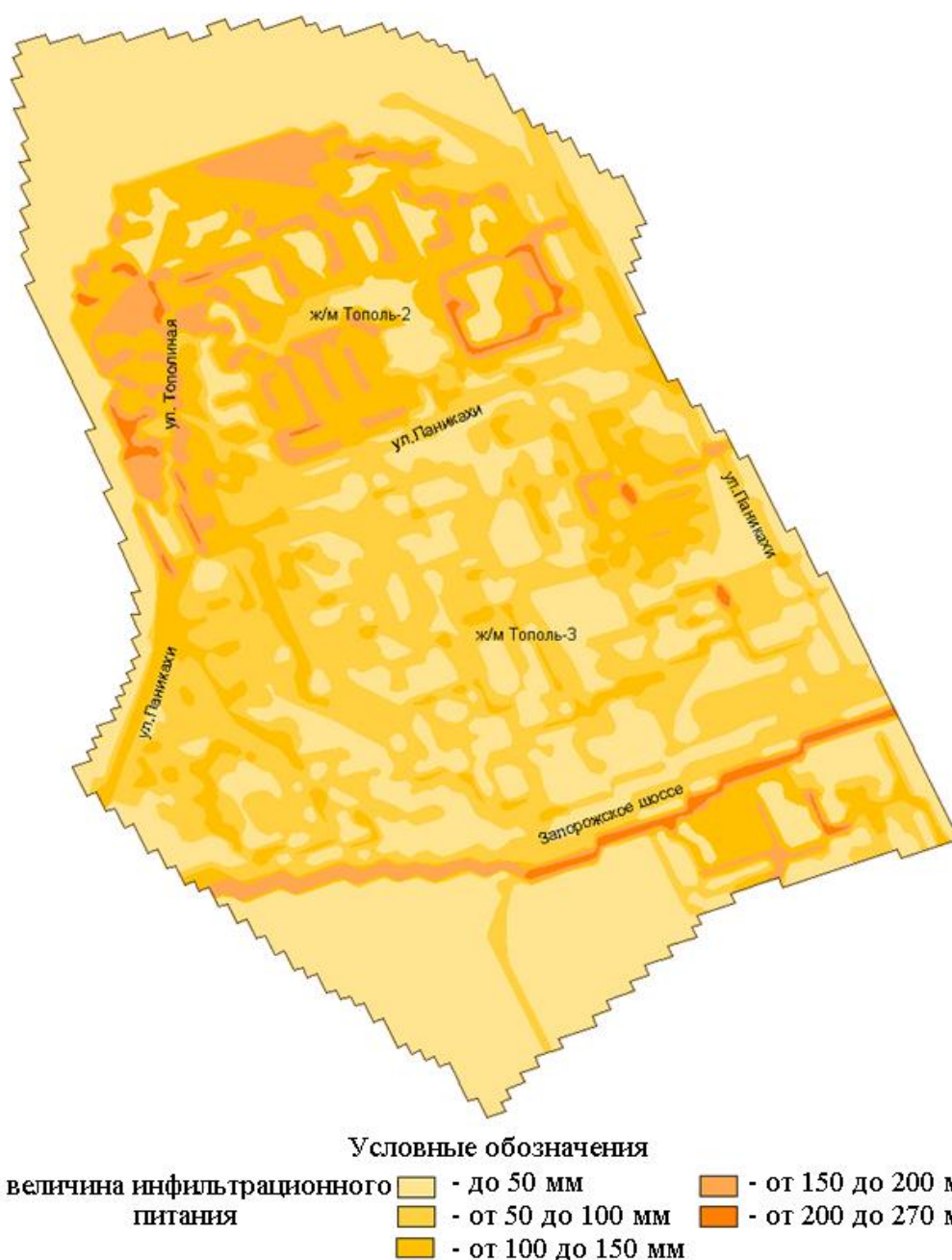


Рисунок 4.5 – Распределение инфильтрационного питания в пределах ж/м “Тополь-2 и 3”

Доля естественной составляющей инфильтрации от атмосферных осадков выделена с учетом глубины залегания уровня грунтовых вод (см. п. 3.1). Техногенная составляющая отражает плотность застройки и водонесущих коммуникаций, нормативные утечки в зависимости от диаметра, материала и режима работы сетей. Корректировка модели в процессе решения обратных задач позволила установить зоны с максимальными величинами техногенных утечек, обозначенные на рис. 4.6 соответствующей штриховкой. Они приурочены к магистральному водоводу в районе Запорожского шоссе и участкам плотной застройки ж/м “Тополь-2”.

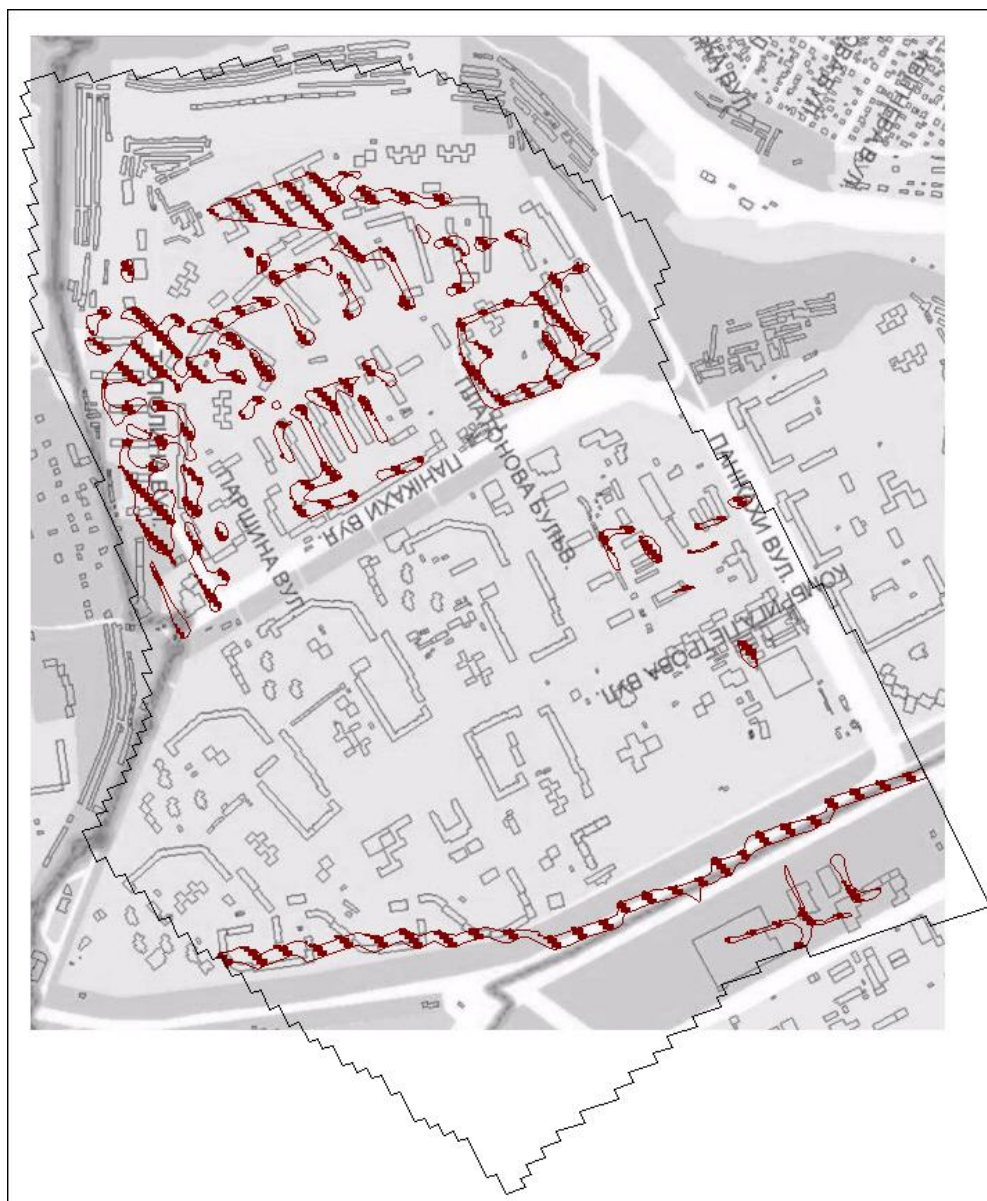


Рисунок 4.6 – Зоны техногенного питания с величиной инфильтрации 150 – 270 мм/год

При этом величина техногенного питания в балансе водоносного горизонта четвертичных отложений (табл. 3.11) составляет 335,7 м<sup>3</sup>/сут, что почти втрое больше естественного (120,5 м<sup>3</sup>/сут).

Полученные в процессе решения идентификационных обратных задач результаты по формированию уровенной поверхности во времени, свидетельствуют об адекватности модели и объекта исследований, что позволяет обоснованно перейти к выполнению прогнозных расчетов.

#### **4.2. Прогнозные гидродинамические решения задач на объекте исследований**

Результаты эпигнозного моделирования по воссозданию динамики уровенной поверхности подземных вод позволили установить, что основным фактором формирования ее во времени является составляющая инфильтрационного питания, которая на 75% определяется техногенной инфильтрацией. При этом достичь фактической интенсивности подъема или снижения уровня подземных вод на модели удалось введением переменной величины инфильтрации. Так как при постоянной во времени величине инфильтрации гидродинамический режим за три года переходит в стационарный и темпы роста (с 1973 по 1997 гг.) или снижения (с 1997 по 2012 гг.) уровня на модели не соответствует фактическому. Это свидетельствует о том, что тенденции в изменении уровенного режима подземных вод, учитывая сезонные колебания, обусловлены приращением инфильтрационного питания.

Прогнозные расчеты в условиях сохранения величины инфильтрационного питания (*вариант 1*), установленной на 2012 г., свидетельствуют о стабилизации положения уровенной поверхности подземных вод, как в краткосрочном, так и долгосрочном периоде. Это наиболее благоприятный вариант для эксплуатации жилых массивов и гидрогеомеханической устойчивости грунтового склона. Однако опыт эксплуатации подземных водонесущих коммуникаций во времени, результаты предыдущих исследований по моделированию гидродинамического режима [100] и данные режимных наблюдений подтверждают [7, 8, 99] необходимость решения прогнозных задач в пессимистической постанов-



ке, когда без проведения специальных профилактических и восстановительных мероприятий по эксплуатации подземных сетей, инфильтрационное питание растет наряду с его интенсивностью.

Поэтому один из вариантов прогнозных решений (*вариант 2*) предусматривает развитие ситуации, сопровождающееся ростом поля инфильтрационного питания на 70% в ближайшие 10 лет. Результат решения по варианту 2 – повышение уровня подземных вод от 2,1 м до 2,6 м (рис. 4.7 – 4.8).



Рисунок 4.7 – Подъем уровня подземных вод (м) четвертичного водоносного горизонта на период до 2022 г. (вариант 2)

Характер гидроизогипс четвертичного и неогенового водоносных горизонтов сохраняется на 2022 г. (рис. 4.9). Однако отдельно следует остановиться на динамике формирования уровенного режима нижнего неогенового водоносного горизонта.

Тенденция подъема уровня зафиксирована как в настоящее время (2012 г.), когда наблюдается инверсия потока в первом расчетном слое, так и на период потенциального подъема уровня грунтовых вод (вариант 2). Это объясняется тем, что питание водоносного горизонта неогеновых отложений происходит не только за счет перетока из верхнего горизонта, но и непосредственно на участках размыва водоупора в балках, а также с правого склона б. Встречная, где расположены многочисленные техногенные объекты.

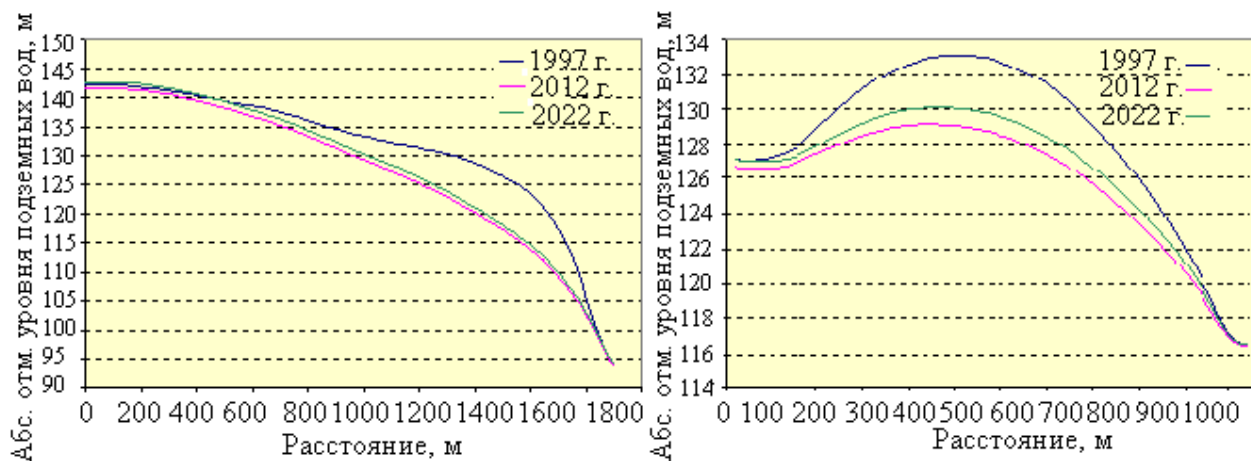
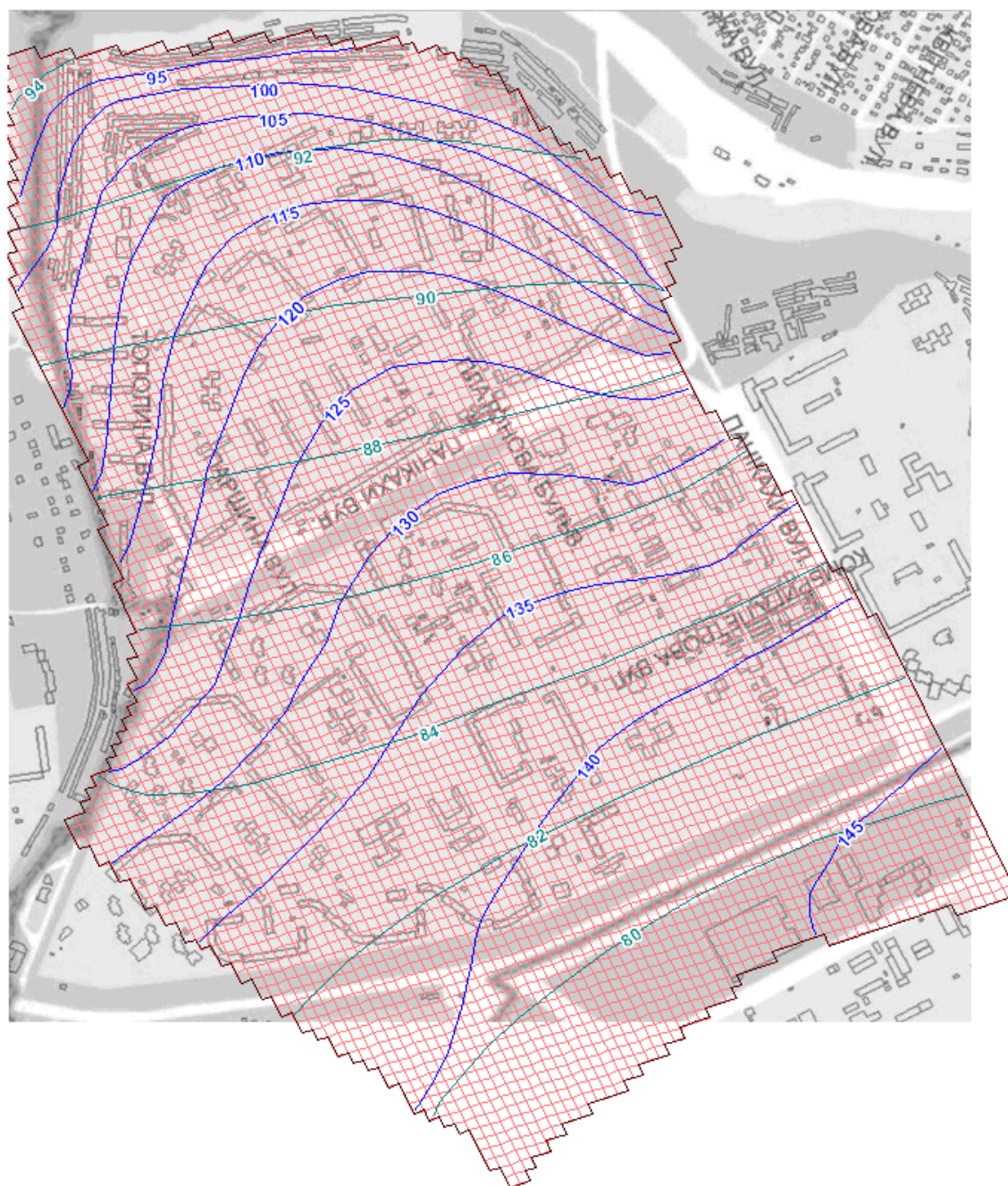


Рисунок 4.8 – Изменения уровенного режима подземных вод грунтового водоносного горизонта во времени (вариант 2)

Поэтому следующий вариант прогнозных решений (*вариант 3*) рассматривает возможность интенсивного подъема уровня во втором расчетном слое за счет питания в балке. Результаты расчетов показывают, что при повышении уровня в неогеновых отложениях, уровенный режим четвертичного горизонта на большей части территории не претерпевает существенных изменений. Это подтверждает вывод относительно определяющей роли инфильтрационного питания в формировании уровенного режима на территории исследований. При этом в балке и 100 метровой зоне ее склона изменяется направление перетока и



замедляется разгрузка подземных вод четвертичных отложений, что отрицательно влияет на устойчивость грунтового склона.



Условные обозначения

- - блоки модели      гидроизогипсы: 1-го расчетного слоя —  
— 2-го расчетного слоя

Рисунок 4.9 – Прогнозное положение уровня подземных вод на 2022 г. (вариант 2)

### **4.3. Определение потенциальных объектов развития оползневых процессов**

#### ***4.3.1. Оценка условий формирования и развития суффозионных процессов***

Поскольку суффозия как результат деятельности подземных вод является одной из причин активизации оползневых процессов, рассмотрим возможность ее развития в геолого-гидрогеологических условиях техногенно нагруженной территории ж/м “Тополь-2”.

Лессовые грунты, залегающие в геологическом разрезе исследуемой территории, по содержанию водорастворимых солей относятся к незасоленным. Поэтому вариант химической суффозии в данном случае не рассматривается.

Под механической суффозией понимают процесс выноса фильтрационным потоком мелких частиц грунта. При этом основными действующими силами, вызывающими суффозию, являются критические скорости движения фильтрационного потока и растущее гидродинамическое давление в фильтрационном потоке.

Развитие суффозионных процессов происходит в условиях:

- неоднородности породы, при которой возможно передвижение мелких частиц среди крупных (геометрический критерий);
- критических градиентов потока, вызывающих образование повышенных скоростей фильтрации воды или критической величины гидродинамического давления в породе (гидравлический критерий);
- наличия области выноса мелких частиц породы.

Сочетание этих условий определяет нарушение внутреннего равновесия в породе и неизбежности развития суффозии. Таким образом, в зависимости от геологической обстановки суффозия может развиваться:

- 1) в слое или толще неоднородных пород, имеющих критический гранулометрический состав;
- 2) на контакте двух различных по составу слоев;

3) на контакте породы с заполнителем фильтров, дренажей и других искусственных присыпок и засыпок, или на склонах, откосах.

Различают следующие виды суффозии [12, 116]:

1. Внутренняя суффозия. Протекает внутри несвязной рыхлой породы с кратковременным и коротким путем переноса.

2. Внешняя суффозия, выпор. Протекает на свободной поверхности независимо от направления фильтрационного потока и уклона поверхности.

3. Контактная суффозия, контактный размыв. Происходит в контактной зоне рыхлых пород различного состава.

Указанные виды суффозии могут развиваться только при соответствующем гидродинамическом давлении фильтрационного потока. Как показали исследования Н.М. Бочкова, О.М. Патрашова, В.С. Истоминой [66, 82], механическая суффозия развивается преимущественно в грунтах с коэффициентом неоднородности более 20 и гидравлическим градиентом более 5, то есть

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \geq 20, \quad I \geq 5, \quad (4.1)$$

где  $d_{60}$  – контролирующий диаметр частиц;  $d_{10}$  – действующий или эффективный диаметр частиц.

Суффозия на контакте двух слоев может происходить в том случае, если отношение коэффициентов фильтрации этих слоев более 2.

Большинство исследователей рассматривает вопрос механической суффозии только для несвязных грунтов. Однако практика показывает, что механическая суффозия при определенных условиях развивается и в мало связных грунтах (к последним можно отнести и лессовые супеси).

Лессовые грунты являются фильтрационно-анизотропными, т.е. в вертикальном направлении они более водопроницаемы, чем в горизонтальном. В связи с этим, движению воды в горизонтальном направлении оказывается большее сопротивление, чем в вертикальном. Однако в результате проведенных опытов доказана инверсия фильтрационной анизотропии присклоновых лессо-

вых массивов в сравнении с ее природным положением, что следует отнести к техногенным изменениям грунтовых массивов.

Гидродинамическое давление в фильтрационном потоке тем выше, чем ниже водопроницаемость грунтов. При значительных напорах гидродинамическое давление является причиной нарушения устойчивости откосов и склонов, вызывает переход пород в плавунное состояние, способствует развитию процессов суффозии и активизации оползней.

Несмотря на видимую ясность возникновения и развития механической суффозии, ее количественная оценка затруднена из-за недостаточной детализации процесса. Для определения, являются ли лессовые грунты суффозионными, по графикам зернового склада в полулогарифмическом масштабе [41] определены диаметры частиц (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Диаметры частиц грунта на участке исследований

№ ИГЭ	Диаметр частиц, с процентным весом 3, 10, 17, 50 и 60 %					Степень неоднородности, U	$d_3/d_{17}$	Пористость, д.ед.	N
	$d_3$	$d_{10}$	$d_{17}$	$d_{50}$	$d_{60}$				
3	0,0018	0,003	0,0064	0,022	0,028	8,28	0,281	0,51	0,670
3 <sup>a</sup>	0,0018	0,003	0,0061	0,021	0,026	8,23	0,295	0,47	0,569
4,4 <sup>a</sup>	0,0022	0,005	0,0120	0,026	0,030	5,45	0,183	0,44	0,424
5	0,0018	0,003	0,0058	0,024	0,034	12,01	0,310	0,45	0,634
6	0,0025	0,006	0,0110	0,024	0,030	5,15	0,227	0,42	0,311
7	0,0015	0,002	0,0033	0,020	0,027	12,34	0,455	0,41	0,546
8	0,0026	0,005	0,0097	0,023	0,027	5,14	0,268	0,43	0,398
9	0,0014	0,002	0,0028	0,018	0,036	19,62	0,500	0,41	0,713

Суффозионным считается грунт, для которого выполняется условие

$$d_3/d_{17} \leq N, \quad (4.2)$$

$$N = 0,32 \sqrt[6]{U} (1 + 0,05U)n / (1 - n), \quad (4.3)$$

где  $n$  – пористость грунта, д. ед.

Согласно выполненным расчетам грунты территории исследований относятся к суффозионным.

Однако при оценке и прогнозе развития процесса суффозии необходимо определять как скорость фильтрационного потока (скорость размыва), так и

градиент потока  $I$ , от которого зависит величина гидродинамического давления [84]

$$D_{ГД} = I \cdot \rho_v, \quad (4.4)$$

де  $\rho_v$  – удельный вес, 1,0 г/см<sup>3</sup>.

В таблице 4.3 представлен расчетный диаметр частиц в неоднородной породе, с выносом которых при соответствующей скорости потока начинается суффозия [66].

Таблица 4.3 – Скорость размыва подземного потока

Размер частиц, мм	5	3	1	0,8	0,5	0,3	0,1	0,08	0,05	0,03	0,01
Скорость размывания, м/мин	13,23	10,37	5,91	5,3	4,18	3,08	1,83	1,67	1,31	1,02	0,59

Начальную скорость фильтрационного потока (м/с), при которой начинается суффозия, определяют по формуле Зихарда [66]

$$V_{РАЗ} = \frac{\sqrt{K_\phi}}{15}, \quad (4.5)$$

где  $K_\phi$  – коэффициент фильтрации породы, м/с.

Для определения скорости выноса частиц двух смежных горизонтов используют зависимость Избаш-Козловой [84]

$$V_p = 0,26d_{60}^2 \left(1 + 1000 \frac{d_{60}^2}{D_{60}^2}\right), \quad (4.6)$$

где  $d_{60}$  и  $D_{60}$  – диаметры 60 % частиц соответствующих смежных горизонтов, мм. Формула (5.6) используется для однородных песков диаметром 0,088 – 0,5 мм и однородного по составу гравия с диаметром частиц от 2 – 3 до 12 – 15 мм.

Разрушение неоднородных песчаных пород происходит при градиентах [84]

формула Терцаги

$$I_p = (\rho_s - 1)(1 - n), \quad (4.7)$$

формула Замарина

$$I_p = (\rho_s - 1)(1 - n) + 0,5n, \quad (4.8)$$

где  $\rho_s$  – удельный вес минеральных частиц песка, г/см<sup>3</sup>;  $n$  – пористость песка, д. ед.

Для расчета критического гидродинамического давления используют также формулу Г.П. Квашина [84]

$$I_k = \rho_{sb} \operatorname{ctg} \varphi, \quad (4.9)$$

где  $\rho_{sb}$  – плотность грунта с учетом взвешивающего действия воды, г/см<sup>3</sup>,  $\varphi$  – угол внутреннего трения.

Возможность развития процесса суффозии определяют по графику Истоминой (рис. 4.10), из которого видно, что чем больше неоднородность грунта, тем меньше градиент, при котором начинается суффозия [66].

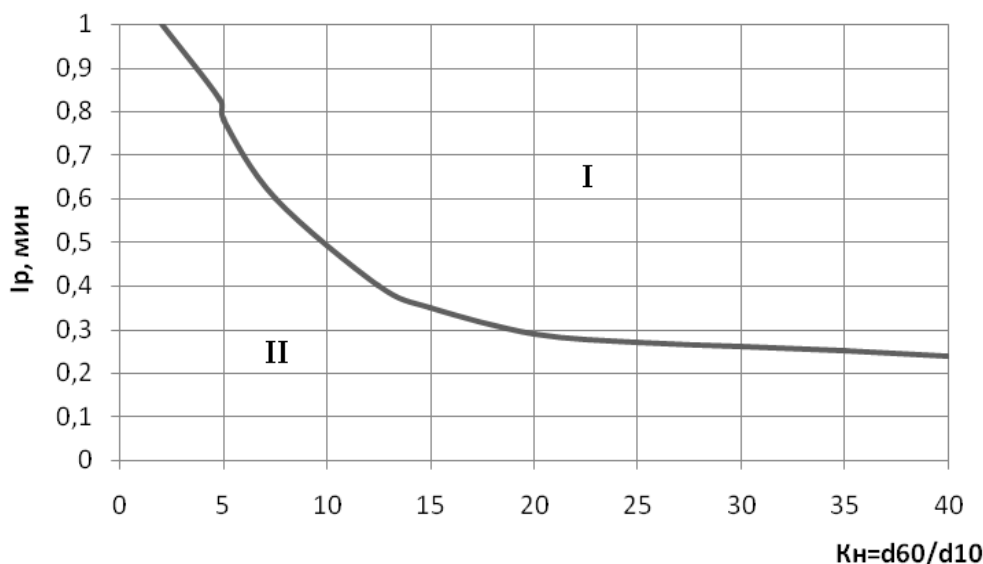


Рисунок 4.10 – График для оценки возможности развития суффозии: I – область разрушающих градиентов фильтрационного потока, II – область безопасных градиентов.

Значения критических гидравлических градиентов для лессов и лессовых суглинков, полученные по вышеприведенным формулам, представлены в таблице 4.4 [100].

Таблица 4.4 – Критические значения гидравлических градиентов ( $I_k$ )

№ ИГЭ	Величина $I_k$ , рассчитанная по зависимости		
	(4.7)	(4.8)	(4.9)
3	0,82	1,07	2,68
3 <sup>a</sup>	0,89	1,12	3,10
4	0,87	1,11	2,29
4 <sup>a</sup>	0,92	1,14	3,20
5	0,93	1,16	3,24
6	0,96	1,17	2,95
7	1,01	1,22	4,75
8	0,94	1,16	2,72
9	1,02	1,23	4,79

Величины критического гидравлического градиента, рассчитанные по формулам Терцаги (4.7) и Замарина (4.8), близки между собой. Расчеты по формуле (4.9) дают градиенты значительно выше, однако данная формула предполагает наличие критического динамического давления, возникающего на стенках стоковых поверхностей (стенках скважин), а в процессе, что рассматривается, соответствует поверхности глубинных эрозионных каналов, которые формируют начало оползня-течения.

#### ***4.3.2. Апробация методики оценки устойчивости склона ж/м “Тополь” с учетом гидродинамической обстановки***

На основе методического подхода (п.2.4) проведено моделирование оползневого склона, на котором произошел оползень в 1997 г. (ж/м Тополь). Цель состояла в оценке влияния деформационных нарушений в лессовых породах на устойчивость техногенно нагруженного склонового массива, а также количественная характеристика перехода массива в неустойчивое состояние (рис. 4.11).

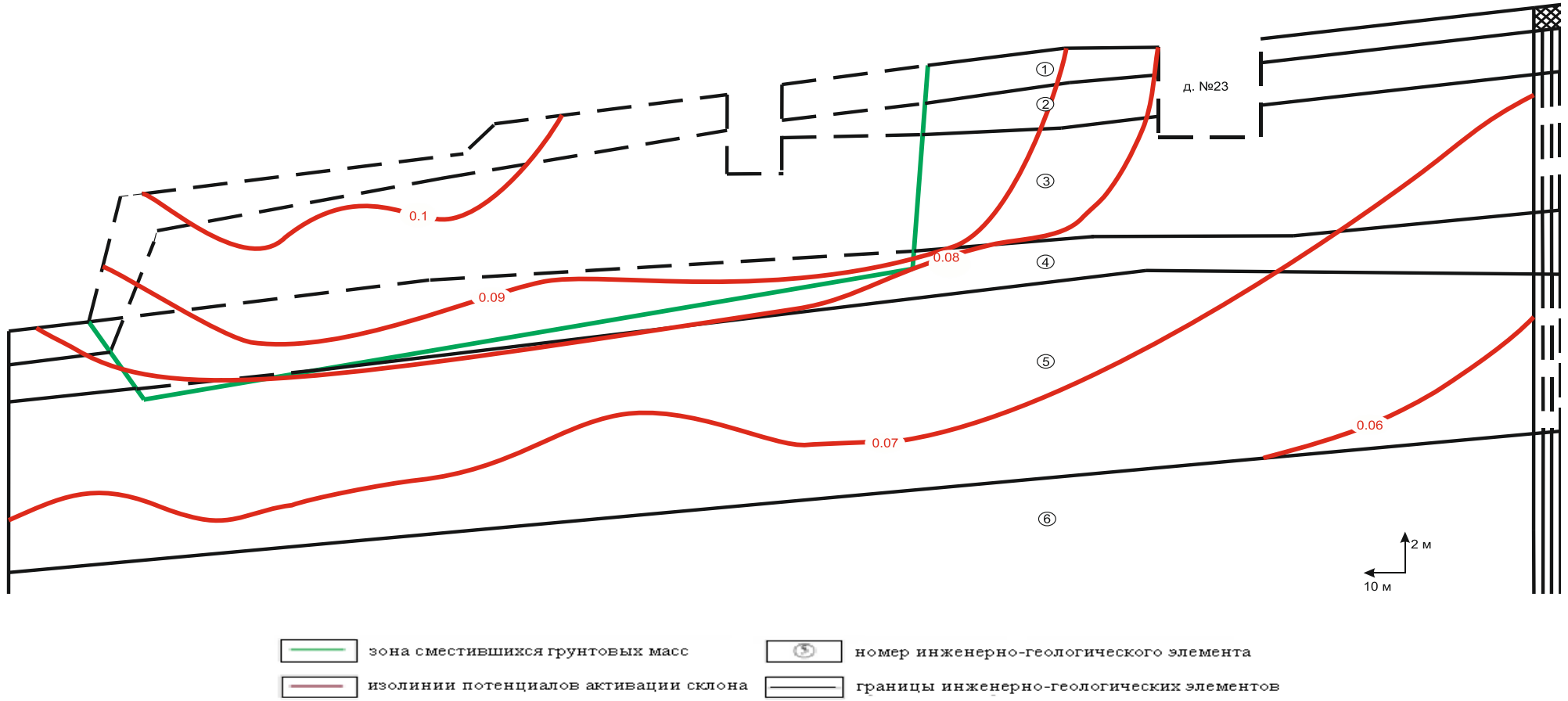


Рисунок 4.11 – Результаты моделирования оползневого склона на ж/м “Тополь”



Моделирование отражает состояние массива на момент, предшествующий оползневым процессам. Учтено поднятие уровня грунтовых вод. Данные о присутствии трещин и пустот в массиве, которые были образованы в грунте под действием техногенной фильтрации, учтены в виде зон с соответствующими значениями прочностных свойств пород (п. 2.4). По результатам моделирования выделены наиболее опасные зоны, которые располагались в пределах ИГЭ 3 и 4 – лессовые суглинки и супеси. Значения потенциала активации склона в стадии предоползневого состояния массива составило 0,08 – 0,09, что дает возможность выделить эти значения в качестве критического диапазона. Также было рассчитано значение градиента потенциала активации этих величин, которое составило 0,0014. Т.о. при этом значении в лессовом массиве активизируются оползневые процессы. Здесь нужно отметить, что классические схемы расчета устойчивости склонов (метод круглоцилиндрической поверхности скольжения, метод Шахунянца) характеризовали данный склон как устойчивый ( $K_y=1,2$ ). Результаты энергетической оценки подтверждаются данными об установленной инверсии фильтрационной анизотропии лессов в сравнении с ее природным положением, которая провоцируется техногенными изменениями грунтовых массивов. На данном объекте наблюдался переход суффозии в эрозию, что подтверждено опытами и реальными наблюдениями, в дальнейшем приведшей к формированию оползня течения (п 1.1).

На моделируемой площади ж/м “Тополь – 2, 3” (см. раздел 3, п. 3.3) склон находится в равновесном состоянии и предпосылок для его перехода в аварийную стадию в виде “оползня-течения” нет, хотя факторы, которые приближают этот процесс, существуют. Как показало рекогносцировочное обследование в 2013 г., на территории ж/м “Тополь-3” реализуются просадочные деформации оснований жилых зданий и сооружений (рис. 4.12 – 4.14).



Рисунок 4.12 – Городская детская поликлиника №1 г. Днепропетровска  
(ул. Паникахи, 53)

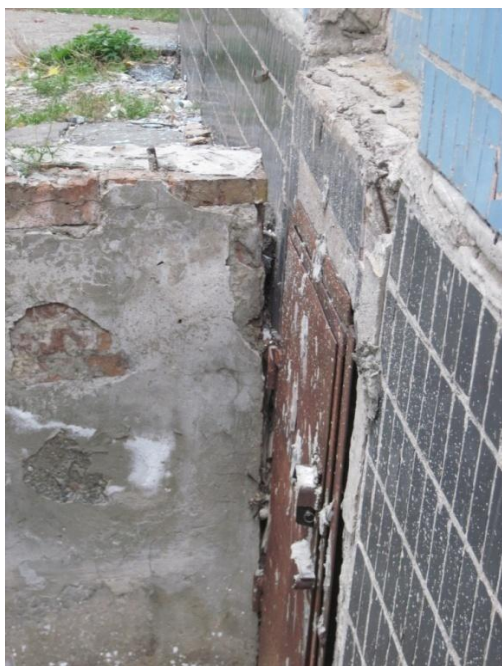


Рисунок 4.13 – 9-ти этажный жилой дом на ж/м Тополь-3

На основании анализа гидродинамической обстановки и зафиксированных данных о деформациях зданий типизированы зоны развития негативных геотехнических и физико-геологических процессов. Выделенные четыре типичные зоны характеризуются следующими условиями (рис. 4.15).





Рисунок 4.14 – Детский сад (ж/м “Тополь-3”)

*Первая зона.* Наблюдаются просадки грунтов, синхронное равномерное по площади повышение уровня подземных вод. Локализованные проседания поверхности совпадают с повреждениями водонесущих сетей и выбоин в асфальтовом покрытии механического повреждения. Состояние многоэтажных зданий и отмосток – удовлетворительное.



Рисунок 4.15 – Районирование территории по геотехническим и инженерно-геологическим условиям (контуром изображены границы зон)

*Вторая зона.* На фоне просадки грунтов, которая происходит синхронно равномерному повышению уровня подземных вод, наблюдаются более контрастные проседания поверхности в виде вертикального отрыва отмосток и лестниц к подъездам, воронок вокруг колодцев водонесущих сетей. В целом формируется волнообразный рельеф поверхности. В многоэтажных зданиях наблюдаются отслоения стенового покрытия, незначительные перекосы проемов

дверей. В целом значительных нарушений конструкций не отмечается. В сооружениях, имеющих конструктивные деформационные ленты, прослеживается их сезонная активизация. Кирпичные одноэтажные вспомогательные помещения (как правило, к зданию) повреждены трещинами с раскрытием до 5 ... 10 см.

*Третья зона* имеет все характерные проявления просадок и деформаций зданий, определяющих вторую зону, но их интенсивность увеличивается неравномерностью амплитуды просадок, которая обусловлена наличием насыпных грунтов в естественных оврагах, ликвидированных при застройке, и воронковидными понижениями в современном спланированном рельефе. Характерные деформационные повреждения зданий наиболее выразительны в местах контакта жестких конструктивных элементов и кирпичных стен с раскрытием трещин до 10 мм (отдельные до 20 мм) при сохранении удовлетворительного состояния сооружений.

*Четвертая зона* охватывает площадь грунтового склона с максимальными градиентами фильтрации в четвертичном водоносном горизонте (приповерхностный грунтовый горизонт). Глубина залегания уровня грунтовых вод существенно зависит от условий фильтрации к балкам Встречная и Тополиная, дополнительных источников техногенной инфильтрации из поврежденных ливневых сетей, наличия искусственных препятствий на пути поверхностного стока, а именно: а) гидравлического сопротивления засоренных и заиленных русел балок; б) искусственных воронкообразных понижений рельефа; в) бессточных оврагов и отрывов, искусственно формирующихся при ненадлежащей застройке гаражей. Контуры этой зоны определяются суммой двух составляющих: 1) расстоянием от тальвегов балок до подошвы склонов, 2) расстоянием от подошвы склонов до верхнего контура инфильтрационного питания в пределах 150 – 270 мм/год.

Проявления деформационных процессов в пределах зоны характеризуются удовлетворительным состоянием многоэтажных домов, умеренными проявлениями трещин вертикального отрыва и воронковидными проседаниями ас-



фальтового покрытия (что очевидно связано со значительными углами сточных поверхностей техногенного рельефа при неудовлетворительном состоянии технического водоотведения).

В зоне эксплуатируются два гаражных кооператива №11 и №8 с заглубленными фундаментами строений. Состояние их удовлетворительное, хотя наблюдаются стеновые трещины. Поверхностное водоотведение в кооперативах удовлетворительное. Противодействие сдвигающим силам оказывают заглубленные основы из фундаментных блоков и кирпичные наземные конструкции с железобетонным перекрытием (пример детального анализа инженерно-геологической ситуации в кооперативе № 11 приведен в приложении № 1).

Наиболее благоприятные условия для развития негативных процессов с деформациями формируются в случаях, когда здания расположены вблизи при-склоновых зон с воронкообразным накоплением поверхностного стока и его перехватом в искусственных оврагах и плоскостях отрыва грунта (см. приложение 1).

Четвертая зона рассматривается как наиболее опасная по развитию суффозии, переходу ее в глубинную эрозию и формированию оползня-течения.

#### ***4.3.3. Апробация методики оценки устойчивости склона по ул. Симферопольской (г. Днепрпетровск)***

Выбранный для моделирования жилой комплекс (ж/к), находится на правобережном террасированном склоне долины реки Днепр. Он состоит из двух жилых секций (одиннадцати и пятнадцатизэтажной) и паркинга. Основание до глубины 43,0 м представлено комплексом переслаивающихся лессовых супесей и суглинков, которые подстилаются песчаниками и скальными породами. Мощность просадочных грунтов превышает 31 м. Подземные воды представлены безнапорным водоносным горизонтом, залегающим на глубине 31,4 – 32,0 м. В насыпных грунтах на глубине 5,1 м отмечено наличие техногенного горизонта.

Вследствие бытовых и аварийных утечек из водонесущих коммуникаций был нарушен влажностный режим зоны аэрации. Вследствие этого произошло резкое изменение показателей физических свойств грунтов, деформируемости и прочности.

Для формирования полной ретроспективной картины динамики развития фаз увлажнения массива и количественной оценки основных факторов их формирования решалась обратная задача. Для этого была построена численная модель грунтового массива, которая представляет собой конечно-элементную аппроксимацию рассматриваемого участка застроенной территории жилого комплекса, составленная по результатам экспериментальных исследований.

Размеры модели определены из условия минимизации влияния ее контуров на напряженно-деформированное состояние моделируемой области и охватывают территорию протяженностью 80 м и мощностью грунтовой толщи 42 м. Разбивка толщи сетью треугольных элементов выполнена в соответствии с геолого-литологическим строением массива по линии разреза, где зафиксированы наибольшие деформации сооружений. Пространственная определенность моделируемой области обеспечивалась заданием нулевых перемещений на боковых границах модели и по ее нижнему контуру, соответствующему подошве песков. По документации известно, что жилые секции возведены на висячих сваях длиной от 20 до 27 м с уширенной пятой.

В модели задавался цельный фундамент, эквивалентный по нагрузкам воздействию свайному основанию. Силовое взаимодействие между элементами модели обеспечивалось действием гравитационных сил, обусловленных весом грунтовой толщи и сооружений.

В общем виде численная модель представлена инженерно-геологическими элементами (ИГЭ) 9 типов включая зоны распространения техногенного увлажнения (рис. 4.16).

Техногенное увлажнение лессовых грунтов целесообразно разделить на три фазы. На рис. 4.16 представлено конечное положение фаз замачивания



грунта, которые связаны с периодом интенсивных утечек в период предшествующий замене водонесущих коммуникаций.

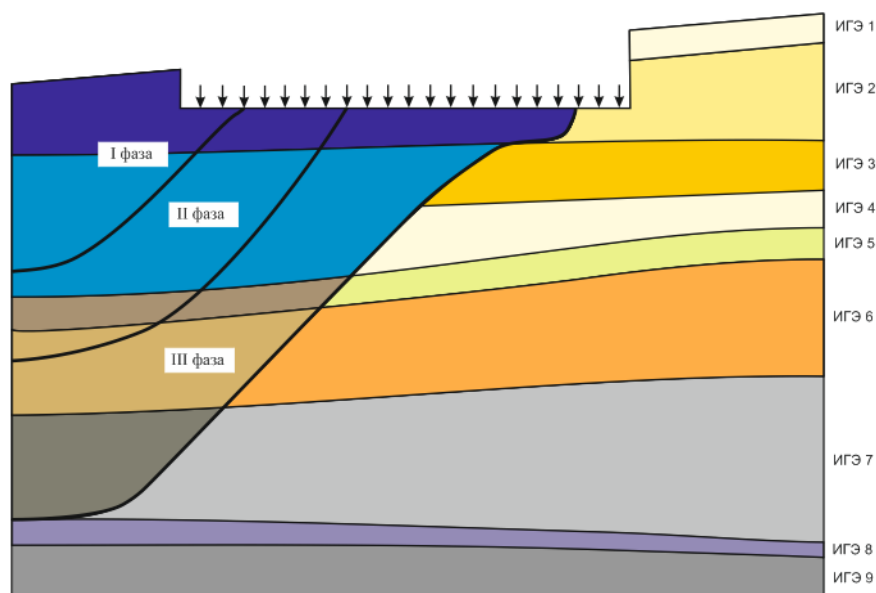


Рисунок 4.16 – Геологический разрез в конечно-элементной реализации с фазами техногенного увлажнения (I – III – фазы увлажнения лессовых пород): 1 – насыпные грунты, 2 – 7 – верхнечетвертичные отложения лессового комплекса; 8, 9 – нижнечетвертичные аллювиальные кварцевые пески

Устойчивость грунтового массива оценивалась по характеру развития зон пластического деформирования.

Анализ напряженно-деформированного состояния породного массива в оползнеопасном направлении показал, что обводненные грунты в основании лессовой толщи 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 одновременном фронтальном и субвертикальном техногенном увлажнении лессовых грунтов.

Упрочнение водонасыщенных грунтов, которое произошло после замены водонесущих коммуникаций, существенно улучшило общую ситуацию, од-

нако в пределах уже сформировавшихся осадок оползневые деформации сохраняются.

Для анализа пространственных и временных изменений характеристик лессового массива были построены графики ускорений осадок по настенным маркам и реперам (рис. 4.17 – 4.18), т.к. динамика осадок реперов напрямую связана с режимом увлажнения массива. Для выделения влияния смены температурного и влажностного режимов в зоне аэрации, связанных с сезонными колебаниями учитывалось ускорение (обычно оценивают величины и скорость осадок).

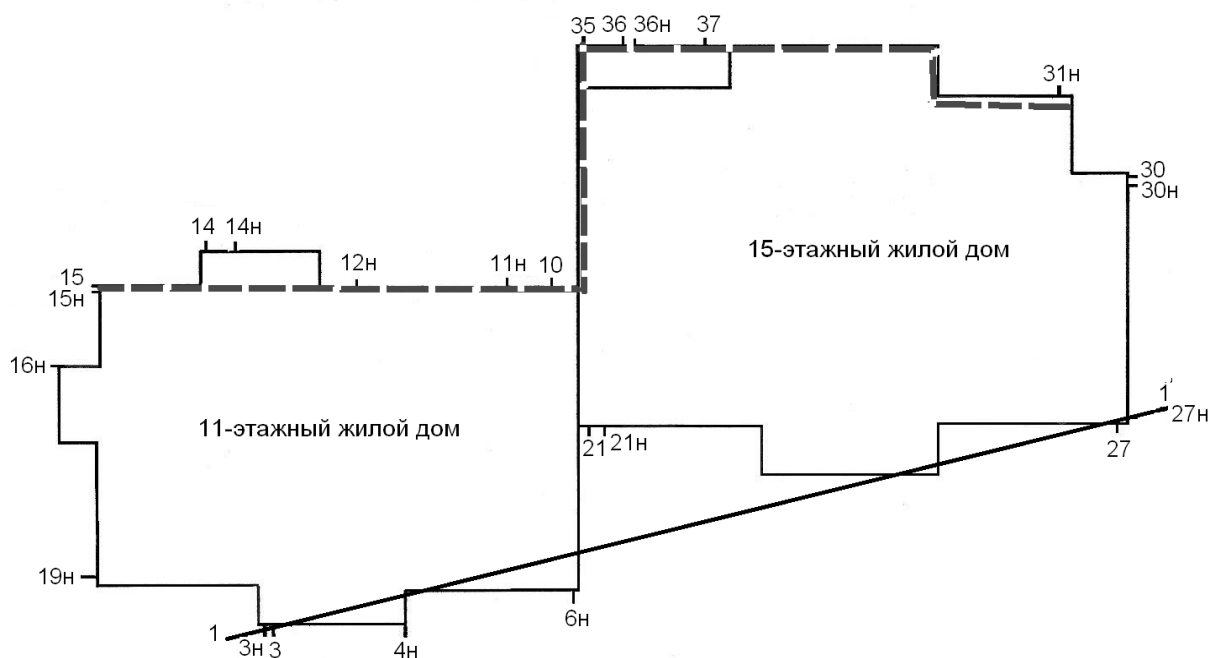


Рисунок 4.17 – План установки реперов на ж/к: 1 – линия инженерно-геологического разреза; 2 – зона наибольших осадок; 3н – 37н – номера реперов с инструментальным измерением осадок

Прослеживается прямая зависимость между данными наблюдений и сезонными факторами (рис. 4.18). Деформационные всплески приурочены к осенне-зимним периодам (с конца ноября до начала февраля). Анализ погодных условий показывает, что относительно теплый декабрь и начало января с осадками, преимущественно дождевыми, и активное снеготаяние, совпали с активизацией деформационных процессов.

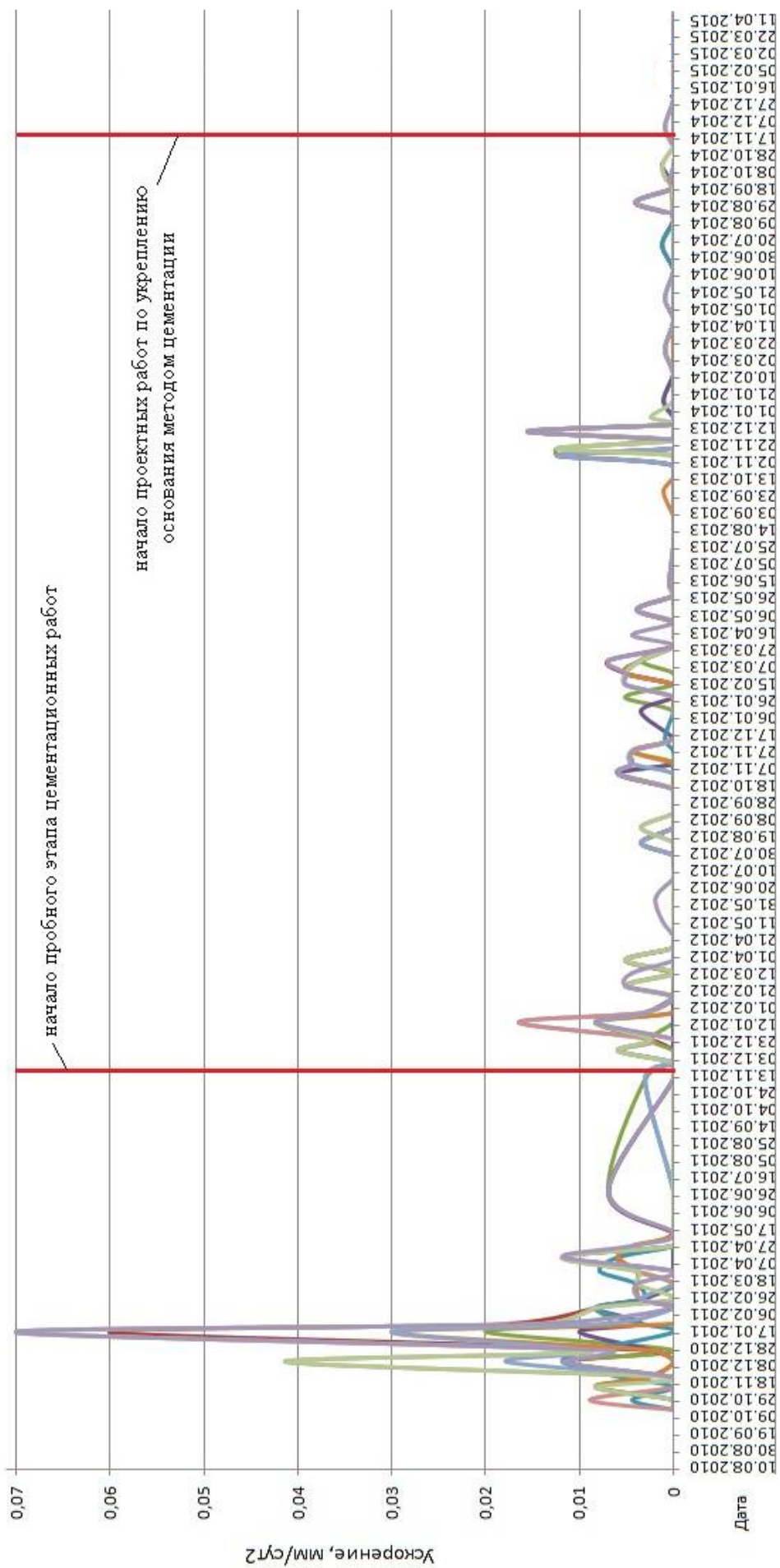


Рисунок 4.18 – Изменение ускорения осадок реперов во времени

В качестве инженерных мероприятий по предотвращению дальнейших деформаций жилого комплекса был предложен вариант высоконапорной цементации. Проведены нагнетания через скважины по схеме “сверху-вниз” [39]. Из рис. 4.18 видно, что фаза затухания осадок соответствует периоду проведения инженерных мероприятий по обновлению водонесущих коммуникаций. Однако окончательной стабилизации осадок не происходит. После экспериментального этапа инъекционной цементации были зафиксированы увеличенные значения ускорения осадок, которые наложились на сезонный всплеск.

При выполнении цементационных работ, на опытном участке наблюдались значительный перерасход (около 40%) цементного раствора по сравнению с предусмотренным в проекте, при этом проектные давления не были достигнуты. В дальнейшем геологическими изысканиями на опытном участке обнаружены субвертикальные и вертикальные трещины, пронизывающие, в основном, ИГЭ 4 и 5, которые, очевидно, привели к поглощению цементного раствора. Данные о присутствии трещин, пустот и полостей, образовавшихся в грунте под действием фильтрации и вертикальных подвижек при нагружении склона подтверждены также при осмотре коммуникационных колодцев в окрестности ж/к. При этом фиксировались пустоты в грунте, а также скопления грунта, вынесенные вследствие суффозионных процессов.

По методике [119], учитывающей состояние структурных связей в лессовых грунтах, было построено поле физических градиентов вертикального сечения склона (рис.4.19). При этом учтены три вида энергии – недоуплотнения лессовых пород, гравитационного положения и деформаций. Пересечения изолиний градиентов деформаций и изолиний суммарной потенциальной энергии в лессовом массиве отображают положение критических поверхностей внутри грунта. В целом модель отражает состояние массива после возникновения области техногенного увлажнения лессовых пород. По нормальям выделены прогнозные деформационные зоны в теле склона с их количественной характеристикой по величине потенциалов активации (сумма градиентов полной энергии и градиентов деформаций конечных элементов лессового массива).

В отличие от классических схем оценки устойчивости склонового массива нами учитывается специфика лессовых пород в виде поля потенциалов,

интерпретация которого позволяет выделить прогнозные зоны опасных деформационных процессов (рис. 4.19).

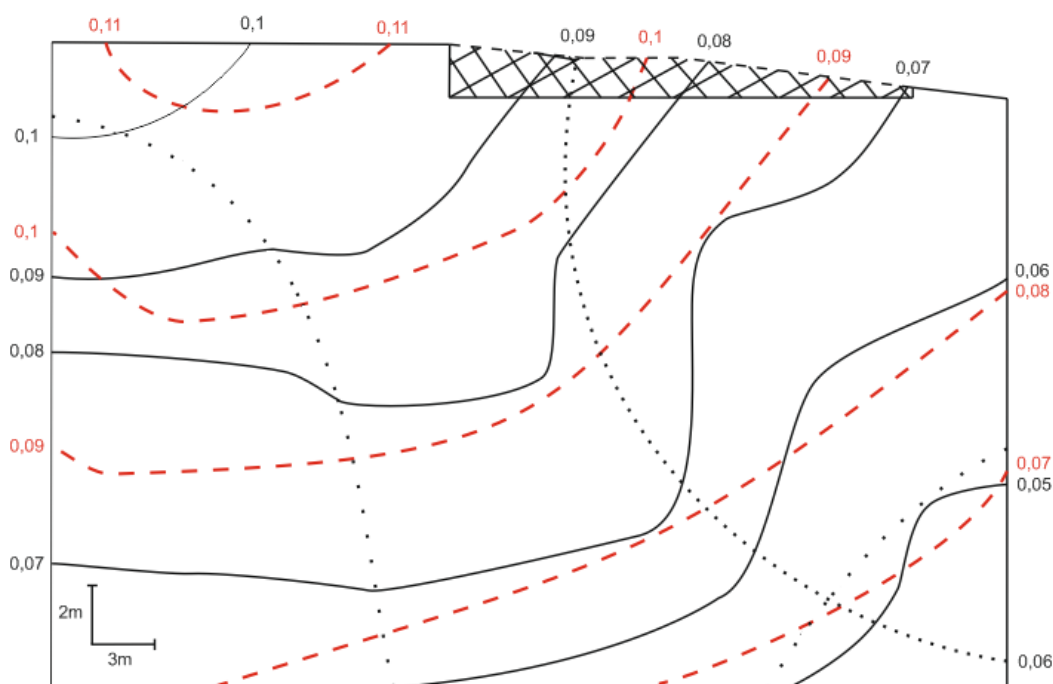


Рисунок 4.19 – Изолинии: 1 – градиентов энергии лессового склона; 2 ----потенциал активации склона; .....- прогнозная поверхность скольжения; . . . . – граница техногенного увлажнения

Моделирование проведено с учетом 3-х зон увлажнения склона. Данные о присутствии трещин и пустот в массиве, которые были образованы в грунте под действием техногенной фильтрации и вертикальных подвижек, были учтены в виде зон с соответствующими значениями прочностных свойств пород. Наиболее опасные зоны располагаются в пределах ИГЭ 4, а также зонально в ИГЭ 5 и 6. Значения потенциала активации склона в этих зонах изменяются в пределах 0,07 – 0,08. Сравнение с аналогичными данными моделирования, полученными по оползню на ж/м Тополь, где потенциал активизации в стадии оползневого процесса составил около 0,08 – 0,09, дает возможность выделить эти значения в качестве критического диапазона.

Изолинии градиентов энергии массива имеют выраженные экстремумы в зонах наибольших деформаций. Граничное значение градиента потенциала

активации для диапазона величин потенциалов активации 0,08 – 0,09 составило 0,0012. При этом значении в лессовом массиве активизируются оползневые процессы (рис. 4.20).

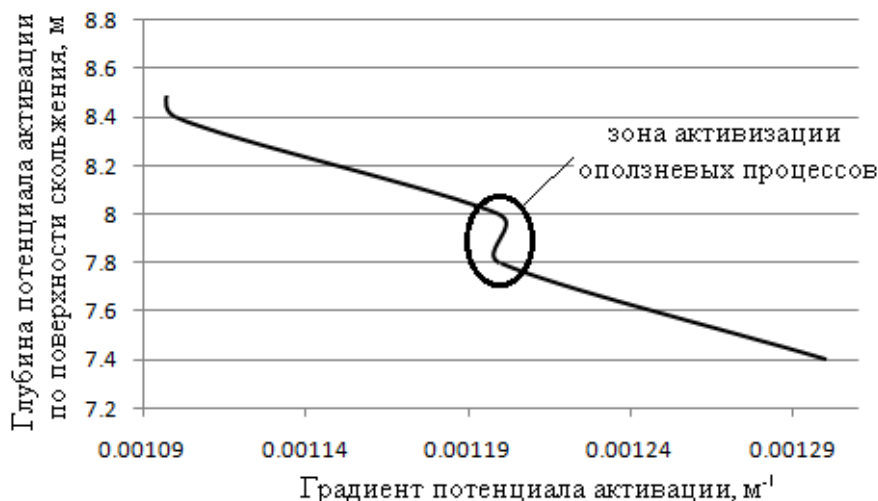


Рисунок 4.20 – Зависимость градиента потенциала активации (по цилиндрической поверхности скольжения) от глубины

Данная зависимость отвечает присклоновым участкам лессового комплекса, а также подтверждается данными об установленной инверсии фильтрационной анизотропии лессов в сравнении с ее природным положением, которая провоцируется техногенными изменениями грунтовых массивов. При фильтрации в вертикальном направлении эрозионные процессы не формируются, а при фильтрации параллельно напластованию происходит переход суффозии в эрозию, что подтверждено опытами (раздел 2) и реальным формированием оползневых течений (п. 4.3.2). При определенных нагрузках на лессовые породы суффозия переходит в эрозионный размыв с предваряющей фазой появления гидравлически инертных полостей. Сравнение результатов фильтрационных испытаний лессовых пород с результатами моделирования на рассмотренном объекте показывает, что образование эрозионных промоин и полостей в ИГЭ 4 – 6 ведет к развитию наибольших деформаций.

Представленные результаты позволяют сформулировать **второе научное положение: основным параметром, определяющим оползнеопасность**

лессового массива, является потенциал активации склона в виде суммы градиентов полной энергии и градиентов деформаций. Потенциал активации в стадии активизации оползневого процесса находится в диапазоне 0,08-0,09 и является критическим.

Таким образом, приведенная выше апробация методики оценки устойчивости массива, позволяет прогнозировать поведение склона с учетом нарушения его сплошности, произошедшего вследствие суффозионных процессов. Применяя ее, можно выделить количественные характеристики активизации оползневых процессов на основании градиента потенциала активации массива. Методика позволяет количественно оценить момент перехода массива в неустойчивое состояние, а также связь фильтрационных процессов с формированием оползней течения.

#### **4.4. Рекомендации по обеспечению технически и экологически приемлемого состояния техногенно нагруженных лессовых массивов на примере ж/м “Тополь” и ул. Симферопольской (г. Днепропетровск)**

##### ***Ж/м “Тополь”***

##### ***Первоочередные***

– проведение инженерно-технического мониторинга в пределах зоны 4 с периодичностью обследования специалистами дважды в год (в конце мая и ноября), содержащего оценку состояния поверхностного стока, ливневой сети, наличия искусственных водосборных воронок и оврагов в рельефе, и данных относительно появления суффозионных конусов выноса, а также интенсификации деформаций на зданиях различного назначения;

– прекращение любых строительных и земляных работ в зоне 4, которые замедляют поверхностный сток и разгрузку воды в тальвеги балок Встречная и Тополиная, формируют водосборные воронки и овраги;

– принять административные меры по установлению инженерно-технического контроля и поддержания геотехнического состояния гаражных кооперативов;

– составить и реализовать проект ремонта (или реконструкции) водоканализационных сетей в зоне 4 с ликвидацией искусственных водопоглощаю-

щих воронок и оврагов в рельефе (особенно опасны спортивная площадка школы № 53 и искусственный поглощающий овраг между бровкой склона и гаражными постройками, который необходимо срочно уплотнить суглинком с трамбованием). Ремонт ливневых коммуникаций следует проводить в направлении поднятия рельефа, начиная с балок.

### *Долгосрочные*

- согласовать режим ситуативного геотехнического мониторинга территории жилых массивов “Тополь-1, 2, 3” по сигналам граждан, с выделением зоны 4, как наиболее опасной;

- составить проект реконструкции водокоммуникационных сетей и поверхностного стока на ж/м “Тополь-2” с его этапной реализацией: зона 4 – первоочередная, в последующем – зоны 1, 2, 3.

### *Ул. Симферопольская (дом № 11)*

- замена магистрального трубопровода по ул. Симферопольской;
- этап предварительной цементации;
- укрепление грунтового основания способом высоконапорной цементации с поинтервальной схемой в направлении сверху вниз;
- мониторинг деформаций жилых секций и конструкций паркинга.

На основе этих разработок осуществлено проектирование и реализация внедрения результатов исследований диссертационной работы (приложения А, Б).

### **Выводы**

1. Прогнозные расчеты в условиях постоянной во времени величины инфильтрации, установленной на 2012 г. (ж/м Тополь), свидетельствуют о стабилизации положения уровневой поверхности подземных вод, как в краткосрочном, так и долгосрочном периоде. Однако без проведения специальных профилактических и восстановительных мероприятий по эксплуатации подземных сетей, инфильтрационное питание увеличивается.

Вариант прогнозных решений, предусматривающий рост величины инфильтрационного питания на 70% в ближайшие 10 лет, приводит к повышению уровня подземных вод на 2,1 – 2,6 м.



2. Прогнозные гидродинамические расчеты в условиях интенсивного роста уровня неогенового водоносного горизонта за счет питания в балке Встречная показывают, что урвневый режим четвертичного горизонта на бóльшей части территории не претерпевает существенных изменений. Однако в балке и 100 метровой зоне ее склона изменяется направление перетока и замедляется разгрузка грунтовых вод, что отрицательно влияет на устойчивость грунтового склона.

3. Жилые массивы “Тополь-1” и “Тополь-2” расположены на левом склоне балки Встречная, имеют схожие инженерно-геологические условия и находятся в пределах единой гидродинамической системы. Поэтому возможность развития суффозии следует рассматривать с учетом фактических данных, зафиксированных в предоползневой период на ж/м “Тополь-1” в 1997 г.

4. Согласно результатам предыдущих исследований и вышеупомянутых фактов грунты склона б. Встречная отнесены к суффозионным.

5. По результатам анализа энергетических и фильтрационных свойств техногенно нагруженного лессового массива определен интервал глубин, и геологические слои, характеризующиеся наиболее интенсивным развитием деформационных и суффозионных процессов. Приведенная в работе методика оценки устойчивости массива, позволяет прогнозировать поведение склона с учетом нарушения его сплошности, произошедшего вследствие суффозионных процессов.

6. Основным параметром, определяющим оползнеопасность лессового массива, является потенциал активации склона в виде суммы градиентов полной энергии и градиентов деформаций. Потенциал активации в стадии активации оползневого процесса находится в диапазоне 0,08 – 0,09 и является критическим.

7. Предложенные технические решения по управлению гидрогеомеханическим состоянием оползнеопасных лессовых массивов базируются на учете геотехнической и природной структуры застроенных массивов и ориентированы на предотвращение новых или ликвидацию уже существующих деформационных процессов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой на основании впервые установленных закономерностей изменений гидрогеомеханических свойств присклоновых лессовых массивов с выделением критической фазы фильтрационной инверсии и формирования глубинной эрозии решена актуальная научно-практическая задача прогнозирования и обеспечения устойчивости лессов с учетом их генезиса и энергетических характеристик.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Установлено, что несовершенство методических подходов прогнозирования геомеханического состояния лессовых массивов в условиях техногенной нагрузки и недостаточная эффективность использования на практике классических подходов к принятию технических решений является следствием неполных представлений о гидрогеомеханических изменениях в грунте.

2. Экспериментально обоснованы закономерности ослабления структурной устойчивости лессовых пород. Впервые установлено, что анизотропия лессового массива подвергается инверсии вследствие техногенного воздействия фильтрационных и деформационных процессов в присклоновых областях при девиаторе напряжений 150 – 200 кПа, что приводит к активизации процессов глубинной эрозии в лессовых породах и провоцирует оползни течения, при этом значения коэффициента фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях отличаются до 9 раз.

3. Получены средние значения массы выноса частиц, а также их гранулометрический состав для Приднепровского лессового суглинка с выделением прогнозной зоны перехода суффозии в первую стадию размыва и глубинной эрозии с интервалом девиатора напряжений 150 – 200 кПа и гидравлическим градиентом 20 кПа.

4. Обоснована математическая модель фильтрационных процессов техногенно нагруженного лессового массива территории ж/м “Тополь” по конечно-разностной схеме. Решение вариантного ряда нестационарных обратных задач позволило сформировать полную ретроспективную картину динамики формирования уровня режима подземных вод и установить, что техногенная инфильтрация почти втрое превышает естественную и является основным фактором оползнеопасности.

5. Обоснована методика оценки устойчивости лессовых склонов, основанная на учете энергетических и гидродинамических параметров, которая адаптирована для решения задач устойчивости лессов в техногенно нарушенном массиве. Впервые установлено, что основным параметром, который определяет оползнеопасность лессового массива, является потенциал активации склона в виде суммы градиентов полной энергии и градиентов деформаций. Потенциал активации в стадии активизации оползневого процесса находится в диапазоне 0,08 – 0,09 и является критическим.

6. Решены практические задачи оценки устойчивости лессовых пород на ж/м “Тополь”, б. Туннельной и ул. Симферопольской. По результатам анализа энергетических и фильтрационных свойств техногенно нагруженного лессового массива определены интервалы глубин и геологические слои, характеризующиеся наиболее интенсивным развитием деформационных и суффозионных процессов.

7. Результаты решения прогнозных гидродинамических задач, основанные на исследованных закономерностях формирования оползневых процессов с предложенной оценкой устойчивости массива, которая учитывает энергетические параметры, являются основой для принятия технических решений по ликвидации существующих деформационных процессов. Разработаны рекомендации по инженерной защите застроенных территорий.

Предотвращенный ущерб от дальнейшего развития деформаций по ул. Симферопольской (г. Днепропетровск) оценивается суммой в 2,5 млн грн.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абелев М.Ю. Слабые водонасыщенные глинистые грунты как основания сооружений. – М.: Стройиздат, 1973. – 288 с.
2. Абелев Ю.М., Абелев М.Ю. Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых грунтах. – М.: Издательство литературы по строительству, 1968. – 430 с.
3. Ананьев В.П. Минералогический состав и свойства лессовых пород. – Издательство Ростовского университета, 1964. – 144 с.
4. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1979. – 256 с.
5. Амарян Л.С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. – М.: Недра, 1990. – 224 с.
6. Бабинец А.Е., Огняник Н.С., Шестопапов В.М. Введение в моделирование гидрогеологических процессов. – Киев: Наукова думка, 1980. – 250 с.
7. Белокопытова Н.А. и др. Предварительный прогноз гидрогеологической обстановки жилмассива “Тополь” г. Днепропетровска методом моделирования на ЭВМ. Отчет/ ДО ИМР. – Днепропетровск, 1982. – 84 с. (фондовая)
8. Белокопытова Н.А., Лившиц В.М., Ревенко Е.А. Прогноз гидрогеологической обстановки территории жилмассива “Тополь” с учетом водопонижающих мероприятий. Рекомендация/ ДО ИМР. – Днепропетровск, 1985. – 112 с. (фондовая)
9. Бондарик Г.К., Горальчук М.И., Сироткин В.Г. Закономерности пространственной изменчивости лессовых пород. – М.: Недра, 1976. – 234 с.
10. Бондарик Г.К., Горальчук М.И., Иерусалимская Е.Н. Пространственная изменчивость ледниковых отложений. – М.: Недра, 1985. – 237 с.
11. Бондарик Г.К., Царева А.М., Пономарев В.В. Текстура и деформация глинистых пород. – М.: Недра, 1975. – 167 с.
12. Бондарик Г.К. Общая теория инженерной (физической) геологии. – М.: Недра, 1981. – 256 с.

13. Балаев Л.Г., Царев П.В. Лессовые породы центрального и восточного Предкавказья. – М.: Наука, 1964. – 248 с.
14. Быкова В.С. Типы лессовых пород юга Украины и их инженерно-геологическая характеристика. – М.: Издательство академии наук СССР, 1962. – 114 с.
15. Бишоп Аллен У., Хенкель Д. Дж. Определение свойств грунтов в трехосных испытаниях. Под общей редакцией проф., д.г.-м.н Н.Я. Денисова. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. – 232 с.
16. Бугров А.К., Нарбут Р.М., Сипидин В.П. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. – Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1987. – 184 с.
17. Вернадский В.И. Очерки геохимии. – М.: Наука, 1983. – 422 с.
18. Власов С.Ф., Максимова Н.А. Повышение устойчивости оползнеопасных склонов с помощью струйной технологии закрепления грунтов. – Д., Национальный горный университет, 2010. – 143 с.
19. Вопросы геотехники. Под ред. М.Н. Гольдштейна. Сборник 6. – М.: Трансжелдориздат, 1963. – 211 с.
20. Веклич М.Ф. Стратиграфия лессовой формации Украины и соседних стран. – Киев: Наукова думка, 1968. – 240 с.
21. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
22. Воробьев А.А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. – Томск: Издательство Томского университета, 1989. – 212 с.
23. Воробьев А.А., Тонконогов М.П., Векслер Ю.А. Теоретические вопросы физики горных пород. – М.: Недра, 1972. – 152 с.
24. Вопросы инженерной геологии. Доклады советских ученых к Международному конгрессу Международной Ассоциации инженеров-геологов. Отв. ред. П.Н. Панюков. – М.: Издательство АН СССР, 1970. – 370 с.
25. Вопросы инженерной геологии. Ред. Соколов С.С. и Чуринов М.В. – М.: Недра, 1970. – 176 с.

26. Вернадский В.И. Избранные сочинения. Том 1. – М.: Издательство АН СССР, 1954. – 696 с.
27. Вернадский В.И. Избранные сочинения. Том 2. – М.: Издательство АН СССР, 1955. – 616 с.
28. Гавич И.К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. – М.: Недра, 1980. – 358 с.
29. Гуменский Б.М. Основы физико-химии глинистых грунтов и их использование в строительстве. – М.: Издательство литературы по строительству, 1965. – 256 с.
30. Гинзбург И.И., Яшина Р.С. Экспериментальные исследования в области выветривания. – М.: Издательство АН СССР, 1962. – 88 с.
31. Геотехника в строительстве. Вып. 1. Вопросы строительства на просадочных грунтах. – М.: Издательство литературы по строительству, 1966. – 84 с.
32. Горькова И.М., Окнина Н.А., Душкина Н.А., Рябичева К.Н. Природа прочности и деформационные особенности лессовых пород. – М.: Наука, 1964. – 146 с.
33. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. – М.: Стройиздат, 1973. – 375 с.
34. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов (напряженно-деформативные и прочностные характеристики). – М.: Стройиздат, 1979. – 304 с.
35. Гольдштейн М.Н. Развитие оползневых смещений в запредельном состоянии / М.Н. Гольдштейн, А.Я. Туровская / Труды международного симпозиума “Инженерно-геологические свойства глинистых пород и процессы в них”. – М.: МГУ, 1972. – Вып. 2. – С. 48.
36. Гениев Г.А. Вопросы динамики сыпучей среды. Научное сообщение. Выпуск 2. – М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1958. – 132 с.
37. Гениев Г.А., Лейтес В.С. Вопросы механики неупругих тел. – М.: Стройиздат, 1981. – 160 с.

38. Гениев Г.А., Эстрин М.И. Динамика пластической и сыпучей сред. – М.: Издательство литературы по строительству, 1972. – 216 с.
39. Головки С.И. Теория и практика усиления грунтовых оснований методом высоконапорной цементации. Монография. Днепропетровск: Пороги, 2010. – 247 с.
40. Горькова И.М., Коробанова И.Г., Окнина Н.А., Реутова Н.С., Сафокина И.А., Чепик В.Ф. Природа прочности и деформационные особенности глинистых пород в зависимости от условий формирования и увлажнения. – М.: Издательство АН СССР, 1961. – 156 с.
41. ГОСТ 12536–79. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
42. Гулакян К.А., Кюнтцель В.В., Постоев Г.П. Прогнозирование оползневых процессов. – М.: Недра, 1977. – 135 с.
43. Денисов А.М., Лукшин А.В. Математические модели однокомпонентной динамики сорбции. Учебное пособие. – М.: Издательство Московского университета, 1989. – 72 с.
44. Денисов Н.Я. Природа прочности и деформаций грунтов. Избранные труды. – М.: Издательство литературы по строительству, 1972. – 210 с.
45. Денисов Н.Я., Жукова В.М. Поровое давление и сопротивление сдвигу глинистых пород. – М.: Лаборатория геотехники, информационные материалы №3, 1957. – 44 с.
46. Денисов Н.Я. Строительные свойства лесса и лессовидных суглинков. – М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1953. – 154 с.
47. Денисов Н.Я. Строительные свойства глинистых пород и их использование в гидротехническом строительстве. – М.–Л.: Государственное энергетическое издательство, 1956. – 288 с.
48. Дубровкин В.Л., Чеклина Е.А., Виноградова Е.Л., Царева А.М. Инженерно-геологическая характеристика лессовых пород территории КМА. – М.: Недра, 1964. – 200 с.

49. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1985. – 398 с.
50. Дерягин Б.В. Что такое трение? – М.: Издательство АН СССР, 1963. – 231 с.
51. Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. – М.: Наука, 1986. – 206 с.
52. Дякун Р.А. Методика комплексного деформационно-визуального исследования напряженного состояния гетерогенных пород / Дякун Р.А., Зайцев М.С., Светличный В.Н. // Доповіді науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Маркшейдерське забезпечення геотехнологій” ДВНЗ НГУ, Дніпропетровськ, 2013. – С. 99–105.
53. Дякун Р.А. Исследование физико-механических характеристик горных пород при их газоводонасыщении / Дякун Р.А., Осенний В.Я., Светличный В.Н. // Міжвід. збір. наук, праць “Геотехнічна механіка”, ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ, 2014 – Вип. 114. – С. 85–99.
54. Емельянова Е. П. Сравнительный метод оценки устойчивости склонов и прогноз оползней. – М., Недра, 1971. – 115 с.
55. Жернов И.Е., Павловец И.Н. Моделирование фильтрационных процессов. – Киев: Высшая школа, 1976. – 192 с.
56. Жубаев Н.Ж., Синяев А.Я., Горбачева Л.К. и др. Деформационные свойства мягких грунтов при динамических воздействиях. – Алма-Ата: Гылым, 1990. – 180 с.
57. Заключение об инженерно-геологических изысканиях на площадке строительства 16-ти этажных жилых домов на территории жилого массива “Тополь-3” в г.Днепропетровске / Игрунова М. и др.,–УкрвостокГИИГТИЗ. – 1975.
58. Зиангиров Р.С. Объемная деформируемость глинистых грунтов. – М.: Наука, 1979. – 164 с.
59. Зуска А.В. Кинетическая модель оползневых склонов. – Дн-ск: НГУ, 2014. – 139 с.



60. Инженерно-геологические свойства горных пород и методы их изучения. Под ред. Безрука В.М., Котлова Ф.В. – М.: Издательство АН СССР, 1962. – 363 с.
61. Инженерно-геологические процессы, явления и охрана среды лесовых территорий. Труды Всесоюзного совещания по проблемам лесовых пород. Под ред. Г.А. Мавлянова. – Ташкент: Фан Узбекской ССР, 1985. – 206 с.
62. Инженерно-геологические свойства лесовых пород. Под ред. И.В. Попова. – М.: Наука, 1966. – 110 с.
63. Инженерно-геологические особенности цикличности лессов. Под ред. Трофимова В.Т., Шаевича Л.Е. – М.: Наука, 1987. – 160 с.
64. Истомина В.С., Буренкова В.В., Мишурова Г.В. Фильтрационная прочность глинистых грунтов. – М.: Стройиздат, 1975. – 220 с.
65. Инженерно-геологические свойства глинистых пород и процессы в них. Труды международного симпозиума. Вып. 1. Отв. ред. Е.М. Сергеев. – М.: Издательство МГУ, 1972. – 203 с.
66. Истомина В.С. Фильтрационная устойчивость грунтов. – М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1957. – 296 с.
67. Кригер Н.И. Лесс, его свойства и связь с географической средой. – М.: Наука, 1965. – 196 с.
68. Крутов В.И. Основания и фундаменты на просадочных грунтах. – Киев: Строитель, 1982. – 224 с.
69. Коган Я.Л. Аппаратура и методика определения порового давления в глинистых грунтах. – М., 1960. – 28 с.
70. Кригер Н.И. Лесс, формирование просадочных свойств. – М.: Наука, 1986. – 130 с.
71. Кузнецов В.Д. Поверхностная энергия твердых тел. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 220 с.
72. Куличенко И.И., Садовенко И.А., Тимощук В.И., Тишков В.В. – Геотехнические и организационные подходы к выбору инженерной защиты

оползневых склонов. – Сборник научных трудов НГА Украины. – Т.4. – 1999, № 6., С. 75–78.

73. Ларионов А.К., Приклонский В.А., Ананьев В.П. Лессовые породы СССР и их строительные свойства. – М.: Госгеолтехиздат, 1959. – 367 с.

74. Лессовые породы Украины. Под ред. Бондарчука В.Г. – К.: Издательство АН Украинской ССР, 1957. – 186 с.

75. Лебедев В.И. Основы энергетического анализа геохимических процессов. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1957. – 342с.

76. Лившиц В.М., Белокопытова Н.А. и др. Методические рекомендации по моделированию на ЭВМ фильтрации подземных вод в слоистых толщах. – Днепропетровск: ДО ИМП, 1987. – 115 с.

77. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория переноса энергии и вещества. – Минск: Издательство АН СССР, 1959. – 330 с.

78. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 296 с.

79. Лессовые породы СССР. Том 1. Инженерно-геологические особенности и проблемы рационального использования. Под ред. Е.М. Сергеева, А.К. Ларионова, Н.Н. Комиссаровой. – М.: Недра, 1986. – 232 с.

80. Лессовые породы СССР. Том 2. Региональные особенности. Под ред. Е.М. Сергеева, А.К. Ларионова, Н.Н. Комиссаровой. – М.: Недра, 1986. – 276 с.

81. Ломакин Е.А., Мироненко В.А., Шестаков В.М. Численное моделирование геофильтрации. – М.: Недра, 1988. – 239с.

82. Ломизе Г.М. Фильтрация в трещиноватых породах. – М.–Л.: Государственное энергетическое издательство, 1951. – 127 с.

83. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства. (Оползни и борьба с ними). – М.: Стройиздат, 1977.– 320 с.

84. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики. – М.: Недра, 1974. – 296 с.

85. Мустафаев А.А. Основы механики просадочных грунтов. – М.: Стройиздат, 1978. – 263 с.
86. Малышев М.В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. – М.: Стройиздат, 1980. – 136 с.
87. Месчян С.Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. – М.: Недра, 1985. – 342 с.
88. Месчян С.Р. Начальная и длительная прочность глинистых грунтов. – М.: Недра, 1978. – 207 с.
89. Мокрицкая Т. П. Закономерности деградации свойств лессового массива в условиях техногенеза / Т. П. Мокрицкая // Геол. журн. – 2013. – № 1.– С. 73–79.
90. Науково-технічний звіт по об'єкту “Інженерний захист лівого схилу балки Зустрічна в районі МКР “Тополя-1” в м. Дніпропетровськ, вишукувальні роботи” / Григоренко А.І та ін., – ДніпроДІНТР. – 2011.
91. Науково-технічний звіт по об'єкту “Інженерний захист території ж.м. “Тополя-2” – будівництво дощової каналізації в м. Дніпропетровськ”/ Лисенко М.Г., Ревенко О.О., Ярмоленко Т.А. та ін., – ДніпроДІНТР. – 2012.
92. Науково-технічний звіт по об'єкту “Інженерний захист території від підтоплення підземними водами будівель і споруд в МКР “Тополя-3” в м. Дніпропетровську, вишукувальні роботи” / Лисенко М.Г., Ревенко О.О., Ярмоленко Т.А. та ін., – ДніпроДІНТР. – 2011.
93. Ниязов Н.А. Формирование крупных оползней Средней Азии. – Ташкент: Фан, 1982. – 156 с.
94. Ниязов Н.А., Мирасланов М.М., Пушкаренко В.П., Саидова С.Р. Экзогенные процессы и обоснование защиты горных территорий Узбекистана. – Ташкент: Фан, 1986. – 136 с.
95. Оцінка надійності проектних заходів щодо захисту території житлового масиву “Тополя”-1 від підтоплення / Мінеральні ресурси України, №3 Білокопитова Н.А., Кузіна Г.П., Лейко Г.М. та ін., 1998. – С. 38–43.

96. Особенности формирования физико-механических свойств лессовых пород и гидрогеологических процессов Узбекистана. Сборник научных трудов. Вып. 217. Под ред. Закирова Т.З. – Ташкент: ТПИ, 1977. – 93 с.

97. Огильви Н.А. Физические и геологические поля в гидрогеологии. – М.: Наука, 1974. – 160 с.

98. Оползни. Исследование и укрепление. Под ред. Р. Шустера и Р. Кризека. – М.: Мир, 1981. – 368 с.

99. Отчет по гидрогеологическим исследованиям на территории жилмассивов Тополь –2,3 / Данилов А.П. , –Южукргеология. – 1998. – 114 с. (фондовая)

100. Отчет по оценке эффективности проектируемых мероприятий по защите территории ж/м “Тополь-1” от подтопления / Белокопытова Н.А., – ДО УкрГИМР. – 1997. – 110 с.

101. Петренко В.Д. Реализация свойств упруго-вязкопластического массива с помощью “грунтовых” элементов / В.Д. Петренко, А.Л. Тютькин, Т.А. Селихова // Міжвід. зб. наук. пр. “Геотехнічна механіка”. – Д.: Ін-т геотехнічної механіки НАН України, 2004. – Вип. 50. – С. 270–277.

102. Петренко В. Д. Сравнительный анализ методов расчета свайных фундаментов при статических и динамических нагрузках / В.Д. Петренко, А.Л. Тютькин, М.Б. Стоичева // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна №14/2007. – С. 194–197.

103. Петренко В.Д. Прочность грунтов при большом давлении / В.Д. Петренко, И.К. Бадалаха, В.Н. Косяк // Залізничний транспорт України, 2005. – №3 (48). – С. 51–53.

104. Плотников Н.И., Техногенные изменения гидрогеологических условий. – М.: Недра, 1989. – 248 с.

105. Проблемы инженерной геологии. Сборник статей. Вып. 1. Под ред. Золотарева Г.С. и Приклонского В.А. – М.: Издательство иностранной литературы, 1958. – 264 с.

106. Разработка методического обеспечения для оценки изменений

качества подземных вод в сложных геоэкологических условиях методом математического моделирования /Сынах В.Ю., Белокопытова Н.А. и др.– ДО УкрГИМР. Днепропетровск,– 1998. (фондовая)

107. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления. Укрспецстройпроект. – М.: ЦБНТИ, 1986. – 86 с.

108. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов. ПНИНИС. – М.: Стройиздат, 1984. – 80 с.

109. Ржевский В.В. Физико-технические параметры горных пород. – М.: Наука, 1975. – 212 с.

110. Руководство по методике определения характеристик деформаций сжатия лессовых грунтов в условиях фильтрации. – Л.: Энергия, 1975. – 24 с.

111. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. – М.: Наука, 1979. – 384 с.

112. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Недра, 1974. – 560 с.

113. Ребиндер П.А., Куртель Р. Обзорные доклады по теме: Взаимодействие поверхностей – адгезия и деформация поверхностных слоев при трении. Всесоюзный симпозиум о природе трения твердых тел. – Минск: Наука и техника, 1969. – 40 с.

114. Ребане К.К. Энергия, энтропия, среда обитания. – Таллин: Валгус, 1984. – 160 с.

115. Реология. Теория и приложения. Под ред. Эйриха Ф. Перевод с англ. под общ. ред. Ю.Н. Работнова и П.А. Ребиндера. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 824 с.

116. Рахматуллаев Х.Л., Кофф Г.Л., Котлов В.Ф., Мавлянов Н.Г. Структура и инженерно-геологические свойства лессовых пород. – Ташкент: Фан, 1985. – 117 с.

117. Рубан С.А., Шинкаревский М.А. Гідрогеологічні оцінки та прогнози режиму підземних вод України / Моногорафія. – К.: УкрДГРІ, 2005. – 572 с.

118. Садовенко И.А., Власов С.Ф., Максимова-Гуляева Н.А. Обоснование возможности использования струйной технологии закрепления грунтовых склонов на основе анализа противооползневых мероприятий // Науковий вісник НГАУ. – 2002. № 5. – С. 31–33.

119. Садовенко И.А., Деревягина Н.И. О потенциале активации оползневого лессового массива // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 2. – С. 80–84.

120. Садовенко И.А., Деревягина Н.И. Экспериментальные исследования суффозионных и эрозионных деформаций лессовых пород / Вісник Кременчуцького нац. ун-ту імені Михайла Остроградського. – 2013. – № 4 (81). – С. 126–131.

121. Садовенко И.А., Крисан В.И., Куличенко И.И., Тимошук В.И., Тишков В.В. Исследование напряженно-деформированного состояния нагруженного оползневого склона. – Сборник научных трудов Приднепровской строительной академии. – ч1. – 1999, № 1. С. 85–88.

122. Садовенко И.А., Подвигина Е.О., Загриценко А.Н., Деревягина Н.И. Оценка факторов устойчивости техногенно нагруженных лессовых склонов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Москва, 2014, № 3. – С.37–43.

123. Славянов В.Н. Инженерно-геологические прогнозы устойчивости откосов. – М.: Издательство литературы по строительству, 1964. – 156 с.

124. Старицкий М.Г. Механические испытания грунтов. – Л.: Энергия, 1973. – 32 с.

125. Сипидин В.П., Сидоров Н.Н. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. – Л.–М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. – 92 с.

126. Труды международного симпозиума по литологии и генезису лессовых пород. Том 2. Инженерно-геологические свойства лессовых пород и методы их изучения. Под ред. Мавлянова Г.А. – Ташкент: Фан, 1971. – 329 с.

127. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы. Под ред. акад. Е.М. Сергеева. – М.: Недра, 1985. – 288 с.

128. Трофимов В.Т. Инженерная геология массивов лессовых пород. – М.: КДУ, 2007. – 398 с.
129. Туровская А.Я. Расчет оползневого давления и устойчивости склона / А.Я. Туровская, А.Г. Дорфман, В.П. Терлецкий // Вопросы земляного полотна и геотехники на железнодорожном транспорте: Межвуз. сб. науч. тр. ДИИТ. – Днепропетровск, 1978. – Вып. 201/27. – С. 49–55.
130. Туровская А.Я. Использование коэффициента длительной устойчивости для анализа состояния склона / А.Я. Туровская, Н.Б. Черненко // Геотехника в транспортном строительстве: Межвузов. сб. науч. тр. ДИИТ. – Днепропетровск, 1988. – Вып. 261/35. – С. 57–60.
131. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
132. Федоров И.В. Методы расчета устойчивости склонов и откосов. – М.: Госстройиздат, 1962. – 317 с.
133. Ферсман А.Е. Избранные труды. Том IV. – М.: Издательство АН СССР, 1958. – 588 с.
134. Физические методы исследования осадочных пород и минералов. Отв. ред. Логвиненко Н.А. – М.: Издательство АН СССР, 1962. – 272 с.
135. Фильтрация воды в пористых средах. Доклады III международного симпозиума. Часть 2. Влияние напряженно-деформированного состояния пористой среды на фильтрацию. Фильтрационные деформации (выпор, механическая суффозия, оплывание). – К.: Наукова думка, 1978. – 92 с.
136. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов / Под ред. д.т.н. В.Г. Мельник. – М.: Стойиздат, 1988. – 237 с.
137. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.
138. Шахунянц Г.М. К вопросу выбора рациональных методов расчета склонов. – В сб.: Оползни и борьба с ними: Тр. /Сев.-Кавказ. семинара. – Ставрополь, 1964.
139. Шусторович Е.М. Природа химической связи. – М.: Издательство АН СССР, 1963. – 136 с.

140. Раус Э.Дж. Динамика системы твердых тел. Том 1. Под ред. Ю.А. Архангельского и В.Г. Демина. – М.: Наука, 1983. – 464 с.

141. Раус Э.Дж. Динамика системы твердых тел. Том 2. Под ред. Ю.А. Архангельского и В.Г. Демина. – М.: Наука, 1983. – 544 с.

142. Derevyagina N.I. Dynamics of loess mass deformation due to technogenic load / I.A. Sadovenko, N.I. Derevyagina, E.O. Podvigina, A.N. Zagricenko // Збірник наукових праць НГУ. – 2014. – № 45. – С. 76–81.

143. Sadovenko I.O. Analysis of dynamic impact on a ground slope during destruction of an emergency house / Sadovenko I.O., Rudakov D.V., Timochuk V.I. – Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Coupled Site and Soil-Structure Interaction Effects with Application to Seismic Risk Mitigation, Borovets, Bulgaria, 30 August – 3 September 2008. – P. 305–312.

144. I. Sadovenko, N. Derevyagina. Phenomena of filtration inversion and depth erosion of technogenic loaded loess slopes // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, 2014, № 1 (84). – С. 150–153.

145. ГОСТ 12248–96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

146. Licensed Copy: Akin Koksal, Bechtel Ltd, 09 December 2002, Uncontrolled Copy, (c) BSI.



## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## Приложение А

"Утверждено"

Директор Днепропетровского государственного  
предприятия инженерно-технических изысканий  
для строительства ГП "ДНЕПРОГИИНТИЗ"



Федоренко В.И.

г. Днепропетровск

"15" квітня 2015 г.**АКТ**

**об использовании результатов научно-исследовательской работы  
"Обоснование параметров гидрогеомеханической устойчивости лессовых  
массивов с учетом их генезиса и энергетических характеристик"**

В рассмотрении материалов работы участвовали: директор ГП "ДНЕПРОГИИНТИЗ" Федоренко В.И., начальник геотехнического отдела ГП "ДНЕПРОГИИНТИЗ" Пивняк В.И., начальник геологического отдела ГП "ДНЕПРОГИИНТИЗ" Ревенко А.А., д.т.н., проф. каф. ГГИГ ГВУЗ "НГУ", проф. Садовенко И.А., асс. каф. ГГИГ ГВУЗ "НГУ" Деревягина Н.И.

Принята к сведению информация проф. Садовенко И.А., асс. Деревягиной Н.И., директора ГП "ДНЕПРОГИИНТИЗ" Федоренко В.И., начальника геотехнического отдела ГП "ДНЕПРОГИИНТИЗ" Пивняк В.И., начальника геологического отдела ГП "ДНЕПРОГИИНТИЗ" Ревенко А.А. о применении результатов научно-исследовательской работы "Обоснование параметров гидрогеомеханической устойчивости лессовых массивов с учетом их генезиса и энергетических характеристик", выполняемой в рамках договора № 50/040823-59 от 17.09.2012 г. (территория ж/м Тополь-2, г. Днепропетровск).

Работа посвящена актуальной задаче обоснования параметров устойчивости лессовых массивов с учетом их генезиса, энергетических и гидродинамических характеристик грунтового склона на основании установленных закономерностей изменений деформационных и прочностных свойств присклоновых лессовых массивов при различных условиях нагружения. Основная цель работы для объекта по ж/м "Тополь" – обоснование первоочередных мероприятий по предупреждению и ликвидации локальных техногенных угроз развития оползневых процессов.

Экспериментально обоснованы закономерности ослабления структурной устойчивости лессовых пород. Впервые установлено, что анизотропия лессового массива подвергается инверсии вследствие техногенного влияния фильтрационных и деформационных процессов в присклоновых областях при девиаторе напряжений 150 – 200 кПа, что приводит к активизации процессов глубинной эрозии в лессовых породах и провоцирует оползни течения (оползень 1997 г. на ж/м Тополь-1), при этом значения коэффициента



фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях отличаются до 9 раз.

Разработана и адаптирована численная гидродинамическая модель техногенно нагруженного лессового массива территории ж/м "Тополь". Решением вариантного ряда нестационарных обратных задач сформирована полная ретроспективная картина динамики формирования уровня режима подземных вод, что позволило установить основные факторы его формирования. Определены наиболее опасные зоны развития негативных инженерно-геологических процессов.

Обоснована методика оценки устойчивости, базирующаяся на учете энергетических и гидродинамических параметров и адаптированная для решения задач устойчивости лессовых пород в техногенно нарушенном массиве. Основным параметром, определяющим оползнеопасность лессового массива, является потенциал активации склона, который в стадии активизации оползневой процесса находится в диапазоне 0,08...0,09 и является критическим.

На основании результатов решения прогнозных гидродинамических задач в синтезе с предложенной методикой оценки устойчивости массива разработаны рекомендации (первоочередные и долгосрочные) по инженерной защите застроенных территорий ж/м Тополь:

- проведение инженерно-технического мониторинга с периодичностью обследования дважды в год, содержащего оценку состояния поверхностного стока, ливневой сети, наличия искусственных водосборных воронок и оврагов в рельефе, и данных относительно появления суффозионных конусов выноса, а также интенсификации деформаций на зданиях различного назначения;
- прекращение любых строительных и земляных работ, которые замедляют поверхностный сток и разгрузку воды в тальвеги балок Встречная и Тополиная, формируют водосборные воронки и овраги;
- инженерно-технический контроль и поддержание геотехнического состояния гаражных кооперативов;
- составление и реализация проекта ремонта (или реконструкции) водокоммуникационных сетей с ликвидацией искусственных водопоглощающих воронок и оврагов в рельефе в направлении от зоны дренирования к водоразделу.

Выводы комиссии.

1. По результатам численного математического моделирования гидродинамических процессов установлены количественно доли влияния природной и техногенной составляющей на формирование гидро-геологического режима подземных вод исследуемой территории.

2. Определены зоны по геотехническим условиям их устойчивости, выделенные на основании анализа уровня деформационных повреждений зданий и интенсивности развития негативных инженерно-геологических факторов.





## Приложение Б

"Утверждено"  
 Глава правления ОСМД ЖК "Славный"  
 Островский А.Е.  
 г. Днепропетровск



" 4 " травня 2015 г.

## АКТ

**об использовании результатов научно-исследовательской работы  
 "Обоснование параметров гидрогеомеханической устойчивости лессовых  
 массивов с учетом их генезиса и энергетических характеристик"**

В рассмотрении материалов работы участвовали: глава правления ОСМД ЖК "Славный" Островский А.Е., директор ОСМД ЖК "Славный" Деревянко Р.В., ГИП ООО ПИ «Днепропроектстальконструкция» Павлыга Д.А., д.т.н., проф. каф. ГГИГ ГВУЗ "НГУ", проф. Садовенко И.А., асс. каф. ГГИГ ГВУЗ "НГУ" Деревягина Н.И.

Принята к сведению информация проф. Садовенко И.А., асс. Деревягиной Н.И., главного инженера проекта Павлыги Д.А. о применении результатов научно-исследовательской работы "Обоснование параметров гидрогеомеханической устойчивости лессовых массивов с учетом их генезиса и энергетических характеристик", выполняемой в рамках договора № 040830 от 01.10.2014 г. "Научно-техническое сопровождение работ по усилению оснований фундаментов жилого комплекса «Славный» (ул. Симферопольская, 11, г. Днепропетровск). Исследуемый участок №2". Работа посвящена обоснованию параметров устойчивости лессовых массивов с учетом их генезиса, энергетических и гидродинамических характеристик грунтового склона на основании установленных закономерностей изменений деформационных и прочностных свойств присклоновых лессовых массивов при различных условиях нагружения.

Экспериментальным путем обоснованы закономерности ослабления структурной устойчивости лессовых пород. Установлено, что анизотропия лессового массива подвергается инверсии вследствие техногенного влияния фильтрационных и деформационных процессов в присклоновых областях при девиаторе напряжений 150 – 200 кПа, что приводит к активизации процессов глубинной эрозии в лессовых породах, при этом значения коэффициента фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях отличаются до 9 раз. Получены средние значения массы выноса частиц, а также их гранулометрический состав для Приднепровского лессового суглинка. Т.о. исследование свойств лессового основания в режиме фильтрационных и геостатических нагрузок позволило существенно уточнить прогнозный механизм распространения тампонажной смеси и упрочнения грунта – инверсия фильтрационных свойств провоцирует эрозионный размыв и движение раствора по полостям гидроразрыва, а упрочнение происходит в виде компрессионного сжатия объема между этими полостями с неизбежной фазой активизации осадок здания.



Разработана и адаптирована численная гидродинамическая модель техногенно нагруженного лессового массива на основе конечно-разностной схемы. Сформирована полная ретроспективная картина динамики формирования уровня режима подземных вод, что позволило установить основные факторы его формирования.

Обоснована методика оценки устойчивости, базирующаяся на учете энергетических и гидродинамических параметров и адаптированная для решения задач устойчивости лессовых пород в техногенно нарушенном массиве. Показана целесообразность применения данной методики моделирования как наиболее достоверно отражающей механизм процесса оползнеобразования в лессовых массивах. Основным параметром, определяющим оползнеопасность лессового массива, является потенциал активации склона, который для условий территории ул. Симферопольской в стадии активизации оползневого процесса находится в диапазоне 0,08...0,09 и является критическим. Определены наиболее опасные зоны развития негативных инженерно-геологических процессов.

Результаты решения прогнозных гидродинамических задач, учитывающие закономерности формирования оползневых процессов, в синтезе с предложенной методикой оценки устойчивости массива, явились основой для принятия технических решений по ликвидации существующих деформационных процессов в основании жилого комплекса по ул. Симферопольская, 11.

Выводы комиссии.

1. Приняты корректирующие параметры значений укрепления основания зданий по ул. Симферопольская, 11 с учетом наличия полостей глубинной эрозии и гидроразрыва, которые соответствуют прогнозу на основании лабораторных экспериментов и моделирования.

2. Результаты укрепления основания снизили величину потенциала активации склона.

3. Инструментальные замеры осадок реперов свидетельствуют о прекращении деформации грунтового основания и склона.

Предотвращенный ущерб от дальнейшего развития деформаций по ул. Симферопольской (г. Днепропетровск) оценивается суммой в 2,5 млн грн.

Директор ОСМД ЖК "Славный"

ГИП ООО ПИ  
«Днепропроектстальконструкция»

Д.т.н., проф. каф. ГГИГ ГВУЗ "НГУ" проф.

Асс. каф. ГГИГ ГВУЗ "НГУ"



Р.В. Деревянко

Д.А. Павлыга

И.А. Садовенко

Н.И. Деревягина