

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Центр инженерного оборудования

(наименование кафедры)

08.06.01 Техника и технологии строительства

(код и наименование направлению подготовки)

Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов

(направленность (профиль))

**НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Разработка комплексной системы оценки и прогнозирования  
движения ливневых потоков на селитебной территории»

Аспирант

С.А. Анциферов

(инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.А. Селезнёв

(инициалы Фамилия)

(личная подпись)

**Допустить к представлению научного доклада**

Руководитель центра

И.А. Лушкин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

«16» августа 2024 г.

Тольятти 2024

## Оглавление

Введение .....	6
Глава 1 Исследование причин изменения объёма поверхностного стока .....	13
1.1 Особенности развития современного города.....	13
1.2 Климатические изменения, влияющие на увеличение поверхностного стока .....	18
1.3 Обзор методик расчета расхода ливневого стока.....	33
1.4 Обзор законодательных и нормативных документов в сфере водоотведения .....	38
Глава 2 Теоретические основы и методы расчёта ливневого стока .....	41
2.1 Основные направления исследования .....	41
2.2 Составление водного баланса.....	42
2.3 Характеристики поверхностного стока как дисперсной системы .	45
2.4 Расчёт испарения как одного из компонентов водного баланса при определении количества ливневого стока селитебных территорий.....	48
Глава 3 Моделирование и расчёт ливневого стока на селитебных территориях .....	53
3.1 Оценка распределения потока по цифровым моделям рельефа по базовому алгоритму .....	56
3.2 Расчёт поверхностного дождевого стока графоаналитическим методом .....	61
3.3 Программирование в среде LabVIEW виртуального ландшафта ..	68
Глава 4 Основные факторы, влияющие на формирование поверхностного стока.....	71
4.1 Влияние изменений ландшафта на формирование ливневого стока .....	71
4.1.1 Обследование территории муниципальных автодорог .....	72
4.1.2 Исследование территории Школы №10 .....	77

4.2 Определить коэффициенты покрова $z_i$ для наиболее характерных типов естественных поверхностей в г.о. Тольятти.....	85
4.3 Расчёт испарения как элемента водного баланса .....	95
Глава 5 Технико-экономическое обоснование применения результатов исследования.....	102
5.1 Расчёт экономической эффективности организации коммерческого учёта ливневого стока.....	103
5.2 Обоснование выбора типа средств измерения и комплектации узла учёта .....	108
5.3 Стоимость узла учёта ливневого стока.....	113
5.4 Оценка экономической целесообразности установки приборов учета .....	114
Заключение .....	120
Список используемой литературы и источников .....	124
Приложение А Список публикаций по теме диссертации .....	139
Приложение Б Фотоматериалы с объектов, на которых проводились натурные эксперименты (промышленная зона).....	141
Приложение В Фотоматериалы с объектов, на которых проводились натурные эксперименты (селитебная территория).....	144
Приложение Г Результаты расчёта и моделирования направлений поверхностного стока .....	146

## Принятые сокращения и обозначения

Обозначения в расчётах количества осадков:

$q_{20}$  – интенсивность дождя для данной местности продолжительностью 20 мин. при  $P = 1$  год;

$m_r$  – среднее количество дождей за год;

$\gamma$  – показатель степени;

$P$  – период однократного превышения расчетной интенсивности дождя.

$Q$  – расход воды м<sup>3</sup>/с;

$C_u$  – переводной коэффициент, для приведенных единиц измерения;

$C$  – коэффициент стока, безразмерная величина;

$I$  – интенсивность дождя, мм/мин;

$F$  – площадь водосбора, га.

$P_{tot}$  – общее количество атмосферных осадков, выпавших в дождь, мм;

$t_d$  – длительность дождя, мин

Обозначения в расчётах объёма ливневого стока:

$z_{mid}$  – среднее значение коэффициента, характеризующего поверхность бассейна стока;

$t_r$  – расчетная продолжительность дождя, равная продолжительности протекания дождевых вод по поверхности и трубам до расчетного участка.

$Q_{oc}$  – объём воды, поступающей с осадками на определённую территорию;

$Q_{cm}$  – объём воды поступающей в систему ливневой канализации;

$Q_{uc}$  – объём испаряющейся воды, в том числе и поглощаемую растениями;

$Q_{\phi}$  – объём воды на фильтрацию в поверхности водотока;

$\delta$  – невязка или поправочный коэффициент.

Обозначения в расчётах испарения:

$E$  – норма годового испарения, мм/год;

$E_0$  – испаряемость;

$x_0$  – норма годовых осадков

$E_0$  – максимально возможное испарение в данной местности при существующих в ней атмосферных условиях;

$k$  – коэффициент недоучета осадков, измеряемых с помощью осадкомера;

$W_1$  и  $W_2$  – влагозапасы метрового слоя почвы на начало и конец расчетного периода;

$n$  – параметр, характеризующий расчлененность рельефа.

$E_1$  – упругость насыщения, (гПа);

$e_0$  – парциальное давление водяного пара в воздухе, (гПа);

$D$  – удельная всасывающая сила атмосферы 0,14 мм/(гПа×сут).

$i$  – продольный уклон дна канала;

Обозначения в расчётах для построения профиля потока:

$\omega$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;

$C$  – коэффициент Шези, м /с;

$R$  – гидравлический радиус, м;

$B$  – ширина потока по верху, м;

$g$  – ускорение силы тяжести, м<sup>2</sup>/с;

$l$  – длина участка, м;

$h_0$  – нормальная глубина, м;

$h_k$  – критическая глубина, м;

$K$  – модуль расхода, м<sup>3</sup>/с;

$K_i$  – расходная характеристика, м<sup>3</sup>/с;

$\chi$  – длина смоченного периметра, м;

$\alpha$  – коэффициент пропорциональности

$Fr$  – число Фруда

$\eta_1, \eta_2$  – относительные глубины соответственно в первом и во втором сечениях, м;

$B(\eta_1), B(\eta_2)$  – функции Бахметева;

$j_{cp}$  – коэффициент пропорциональности.

## Введение

Актуальность темы исследования. В последние годы климат нашей планеты претерпевает значительные изменения, которые вызывают серьезные последствия для окружающей среды и общества. Эти изменения связаны как с человеческой деятельностью, так и с естественными геологическими и климатическими процессами [35, 97].

С одной стороны, человеческая деятельность, особенно в сфере промышленности, энергетики и транспорта ведёт к непрерывному увеличению выбросов парниковых газов, которые способствуют глобальному потеплению и, в свою очередь, вызывает повышение температуры воздуха, таяние ледников и изменение глобальных погодных условий, что отмечается как отечественными, так и зарубежными исследователями [102, 113, 110].

С другой стороны, существуют естественные процессы, такие как сейсмическая и вулканическая активность, солнечные циклы и возмущение магнитного поля, которые также влияют на климат. Однако, несмотря на то что эти процессы не зависят от человека, они могут усиливать эффект от антропогенного воздействия.

Таким образом, перед нами стоит серьезная проблема: как защитить население, производственную и транспортную инфраструктуру от негативных последствий изменения климата? Для этого необходимо постоянно изучать, моделировать и прогнозировать происходящие природные явления, а также разработать новые стратегии и технологии, которые позволят адаптироваться к изменяющимся условиям.

В целом, изменения климата представляют собой серьезный вызов для человечества. Но благодаря совместным усилиям ученых, инженеров и общественности мы можем найти решения, которые помогут нам справиться с этой проблемой и обеспечить устойчивое будущее для всех.

Одной из таких стратегий может стать создание устойчивых селитебных территорий, которые смогут функционировать даже в условиях экстремальных

погодных явлений. Это включает в себя использование возобновляемых источников энергии, эффективное управление водными ресурсами и разработку новых материалов, способных выдерживать климатические нагрузки [69, 19, 24].

Одним из наиболее важных аспектов является разработки новых методик исследования и расчёта инженерных коммуникаций и, в частности, ливневой канализации. Оптимизация структуры существующих систем ливневой канализации начиная с поверхностного стока и транспортировки до очистных сооружений позволит снизить риск затопления и повреждения городской инфраструктуры в периоды сильных дождей.

Начинать необходимо с анализа текущих параметров системы, выявить слабые места и разработать план модернизации. Следует обратить внимание на внедрение инновационных технологий, таких как автоматизированные системы расчёта потоков воды, так и организация рационального распределение поверхностного стока, что сможет значительно повысить эффективность работы ливневой канализации.

Степень разработанности темы исследования. Основоположниками расчётов дождевых стоков являются отечественные учёные П.Ф. Горбачёв, Белов Н.Н., Надысев В.С., Молоков М.В., Шигорин Г.Г. Бефани Н.Ф. основные идеи изложены в [1, 15, 64, 60, 95, 51].

Последние десятилетия отмечены результатами крупных исследований улучшению функционирования городской ливневой канализации, систем очистки и исследований особенностей климата селитебных территорий. Весомый вклад в научную разработку данной тематики внесли российские учёные: В.И. Кичигин, М.В. Молоков, В.Н. Шифрин, Л.С. Алексеев, М.Г. Журба, Ж.М. Говорова, О.Б. Говоров [1, 29, 37, 47, 60] авторы монографий, учебников и справочников. В их работах приведены результаты современных научных исследований и разработок по теме ливневой канализации. Затрагиваются вопросы изменения климата, приводящие к изменению режима поверхностного стока. Статьи, опубликованные за последние годы посвящены проблемам изменения климата, путям развития современных городов и коммунального

хозяйства [87, 88, 2].

В литературных источниках также уделено внимание особенностям климата и формирования поверхностного стока в городах Поволжья [10, 14, 91, 31, 23].

Однако, остаётся ряд нерешённых проблем, связанных с необходимостью определения точного количества поверхностного стока дождевых и талых вод. Поскольку прямые измерения применять нельзя, счётчик на дождевую тучу не поставишь. Остаётся метод косвенных измерений и расчёт. Особенностью водоотвода на селитебной территории можно отметить, что дождевые и талые воды стекают по разнородным поверхностям – грунту с растительным покровом, асфальтированному покрытию и кровлям зданий, по естественному уклону местности до открытых водосборных каналов, вдоль бордюров дорог, а потом через дождеприемники поступают в закрытую систему ливневой канализации.

Некоторые исходные элементы определяются из эксперимента или в процессе длительных наблюдений, например, количество выпавших осадков по данным метеослужбы. Площадь и рельеф исследуемого участка вычисляется по топографической съёмке.

Практически не отражён в рассмотренных литературных материалах способ решения вопроса определения фактического поверхностного стока с определённой территории и количество воды, попадающей в дождеприёмники.

Основным направлением диссертационной работы стало создание алгоритма расчёта объёма фактического поверхностного стока с учётом основных составляющих водного баланса: количество выпавших осадков; расходом на испарение, инфильтрацию; остатка, отправляющегося в дождеприёмник.

Результат настоящей работы нацелен на повышение экономической эффективности при расчётах между абонентами и энергоснабжающими организациями, что позволит более эффективно эксплуатировать и прогнозировать работу ливневой канализации, снизит вероятность подтопления территорий, особенно городских дорог и, в целом, повысит урбанистический

комфорт в городах.

Объект исследования: селитебная территория г. Тольятти.

Предмет исследования: объём поверхностного стока, поступающего в городскую ливневую канализацию

Цель: Разработка комплексной системы расчёта и прогнозирования движение ливневых потоков по городской территории на основании цифровой модели для снижения угрозы затоплений и повышения безопасности городской среды, а также для коммерческих расчётов между абонентами и ресурсоснабжающими организациями.

Задачи исследования:

- провести анализ действующей методики расчёта ливневого стока, выделить недостатки и пути их устранения;
- выделить перспективные теоретические, расчётные методы составления водного баланса;
- рассмотреть алгоритмы и расчётно-графические программные комплексы для автоматизации расчётов;
- определить значимость основных компонентов для повышения точности расчёта ливневого стока;
- произвести оценку экономической эффективности внедрения узла учёта ливневого стока.

Научная новизна заключается в разработке алгоритма расчёта фактического ливневого стока на основании результатов натурных экспериментов и математического моделирования. Предложен способ выбора исходных данных для составления водного баланса территории определённого абонента, на основании которого заключается договор на водоотведение.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- систематизированы сведения из разных отраслей знания (метеорологии, гидравлики, почвоведения), касающиеся расчёта и прогнозирования ливневых потоков. Предложено комплексного решения по моделированию движение ливневых потоков на основе натуральных и

цифровых экспериментов. Выявлены факторы, наиболее влияющие на точность моделирования потока (микрорельеф, коэффициент покрова, испарение);

- определён коэффициент покрова для характерных типов естественных поверхностей в г.о. Тольятти. предложен алгоритм расчёта испарения с различных поверхностей, который позволяет достаточно просто, вычислить среднюю величину испарения опираясь на метеоданные, что позволит внести поправку в расчёт среднегодового объёма дождевых вод;
- разработана и апробирована комплексная системы расчёта и прогнозирования движение ливневых потоков по городской территории для снижения угрозы затоплений и повышения безопасности городской среды на основании цифровой модели и натурных экспериментов (фактические результаты).

Методология и методы исследования. Теоретической основой и методологией исследования является адаптация существующих методик расчёта поверхностного стока к фактическим условиям современного города. Для проведения натурных экспериментальных исследований и измерений на исследуемых объектах применялась стандартные методики измерений и современная аппаратура. Использовалась действующая нормативно-техническая документация и научно-практические материалы. Полученные теоретические формулы и эмпирические уравнения сопоставлялись с опытными данными, полученными на реальных объектах. Результаты экспериментальных исследований обрабатывались с помощью расчётно-графических программ. Экспериментальные исследования проводились на 20 реальных объектах в рамках муниципальных контрактов и строительно-технических экспертиз.

Положения, выносимые на защиту:

- актуализация исходных данных для составления водного баланса в связи с климатическими изменениями и преобразованием селитебных территорий;

- системный подход, основанный на анализе микрорельефа с учётом экспериментально определённым коэффициентом стока, зависящим от гранулометрического состава почвы;
- алгоритм моделирования и расчёта объёма поверхностного стока с учётом сложности ландшафта селитебной территории и не стационарности погодных условий;
- верификация и валидация численных методов моделирования поверхностного стока на основе натуральных экспериментов;
- рекомендации повышению точности расчётов поверхностного стока, а также по устройству узлов учёта стока и оценке экономической эффективности внедрения данного энергосберегающего мероприятия.

Степень достоверности полученных результатов подтверждена сходимостью расчётных и фактических данных на действующих муниципальных объектах г. Тольятти. Эксперименты проводились с применением сертифицированного оборудования, обеспечивающего точность и воспроизводимость полученных результатов. Теоретическая часть работы основывается на опубликованных автором результатов, полученных в ходе эксперимента. Результаты исследований и полученные эмпирические зависимости использованы при проведении строительно-технических экспертиз в Союзе «Торгово-промышленная палата г. Тольятти».

Апробация результатов исследования. Результаты исследований были доложены на конференциях:

- III всероссийской научно-практической конференции. Природопользование и устойчивое развитие регионов России. Пенза, 2021. В сборнике: Природопользование и устойчивое развитие регионов России.
- II Национальной научно-практической конференции. Тольятти, 2023. В сборнике: Цифровые технологии: настоящее и будущее. сборник статей по материалам II Национальной научно-практической конференции. Тольятти, 2023.

- VI Всероссийской научной конференции с международным участием. Тольятти, 2023. В сборнике: Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения.

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в получении результатов, изложенных в диссертации, выполнении исследований и обработке исходных данных постановки, и планировании экспериментов по определению объёмов поверхностного стока на муниципальных объектах г. Тольятти. В подготовке публикаций и рекомендаций по использованию полученных результатов работы при эксплуатации ливневой канализации.

Область исследования соответствует требованиям пункта 12 паспорта научной специальности 1.2.4 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов».

Результаты работы внедрены в практику проведения экспертных исследований в Союзе «Торгово-промышленная палата г. Тольятти»; выполнении муниципальных контрактов по обследованию территории муниципальных автодорог (Муниципальный контракт № 556-дг/2.1 от 31.05.2022 г. на оказание услуг для нужд городского округа Тольятти.

Публикации по результатам исследований. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из которых: 1 – в журнале с индексацией SCOPUS; 5 – в журналах, включенных в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук». Список опубликованных работ (лично и в соавторстве) приведен в списке публикаций по теме диссертации (приложение А).

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 146 страницах машинописного текста, включает 42 рисунка, 15 таблиц и состоит из введения, 5 глав и заключения, списка литературы из 115 наименований, в том числе 17 на иностранном языке, 4 приложений.

# **Глава 1 Исследование причин изменения объёма поверхностного стока**

## **1.1 Особенности развития современного города**

Формирование современного города имеет свои особенности, которые отличают его от генеральных планов развития советского периода. Можно выделить некоторые особенности в формировании селитебных территорий первой половины 21 века. Города становятся все более урбанизированными в них увеличивается плотность населения, производств, стремительно развивается транспортная и коммунальная инфраструктура, что приводит к росту требований по комфорту и экологическим проблемам. Современный город активно использует новые технологии для улучшения качества жизни, например, системы умного города позволяют управлять городскими службами более эффективно, а также технологии для мониторинга и управления трафиком, распределением энергоресурсов и коммунальных услуг, экологическими показателями, городская среда становится все более многофункциональной, что ведёт к изменению ландшафта и микроклимата на застроенной территории включать в себя торговые центры, офисные здания, жилые комплексы, образовательные учреждения, медицинские центры, наметилась тенденция выноса крупных промышленных предприятий на пределы жилой застройки. Перечисленные факторы способствуют значительной трансформации городского ландшафта, локальным изменению микрорельефа и характера поверхности, увеличивается асфальтированная или иная с твёрдым покрытием площадь, уменьшается грунтовые и травянистые участки, что приводит к необходимости учитывать такие изменения при расчёте поверхностного стока.

Современные города характеризуются быстрым развитием, ключевым аспектом которого является совершенствование коммунальной инфраструктуры, которая включает в себя системы водоснабжения,

канализации, в том числе и ливневую, электроснабжения, теплогазоснабжения и другие компоненты, необходимые для обеспечения комфортного проживания горожан, что находит отражение в Муниципальной программе «Формирование современной городской среды на 2018 - 2030 годы», утверждённой Постановлением администрации городского округа Тольятти № 4013-п/1 от 11.12.2017; «Стратегии развития городского округа Самара до 2025 года».

При развитии коммунальной инфраструктуры одной из основных задач является модернизация существующих систем и внедрение технологий, позволяющих повысить эффективность их работы и снизить эксплуатационные расходы. Важно учитывать возрастающие потребности населения к уровню комфорта при развитии коммунальной инфраструктуры. Зачастую наблюдаются проблемы с доступом к определённым видам энергоресурсов, в частности к водоотведению, особенно в удалённых районах. Отсюда возникает необходимость разрабатывать планы по развитию селитебной территории для обеспечения равного доступа к этим ресурсам для всех жителей города. Развитие коммунальной инфраструктуры должно быть интегрировано с другими задачами городского планирования.

В настоящее время в Самарской области благодаря программе формирования комфортной городской среды национального проекта «Формирование комфортной городской среды» в рамках Государственной программы Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильём и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» реконструируется и возводится новое жильё, развивается городская территория и коммунальная инфраструктура.

В целом, совершенствование коммунальной инфраструктуры является важным шагом на пути создания благоприятных условий для жизни в современном городе [58]. Однако это требует значительных инвестиций и тщательного планирования для обеспечения эффективной работы систем и удовлетворения потребностей населения.

За 60 лет очень сильно изменился ландшафт г. Тольятти, что роднит

его с бурным развитием других городов Поволжья. Аналогичную ситуацию можно проследить в городах Балаково, Димитровград, Нижнекамск, Набережные Челны, Новокуйбышевск и некоторых других, где в 60 – 70 годы начался бурный рост крупных промышленных объектов [14]. Ниже приводятся ретроспективные сведения о развитии селитебной территории Центрального района г. Тольятти (рисунок 1), [27]. В этом материале интерес представляет изменение площадей зелёных насаждений и поверхностей с твёрдым покрытием за период с 1952 по 2020 годы (рисунок 1).

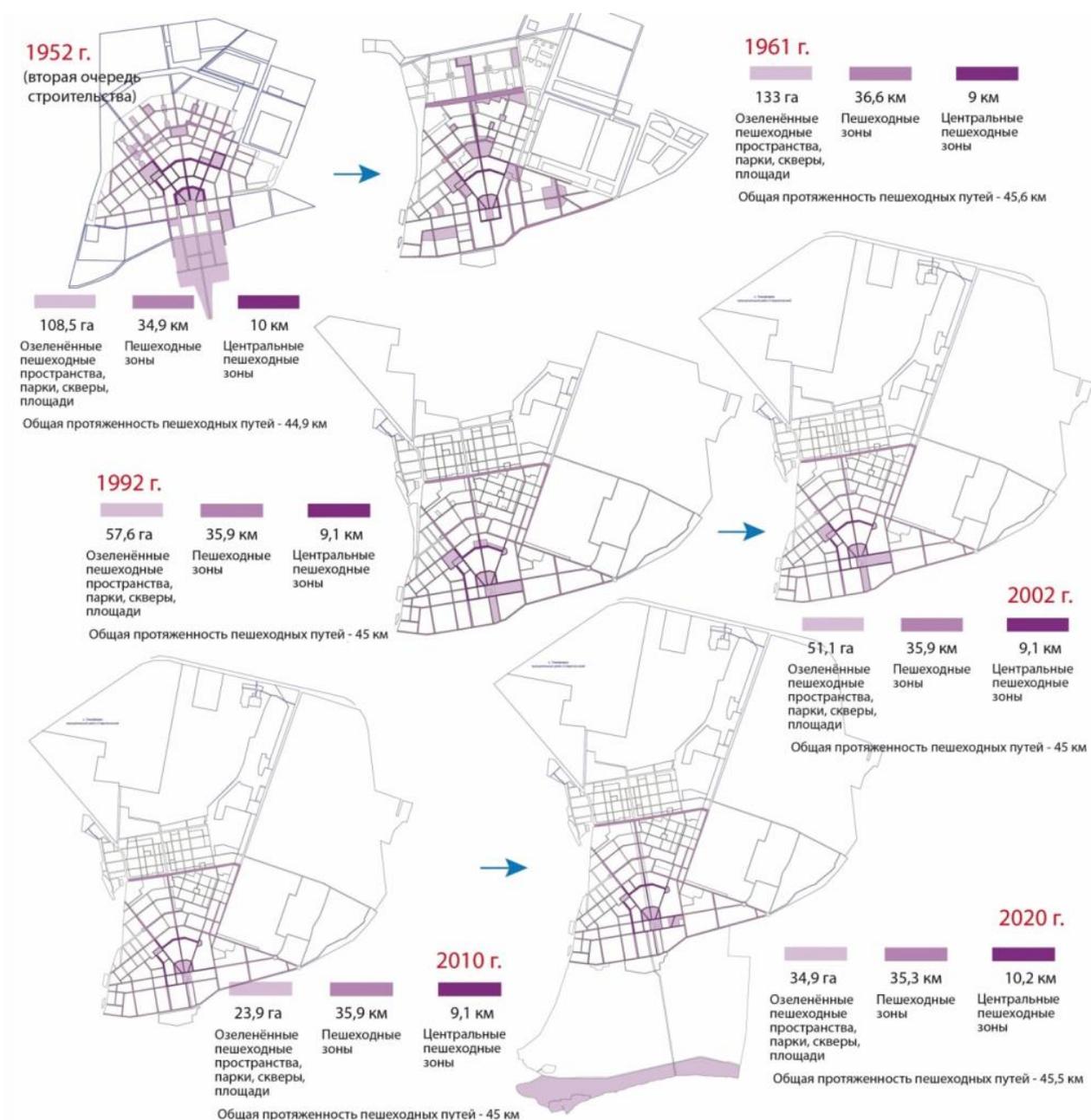


Рисунок 1 – Распределение зелёных насаждений за период с 1952 по 2020 годы в центральном районе г. Тольятти

Как видно по рисунку с 1961 года площадь озеленения пешеходных пространств неуклонно снижалась и лишь в последние года наметилась тенденция на увеличение, однако площадь зелёных насаждений прирастает, в основном за счёт благоустройства набережных и лесопарковых участков (рисунок 2). Селитебная территория по-прежнему покрывается твёрдыми поверхностями, это не только расширение дорог и тротуаров, увеличение парковок, но и кровли новых зданий, возводимых при уплотнении застройки. Как показывают исследования автора, в Центральном районе г. Тольятти достаточно много (до 35%) кровель сбрасывают дождевую и талую воду на отмостку. Крупные жилые и общественные здания, построенные в 70-х годах, и позже сбрасывают ливневый сток в хозяйственно-бытовую канализацию (К1) [26].

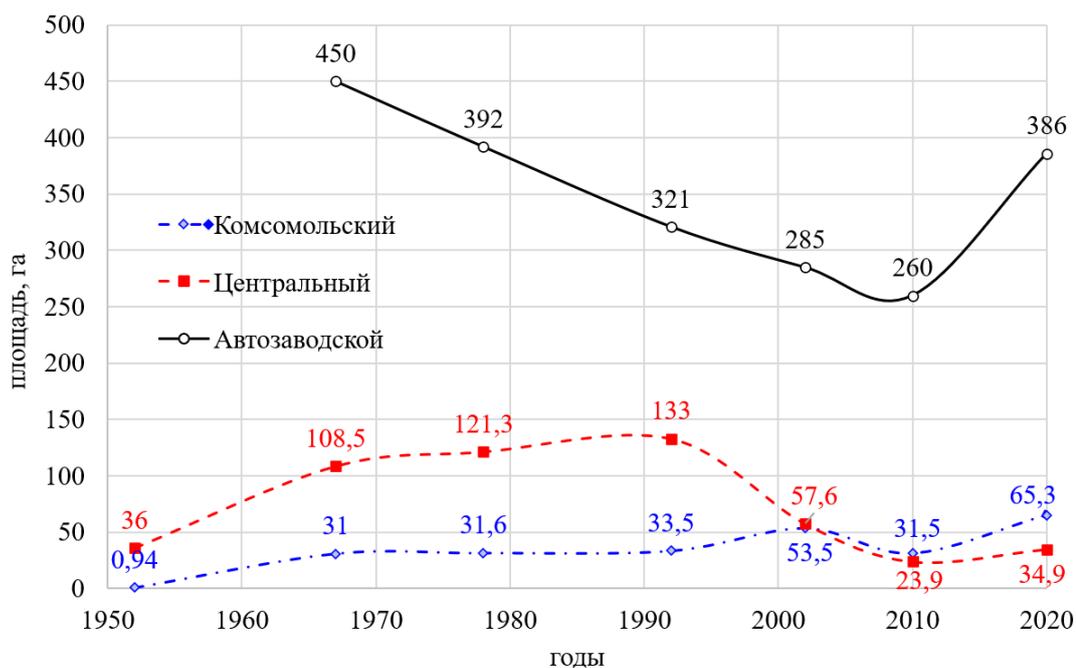


Рисунок 2 – Изменение площади зелёных насаждений с 1952 по 2020 годы «Ключевыми показателями особенностей городской застройки, в соответствии с действующей на настоящий момент нормативной базой в области градостроительства, являются:

- коэффициент застройки (или процент застройки территории, %);
- коэффициент плотности застройки (или общая площадь застройки,  $m^2/га$ ), характеризующие предельно допустимый строительный объем зданий и сооружений.

Международный опыт градостроительства предлагает применение следующих параметров характеристик застройки селитебных территорий:

- FSI – коэффициент плотности застройки (floor space index-FAR);
- GSI – коэффициент застройки (ground space index);
- OSR – индекс открытого пространства (open space ratio);
- L – количество этажей (number of floors) [107].

В отечественной практике сложилось следующее соответствие:

- коэффициент застройки идентичен показателю GSI;
- коэффициент плотности застройки идентичен показателю FAR.

Измерение перечисленных выше количественных градостроительных характеристик:

- коэффициент плотности застройки –  $K_{пз}$  (FAR);
- коэффициент застройки –  $K_z$  (GSI);
- индекс открытого пространства (OSR);
- показатель функциональной насыщенности –  $K_{фн.}$ » [74].

Изменения этих показателей с 1804 по 2012 г. и прогноз до 2025 г. на примере развития центральной части г. Самары, приведены на рисунке 3 по данным из таблицы 1. В исследуемом районе расположена жилая застройка, которая более точно иллюстрирует процесс развития селитебной территории [31].

Таблица 1 – Показатели характеристик застройки в период с 1804 до 2025 г.

годы	коэффициент плотности застройки $K_{пз}$	коэффициент застройки $K_z$	показатель функциональной насыщенности $K_{фн}$	индекс открытого пространства OSR
1850	0,52	0,38	0	1
1875	0,87	0,46	0,12	0,8
1900	1,08	0,52	0,47	0,6
1925	1,12	0,42	0,48	0,65
1950	1,26	0,25	0,46	0,7
1975	1,81	0,4	0,44	0,5
2000	3,76	0,53	0,43	0,3
2025	4,22	0,55	0,42	0,1

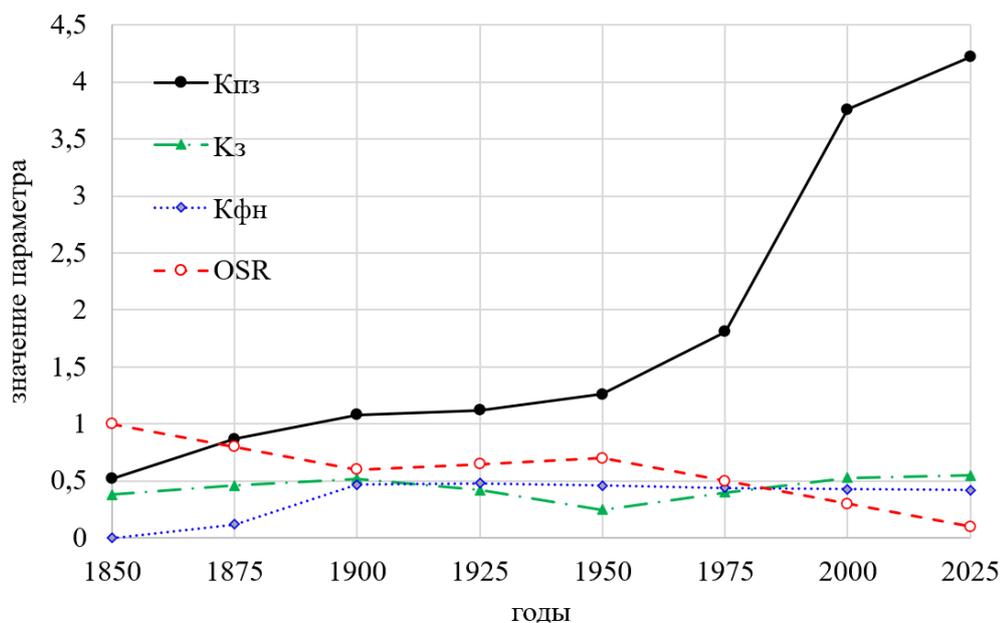


Рисунок 3 – Развитие селитебной территории центральной части г. Самары

Изменения городского ландшафта, происходящие за последние десятилетия в крупных индустриальных центрах Поволжья, требуют более детального изучения ключевых аспектов для расчёта поверхностного стока. В частности, особенности формирования микроклимата в жилой и промышленной застройке; формирование микрорельефа и влияние его на движение ливневых и талых вод; распределение и характер поверхностных покрытий (водопроницаания, испарения, накопления дождевой воды). Полученные, уточнённые сведения предлагается учитывать при проектировании и коммерческих расчётах поверхностного ливневого стока. Основным документом, который регламентирует развитие территориального планирования муниципального образования является «Генеральный план городского округа Тольятти на расчётный срок до 2025 года», утвержденный решением Думы городского округа Тольятти от 02.03.2011г. № 480.

## 1.2 Климатические изменения, влияющие на увеличение поверхностного стока

В последние годы проблемы изменения климата как в глобальном масштабе, так и в России привлекают внимание не только учёных, но и

представителей разных слоёв общества. Для инженерного сообщества, работающего в сфере строительства, ЖКХ, энергетики и транспорта эти проблемы особенно актуальны, т.к. жизнеобеспечение городов ложиться на их плечи. Погодные катаклизмы, наблюдаемые в последнее время приводят к многочисленным авариям, катастрофам и причина тому изменение климата в масштабах планеты. Оценка глобальных и региональных погодных изменений является областью изучения метеорологии и смежных наук. Однако, для прогнозирования работы инженерных систем, в частности ливневой канализации, информация о погоде очень важна, поскольку даже в названии системы есть метеорологический термин «ливневая».

Поэтому необходимо изучить основы формирования и выпадения осадков, а также других метеорологических явлений, способы их измерений и каким образом применять эти данные для составления водного баланса при расчёте поверхностного стока.

Историческая справка.

Одной из самых значимых работ в отечественной климатологии является Климатологический атлас Российской империи, составленный в 1900 году сотрудниками Главной физической обсерватории под руководством гидрометеоролога, члена ИРГО Михаила Александровича Рыкачёва (1840 – 1919).

«В атласе содержится информация о разнообразных климатических характеристиках: атмосферном давлении, температуре воздуха, влажности, облачности и других. Данные представлены в виде карт и графиков. Особенно стоит отметить карты путей циклонов и типов погоды, которые по замыслу автора являются не только справочным, но и учебным материалом для будущих метеорологов» [27].

Информация опубликованных атласов не теряет актуальности и в наше время, поскольку благодаря знаниям о климате прошлого можно прогнозировать его будущие изменения. Современная ситуация с изменением климата ставит перед человечеством огромное количество

проблем. Резкое увеличение выброса парниковых газов в атмосферу приводит к глобальной перенастройке всего климатического механизма.

«Первой обобщающей работой по климату региона явилась монография Н.В. Колобова, в которой с использованием 25 метеостанций дано комплексное описание температурно-влажностного режима в период 1901–1962 гг. При этом полученные результаты не относятся к периоду активной фазы потепления климата, начавшейся с середины 1970-х гг. В этой работе не давалась оценка вклада глобального фактора в региональные процессы, а также макромасштабных циркуляционных потоков» [48]. «В более современной монографии – «Климат и окружающая среда Приволжского федерального округа» (2013 г.)– на основании данных 186 метеостанций представлено описание климатических процессов в более поздний период (1966–2009 гг.), что позволило учесть влияние глобального потепления на динамику температуры и атмосферных осадков в регионе» [67]. «Однако не была сделана оценка будущих изменений климата. В настоящей статье впервые дан анализ процессов за наиболее длительный период (с 1828 по 2021 г.) в регионе на фоне происходящих процессов в Северном полушарии, что позволило оценить вклад макромасштабных факторов в региональные изменения, а также выделить долгопериодные колебания температуры. Кроме того, с использованием проекта CMIP6 оценены изменения температуры до конца XXI в.» [68].

Парниковый эффект. Существование парникового эффекта было открыто Жозефом Фурье в 1824 году. Данный факт и доказательства были еще более закреплены Клодом Пуье в 1827 и 1838 годах и обоснованы экспериментальными наблюдениями Джона Тиндаля в 1859 году. Этот эффект был полностью оценён Сванте Аррениусом в 1896 году. Однако термин «парниковый» не использовался для описания эффекта ни одним из этих ученых; впервые этот термин был использован Нильсом Густавом Экхольмом в 1901 году [98].

Тем не менее, следует отметить, что парниковые газы играют

важнейшую роль в сохранении на Земле температуры, подходящей для жизни. К наиболее активным парниковым газам принято относить не только углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), но и водяной пар, оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), синтетические парниковые газы. Без естественного парникового эффекта средняя температура на планете составила бы около минус  $20^\circ\text{C}$  вместо нынешних около плюс  $15^\circ\text{C}$ .

«Энергетический баланс Земли с комфортной для многочисленных видов живых организмов температурой был нарушен с началом промышленной революции. Люди начали активно сжигать ископаемое топливо, что привело к масштабному выбросу углекислого газа и других парниковых газов в атмосферу. Десятилетиями уровень  $\text{CO}_2$  в атмосфере растет, удерживает лишнее тепло у поверхности Земли, что вызывает общее повышение температуры» [50]. «С 1970 по 2004 год выбросы парниковых газов увеличились на 70%. Выбросы углекислого газа за этот период выросли на 80%. Количество тепла, которое эти газы могут поглощать и переизлучать, метан в 23 раза, а оксиды азота в 296, синтетические парниковые газы > 1000 раз больше, чем углекислый газ. Но  $\text{CO}_2$  в атмосфере гораздо больше, поэтому он является основным парниковым газом, способствующим усилению парникового эффекта (рисунок 4)» [50]. «Источниками метана в природе являются водно-болотные угодья, тундра, океаны и их донные отложения. Это около 36% выбросов. Остальная часть – это свалки, животноводство, рисоводство, производство и использование ископаемого топлива» [21]. «Водяной пар является существенным природным парниковым газом в атмосфере и серьезно влияет на климат и водные ресурсы. На тропосферный озон, по оценкам ученых, приходится треть вклада в потепление, вызванного прямыми парниковыми газами, со времен промышленной революции. Синтетические парниковые газы долговечны и очень хорошо поглощают солнечную радиацию. Например, хлорфторуглероды могут оставаться в атмосфере более 100 лет и оказывать в несколько тысяч раз более мощный "согревающий" эффект, чем углекислый газ» [21].



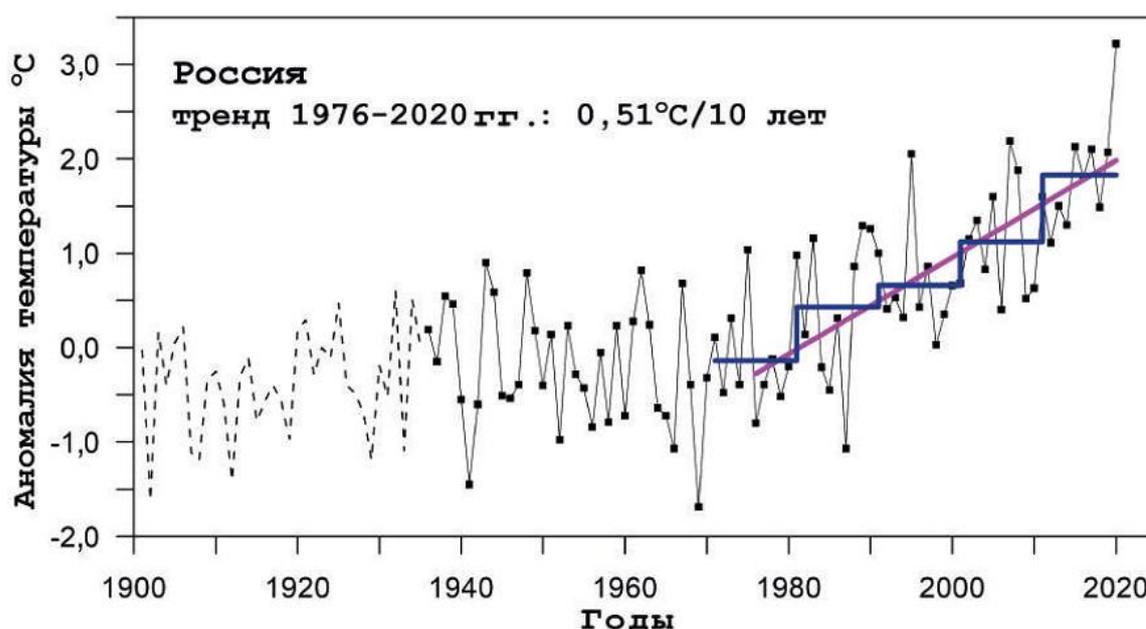
Рисунок 4 – Процент антропогенных парниковых газов в выбросах

«По данным Всемирной метеорологической организации, в течение большей части последних 800 тысяч лет концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере Земли составляла примерно от 200 до 280 частей на миллион, но в 2013 году она превысила 400 частей на миллион. В 2023 году концентрация  $\text{CO}_2$  выросла до более чем 420 частей на миллион, что на 50% превышает показатель доиндустриального уровня. С ростом выбросов метана и других парниковых газов к 2100 году средняя температура у поверхности нашей планеты может увеличиться на  $4,8^\circ\text{C}$  по сравнению с доиндустриальным уровнем. На рисунке 5 показан процент поступления парниковых газов в атмосферу по отраслям промышленности» [93].



Рисунок 5 – Процент поступления парниковых газов по отраслям промышленности

Основное воздействие парникового эффекта направлено на обширные климатические изменения на фоне устойчивого повышения температуры атмосферы в поверхностном слое. Проблема эта носит комплексный характер и требует не только всестороннего изучения, но и скорейшей разработки корректирующих мероприятий. Поскольку увеличение роста концентрации парниковых газов ведёт к повышению температуры возле поверхности земли, что подтверждается различными исследованиями [11]. На рисунке 6 показана динамика изменения температур в приземном слое в средней полосе России за период 1900 – 2020 г. жирной линией показано отклонение от среднегодовых температур, рассчитанных по 10-летним периодам. Эта линия даёт наглядное представление о возрастании среднегодовых температур и тенденцию к дальнейшему росту [92].



Показаны: среднегодовая аномалия относительно норм 1961-1990 г. (до 1936 г. – пунктир, из-за слабой освещенности данными наблюдений АТР); средние десятилетние величины за 1971-1980, ..., 2011-2020 г.; линейный тренд за 1976-2020 г.

Рисунок 6 – Изменения приповерхностной температуры на территории России в период с начала XX столетия

За последние 40 лет в среднем по планете температура повысилась на 0,6 С, площадь морского льда уменьшилась на 18%, а уровень моря поднялся примерно на 15 см. За период с 1950 г. по всему миру всё чаще наблюдаются

экстремальные погодные аномалии, в том числе и аномальные осадки, приводящие к катастрофическим затоплениям и разрушениям. Цифровые прогнозы оценивают с высокой вероятностью дальнейшие негативные изменения климата: значительные температурные аномалии; более интенсивные и обильные осадки; усиление ветров, вплоть до ураганов. Причём эти изменения коснутся регионов, с погодой относительно стабильной сегодня. Прогнозы оценивают эти изменения на десятилетия вперёд, при этом даже уменьшение выбросов парниковых газов уже сейчас, в ближайшем будущем не даст ощутимого результата. Наша планета большой, инерционный механизм, живущий по своим законам и человек не только не способен регулировать его, но и не в состоянии достаточно точно прогнозировать изменение климата на периоды, превышающие сотни лет [40].

На рисунке 7 показаны результаты прогнозирования выбросов парниковых газов в процентах от 1990 г. по РФ без учета естественного поглощения. Линия 1 показывает экстенсивный сценарий, без принятия, каких-либо мер по сдерживанию выбросов. Линия 2 – внедрение краткосрочных мер, сдерживающих выбросы. Линия 3 – снижение выбросов последующим выходом на стабильное значение, этот сценарий требует коренного изменения технологий и экологического мировоззрения человечества.

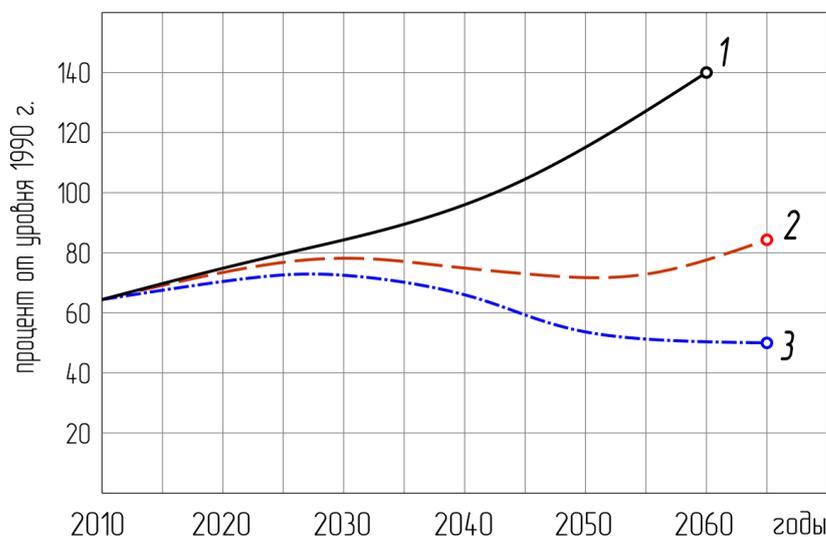


Рисунок 7 – Прогноз выбросов парниковых газов в процентах от 1990 г. Атмосферные осадки. «За период с 1991 по 2015 годы количество

опасных гидрометеорологических явлений увеличилось практически в два раза. Причем тенденция к росту наблюдается в климатических (экстремальные температуры, засухи) и метеорологических (шквалы, ливни, град, грозы, снегопады) категориях явлений. Максимальная повторяемость аномальных погодно-климатических явлений характерна для летних месяцев, минимальные значения наблюдаются в переходные сезоны. Основную опасность для России представляют сильный ветер и экстремальные осадки (25% и 26% соответственно). При этом если количество случаев экстремально сильных ветров за период исследования увеличилось не столь статистически значимо (5%), то увеличение количества экстремальных осадков превышает 25%. Из 580 погодных катаклизмов 2015 года 200 были связаны с сильными осадками (рисунок 8)» [39].

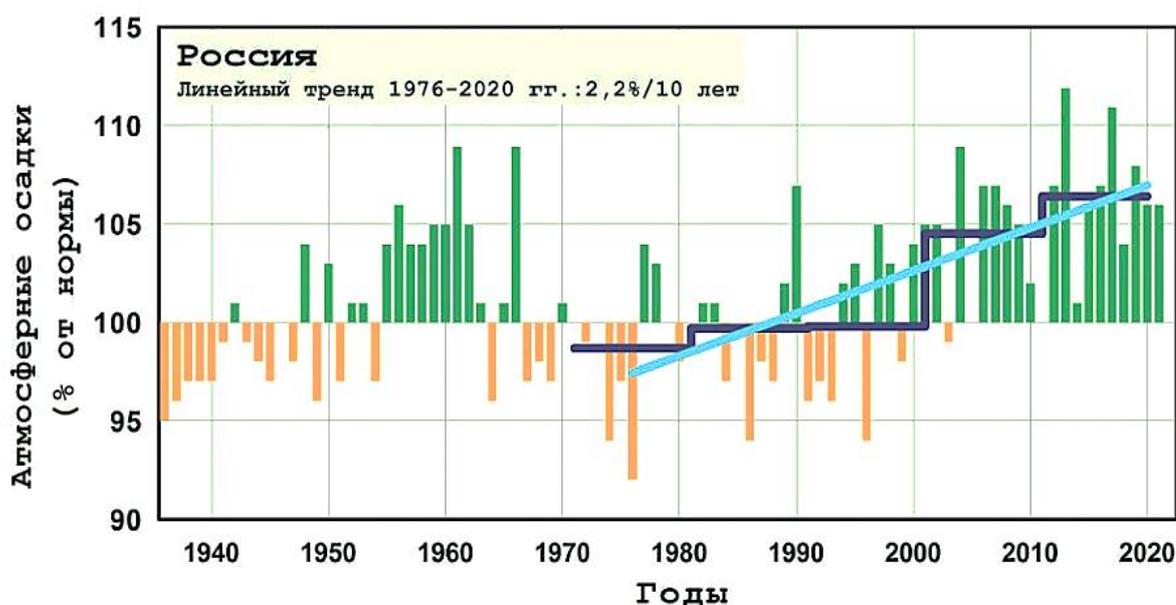


Рисунок 8 – Изменения годовых сумм осадков на территории Российской Федерации (в % от нормы 1961-1990 гг.). Показаны также десятилетние средние и тренд за 1976-2020 гг.

«Количество экстремальных осадков увеличилось по всей территории. При этом явно выделяется два периода: 1991-2003 и 2004-2015 г. В первом периоде количество экстремальных атмосферных осадков колеблется в пределах 100-200 явлений в год, в последующие годы количество явлений

значительно возросло, и находится в пределах 200-300 явлений в год. Прежде чем говорить об однозначном росте числа опасных осадков, необходимо установить, не связаны ли все описанные тенденции с отдельными производственными преобразованиями на сети метеостанций в последнее десятилетие. Для этого был составлен список из нескольких метеостанций, которые не закрывались в течение исследуемого периода, и проведено сравнение тенденций. В целом динамика к росту наблюдается в обоих случаях» [92].

«Для прогнозирования работы ливневых систем необходимо детальное изучение режима многолетних колебаний атмосферных осадков, которые испытывают значительные пространственные и временные изменения. Изменчивость связана с особенностями атмосферной циркуляции, физико-географическими особенностями и временем года. Эти факторы, действуя в тесной взаимосвязи, определяют особенности распределения осадков в пространстве и во времени как в течение года, так и от года к году» [53].

«По данным [62] определялись средние многолетние значения количества осадков за исследуемые периоды по месяцам и в целом за год. Отмечается хорошо выраженный годовой ход атмосферных осадков, с минимумами в марте в пределах от 18 до 32 мм и максимумами в июне от 54 до 70 мм для 1966–2013 гг. Для периода 2000–2013 гг. минимум наблюдается в феврале – 18 мм, а максимум в июне – 78 мм. В среднем по РТ за весь рассматриваемый период многолетняя годовая сумма осадков составляет 493 мм, в 2000–2013 гг. количество осадков увеличилось до 509 мм. Максимум осадков наблюдается на западе, а минимум на востоке» [62].

«Об изменчивости климата, в том числе и осадков, можно судить по частоте повторяемости аномальных периодов увлажнения – избыточно влажных и сухих. Год или период относился к избыточно влажному, если сумма осадков  $Q$  превышала 120% средней многолетней нормы ( $\sum Q \geq 120\%$ ), и к сухому, если сумма осадков составляла 80% и меньше от средней многолетней нормы ( $\sum Q \leq 80\%$ ). Аномалии осадков рассчитывались по

отношению к норме, вычисленной за весь исследуемый период – 1966-2013 г.» [62].

Погодные катаклизмы в Самарской области.

Засуха 1921 года. Весна 1921 года в Самарской губернии принесла небывалую засуху - уже в течение мая погибли озимые, яровые стали засыхать. Отсутствие дождей и появление саранчи, сожравшей остатки уцелевшего урожая, послужили причиной гибели к началу июля практически 100% посевов. Итог — голод, один из самых масштабных в истории России. География регионов, охваченных голодом, была очень широка. Юг Украины, Поволжье (от Каспийского моря до Удмуртии), Южный Урал, часть Казахстана.

Засуха 1975 года. Год был неурожайным практически на всей территории СССР, погибла почти вся пшеница, Советский Союз был вынужден закупить миллионы тонн хлеба в США, Канаде и Аргентине. В результате цены на хлеб во всем мире подскочили вдвое. В колхозах нечем было кормить животных. Во многих местах установили кордоны, колхозников, которые косили сено на сенокосах и везли домой, останавливали, разворачивали в сторону колхозных сенохранилищ и сопровождали до разгрузки. В итоге частникам кормить свою скотину было нечем пришлось пустить под нож.

Снегопад 1976 года. А для января средняя норма осадков в области составляет 33 миллиметра. В 1976 году за один январский день выпало почти в три раза больше месячной нормы осадков – 88 миллиметров. Снегопад и метели вызвали заторы на дорогах и сбои в режиме работы транспорта. В «Волжской коммуне» (главной областной газете в советское время) тогда опубликовали призыв к куйбышевцам – принять участие в городском субботнике. С лопатами на улицы города вышли около 30 тысяч жителей. Очищать город от снега пошли и рабочие с заводов имени Масленникова, 4 ГПЗ, металлургического и других. В помощь им выделили спецтехнику с предприятий истроек. За всю историю метеонаблюдений сильные снегопады

выпадали на долю областной столицы пять раз: в 1916, 1932, 1955, 1976 и 2008 годах.

40-градусные морозы 1979 года. В последние дни 1978 года на СССР из Арктики двинулся мощнейший антициклон, что привело к сильнейшему похолоданию на территории от Урала до Москвы. Особенностью похолодания было то, что наступило оно очень резко, за несколько часов, причем 31 декабря 1978 года. Метеослужбы сохранили данные этой ночи: Пермь – минус 47,10°С, Свердловск – минус 46,70°С, Куйбышев – минус 41,30°С. Резкое похолодание стало суровой проверкой на прочность для всех систем жизнеобеспечения региона. Так на тольяттинском «Куйбышевазоте» в новогоднюю ночь из-за размораживания оборудования произошёл взрыв в одном из цехов, погибло несколько человек. От ударной волны выбило все окна на соседней Тольяттинской ТЭЦ, возник риск полной остановки станции.

Весенний паводок 1979 года. Уровень воды в Волге у Самары поднялся до отметки 34,5 метра, что на 2,5 метра больше среднестатистического показателя. Это был самый крупный паводок за всю историю после зарегулирования стока Волги. Главной причиной паводка стала авария на одной из плотин на реке Кама. Под воду ушли нижний уровень самарской набережной и остров Поджабный. Жители Прорана перемещались от дома к дому на моторных лодках. После этого наводнения с острова исчезли все змеи, за исключением ужей.

Землетрясение в Нефтегорске 9 августа 1986 года. Толчки ощущались в радиусе 25 километров от города. На близлежащих нефтяных скважинах зафиксировали заметно увеличение отдачи нефти. Сила землетрясения равнялась 5 баллам из 12 по шкале Рихтера. Это самое сильное землетрясение в новейшей истории Самарской области.

Снегопад «имени Тархова» 2008 года. За три дня (23, 24, 25 января) выпало 65,3 мм осадков. Высота сугробов достигала 75 сантиметров и выше. Многие самарцы бросали машины прямо на дорогах и шли на работу

пешком. Застревавший общественный транспорт часто выталкивали из сугробов пассажиры. В школах отменяли занятия, люди массово опаздывали на работу. За сутки с улиц вывозили тысячи тонн снега. Но Самара все равно утопала в бесконечных пробках. Накануне, МЧС России предупредил об оранжевом уровне погодной опасности. По сообщению синоптиков, сильный снег в губернии принес Средиземноморский циклон.

Смерч в селе Андросовка 21 июля 2008 года. Сила ветра достигала 30-33 м/с. По словам очевидцев, смерч разбрасывал тяжелые автомобили и гаражи как игрушечные, и ломал деревья, как спички. Тяжелый КамАЗ ураган без труда подбросил в воздух и швырнул на несколько метров прямо на припаркованный легковой автомобиль. Около десятка домов лишилось крыши. Сильно пострадало здание сельской школы. В результате буйства природы село осталось без электроснабжения. По счастливой случайности обошлось без серьезных жертв. Пострадала только одна жительница села, ее ударил кусок шифера. Травма оказалась нетяжелой, и женщина от госпитализации отказалась. К счастью, смерчи подобной силы редки в наших краях.

Летняя жара 2010 года. В том году был зафиксирован исторический максимум температуры за всю историю метеонаблюдений. Столбик термометра в Самаре поднялся до +39,9°C. Летняя засуха 2010 года нанесла непоправимый ущерб сельскому хозяйству, а тольяттинцы до сих пор вспоминают бушевавшие лесные пожары. Половину Автозаводского района заволочло дымом, а над городом все лето носились пожарные самолеты и вертолеты.

Оползни в Ульяновске 1978 год. «Оползень — опасное природное явление, смещение масс горных пород по склону под воздействием собственного веса и дополнительной нагрузки вследствие подмыва склона, переувлажнения, сейсмических толчков и иных процессов. Такие явления возникают на склонах долин или речных берегов, в горах (рисунок 9)» [25].



Рисунок 9 – Оползни на склонах Волжского косогора в садах Железнодорожного района г. Ульяновска. 1978 год (архивные фото).

«Наиболее часто оползни возникают на склонах, сложенных чередующимися водоупорными и водоносными породами. Смещение крупных масс земли или породы по склону или клифу вызывается в большинстве случаев смачиванием дождевой водой грунта так, что масса грунта становится тяжелой и более подвижной. Силы трения, обеспечивающие сцепление грунтов или горных пород на склонах, оказываются меньше силы тяжести, и вся масса горной породы приходит в движение» [25].

Штормовой ветер и град в левобережных районах Саратовской области 2024 год. 30 июля, по территории левобережных районов Саратовской области пронесся штормовой ветер, а местами урожай побил градом. Это связано с тем, что над левобережными районами задержался на какое-то время холодный атмосферный фронт. Утром началась активная перестройка фронта атмосферного давления, которая определила стационаривание этого фронта. Он перестал двигаться и попал в параллельные потоки. Кучево-дождевая облачность формировалась в области фронта, с запада поступала более прохладная воздушная масса, а с востока более жаркая воздушная масса. Их встреча проходила по территориям левобережных районов.

Метеостанции фиксировали грозы и ливневые дожди. Пост в Мокроусе зафиксировал град и шквалистое усиление ветра. В Новоузенском районе в двух селах деревья повалены с обнажением корневой системы. Скорость ветра была, судя по всем 18-23, а локально может быть и 25 метров в секунду.

Ливень в Волгоградской области 17 мая 1996 года. «Самый мощный ливень за весь период наблюдений был зафиксирован в Волгоградской области 17 мая 1996 года. Тогда в Калаче-на-Дону всего за один час и сорок минут выпало 110 мм осадков при месячной норме в 38 мм. Затоплено 307 подворий, 120 домов получили повреждения до 10%, 56 домов – до 20%, 24 дома – до 30% (трещины в стенах, перекося, подмыв фундамента). У жителей города смыты огороды, погибли домашние животные. Разрушено 18 производственных помещений. Разрушена котельная городской детской библиотеки. В библиотеке погибла часть печатной продукции, само здание получило осадку» [68].

Смерч и град 17 июня 2000 года. «17 июня 2000 года над Рудней пронесся шквал с силой ветра более 35 метров в секунду. За 24 минуты выпало 33,5 миллиметров осадков, все сопровождалось градом, размером с куриное яйцо. По свидетельствам метеорологов, выпадали острые ледяные структуры, которые срезали все растения на полях и огородах. 70 домов остались без крыш, с корнем выворачивались деревья, были повалены опоры электроснабжения. Пронесся смерч, который поднимал и переносил крыши домов и туалеты через улицы. Смерч даже поднял в воздух пассажирский автобус. Чудом никто не пострадал» [68].

Сведения из метеорологии в части измерения количества осадков.

«Сезонное распределение и межгодовая изменчивость атмосферных осадков определяют состояние природных экосистем и обуславливают особенности хозяйственной деятельности человека в конкретном регионе» [52, 45, 96].

«Количество осадков измеряется с помощью осадкомера толщиной слоя жидкой воды (в миллиметрах), который мог бы образоваться после выпадения осадков на горизонтальную непроницаемую поверхность. измерение количества осадков производится при помощи осадкомера Третьякова» [52].

«На территории Поволжья осадки наблюдаются в виде дождя, мороси, снега, мокрого снега, крупы, града. В холодную половину года они в основном носят обложной характер – выпадают преимущественно из высоко-слоистых и слоисто-дождевых облаков и распространяются на больших площадях. Летом осадки чаще принимают ливневой характер – выпадают в неустойчивых воздушных массах из кучево-дождевых облаков, отмечаются локально и значительно варьируются по интенсивности. Также осадки могут носить морозящий характер, если выпадают из плотных слоистых и слоисто-кучевых облаков в устойчивых воздушных массах – в основном это наблюдается в осенние и зимние месяцы» [66]. «Согласно [82, 83] существуют следующие градации для жидких и твердых осадков (Таблица 2):

Таблица 2 – Градации жидких и твердых осадков, мм

Градации жидких и смешанных осадков		Градации твердых осадков	
Небольшой дождь	0,0–2	Небольшой снег	0,0–1
Умеренный дождь	3–14	Умеренный снег	2–5
Сильный дождь (неблагоприятное явление)	15–49	Сильный снег (неблагоприятное явление)	6–19
Очень сильный дождь (опасное явление)	$\geq 50$	Очень сильный снег (опасное явление)	$\geq 20$

Приведённая выше классификация применяется для характеристики погодных явлений и оценки мероприятий в случае возникновения чрезвычайной ситуации по отведению ливневого стока.

### **1.3 Обзор методик расчета расхода ливневого стока**

Основная задача гидравлического расчета ливневых водотоков в городских условиях заключается в определении диаметров труб для расчетных максимальных секундных расходов сточных вод, уклонов, потерь напора, скоростей течения и степени наполнения.

«Несмотря на то, что дождевые и общесплавные канализации строятся давно, научно обоснованные методы их расчета отсутствовали. Хорошо зарекомендовал себя на практике и до настоящего времени «рациональный метод» определения расчетных расходов, предложенный в 1851 г. ирландским инженером Мальвани, основанный на допущении, что любой водосбор имеет характерное время концентрации стока, равное времени добегания стока до замыкающего створа. По этому методу, используя данные об осадках в рассматриваемом районе, можно выбрать интенсивность ливня и перейти от нее к интенсивности стока на конкретном водосборе» [54].

«Нормативная методика гидравлического расчета систем водоотведения поверхностного стока, приведенная в современных нормативных и методических документах, реализуется в рамках разработанного около 100 лет назад профессором П. Ф. Горбачевым метода предельных интенсивностей, базирующегося на «теории ливней», которая в последующем была усовершенствована» [32]. «В своей работе П.Ф. Горбачев писал, что предложенный способ предельных интенсивностей исходит не из эмпирического подбора местных метеорологических данных для каждого проекта ливневой канализации, а из общего теоретического обоснования расчетов для всех случаев, позволяя охватить и учесть все многообразие местных и временных условий стока» [32].

Работы видных советских учёных [17] представляют результаты анализа образования и развития паводков в разных природных условиях. В них рассматриваются вопросы теории поверхностного, дренажного стока, русловой трансформации, а также математические модели и методы их реализации, основанные на использовании материалов наблюдений опорной сети, сточных станций и экспериментальных данных, при этом оценивается точность расчета при различном объёме исходных данных.

При этом в качестве исходных данных используются нормативные параметры дождей, определенные по результатам многолетних наблюдений несколько десятилетий назад. В связи с изменением климата очевидна необходимость актуализации местных климатических постоянных, но это не может быть реализовано в каждом регионе из-за отсутствия самопишущих дождемеров или по причине небольшого объема накопленной информации. Анализ, проведенный по данным метеостанций в нескольких регионах Поволжья, позволяет утверждать, что выявленные закономерности выпадения дождей за 5 лет не противоречат классической теории. При этом в интервале периодов однократного превышения  $p > 10$  лет их достоверность является самой высокой по сравнению с другими методами за счет более представительной выборки [18].

«В основе «рационального метода» лежит формула, связывающая величину стока со средней интенсивностью осадков для конкретной продолжительности времени концентрации и площадью водосборного бассейна:

$$Q = C_u \times C \times i \times A, \quad (1)$$

где  $Q$  – расход воды м<sup>3</sup>/с;

$C_u$  – переводной коэффициент, для приведенных единиц измерения,;

$C$  – коэффициент стока, безразмерная величина (значение данного коэффициента отражает влияние следующих факторов: тип грунта,

назначение земель, степень увлаженности грунтов, интенсивности  
дождя, крутизны склона водосбора);

$i$  – интенсивность дождя, мм/мин;

$A$  – площадь водосбора, га.

Интенсивность дождя вычисляется по формуле:

$$i = P_{tot} / t_d, \quad (2)$$

где  $P_{tot}$  – общее количество атмосферных осадков, выпавших в дождь, мм;

$t_d$  – длительность дождя, мин.

Метод определения максимального расхода основан на допущении, что любой водосбор имеет время концентрации стока, равное времени добегания стока до замыкающего сечения. Данное допущение положено в основу так называемого метода предельных интенсивностей, который формулируется следующим образом: расход сточных вод в рассматриваемом сечении будет иметь максимальное значение в том случае, когда продолжительность расчетного дождя равна или более времени протока сточных вод от наиболее удаленной точки площади стока до рассчитываемого сечения. Таким образом, из всего множества дождей, выпадающих на расчетную площадь стока, выбирается дождь такой продолжительности, которая равнялась бы  $t_r$ :

$$Q_r = (z_{mid} \times A^{1,2} \times F) / t_r^{1,2n-0,1}, \quad (3)$$

где  $z_{mid}$  – среднее значение коэффициента, характеризующего поверхность бассейна стока;

$A, n$  – параметры, характеризующие соответственно интенсивность и продолжительность дождя для конкретной местности;

$F$  – расчетная площадь стока, га;

$t_r$  – расчетная продолжительность дождя, равная продолжительности протекания дождевых вод по поверхности и трубам до расчетного участка» [87].

Параметры  $A$ ,  $n$  определяются по результатам обработки записей самопишущих дождемеров местных метеорологических станций или по данным территориальных управлений Гидрометеослужбы. При отсутствии обработанных данных свод правил допускает определять параметр  $A$  по формуле:

$$A = q_{20} \times 20^n (1 + \lg P / \lg m_r)^\gamma, \quad (4)$$

где  $q_{20}$  – интенсивность дождя для данной местности продолжительностью 20 мин. при  $P = 1$  год;

$n$  – показатель степени;

$m_r$  – среднее количество дождей за год;

$\gamma$  – показатель степени;

$P$  – период однократного превышения расчетной интенсивности дождя.

Географическое положение задает 4 исходных параметра расчета, а именно – интенсивность дождя  $q_{20}$ , среднее количество дождей за год  $m_r$ , показатель степени  $\gamma$  и параметр  $n$ . Оба метода определения максимального расхода «метод предельных интенсивностей» и «рациональный метод» основаны на допущении, что любой водосбор имеет время концентрации стока, равное времени добегания стока до замыкающего сечения.

«Согласно «рациональному методу», используя данные об осадках в рассматриваемом районе, можно выбрать интенсивность ливня и перейти от нее к интенсивности стока на конкретном водосборе. При этом, коэффициент стока учитывает тип грунта. Крутизна склона также влияет на время добегания и величину потерь стока. Однако, «рациональный метод»

обеспечивает точность только при площадях водосборов не более 0,1 км<sup>2</sup>» [87].

«Сопоставив «метод предельных интенсивностей» и «рациональный метод» можно сделать выводы о том, что каждый из этих методов основан на допущении о том, что интенсивность дождя однообразна по всему водосбору и неизменна на протяжении всего, длительность которого принимается равной времени добегания от самой удаленной точки бассейна. Как и в «методе предельных интенсивностей», так и «рациональном методе» учитывается географическое положение рассчитываемого объекта; учитывается площадь стока, тип покрытия. Однако ведение расчета по «методу предельных интенсивностей» представляется сложным, по причине своей трудоемкости, поскольку ряд значений определяется по показателям из таблиц. «Рациональный метод» более удобен в использовании, но точность расчета снижается с увеличением расчетной площади» [87].

Для проектирования и расчёта водоотведения применяются следующие основные методики:

- Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты / сост. Ю.А. Меншутин, Л.М. Верещагина, А.С. Керин, Е.В. Фомичёва, А.Ю. Логунова. М.: НИИ ВОДГЕО, 2015. 146 с.
- Методические указания по расчету объемов принятых (отведенных) поверхностных сточных вод. от 17 октября 2014 г. N 639/пр.
- Постановление Правительства РФ N 644. Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации (с изменениями на 28 ноября 2023 года).

Решение более узких вопросов регламентировано нормативными техническими и правовыми документами, перечень которых приведён в следующем разделе.

## **1.4 Обзор законодательных и нормативных документов в сфере водоотведения**

Законодательная база Российской Федерации включает в себя ряд нормативных документов, регулирующих отношения между субъектами права, занимающимися отведением поверхностного дождевого и талого стока в системы централизованной ливневой канализации. Основная идея этих документов заключается в упорядочении взаимоотношений, разграничении полномочий и обязанностей субъектов права, участвующих в процессе организации работы ливневой канализации, очистных сооружений и элементов инфраструктуры. Определяют порядок проведения инспекций и проверок систем ливневой канализации, а также процедуры принятия решений в случае обнаружения нарушений.

Также выделяется ответственность за соблюдение правил эксплуатации систем ливневой канализации, контроль качества сточных вод, а также разработку и реализацию мер по предотвращению загрязнения окружающей среды.

Важно отметить, что соблюдение требований данных нормативных документов является обязательным для всех субъектов права, занимающихся отведением поверхностного стока, т.к. нарушение требований может привести к серьезным техногенным, экологическим авариям, а также к административной и уголовной ответственности должностных лиц.

На 2024 год в российской федерации действуют следующие нормативные документы, регламентирующие отношения между субъектами права, которые осуществляют отведение поверхностного дождевого и талого стока в системы централизованной ливневой канализации.

- Водный кодекс Российской Федерации от 16 ноября 1995 г. № 167-ФЗ.
- Федеральный закон РФ «О водоснабжении и водоотведении» (с изменениями на 28 января 2022 года)

- Федеральный закон РФ «Об охране окружающей среды» от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ.
- СанПиН 2.1.5.980–00. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Официальное издание М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2000 г.
- ГОСТ 17.1.3.13-86 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнения. Официальное издание. Контроль качества воды: Сб. ГОСТов. - М.: ФГУП "СТАНДАРТИНФОРМ", 2010 г.
- Правила пользования системами коммунального водоснабжения и канализации в Российской Федерации. Утверждены постановлением правительства Российской Федерации от 12 февраля 1999 г. № 167.
- СП 32.13330.2018 Канализация. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.03-85 (с Изменениями N 1, 2, 3). Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019 г.
- СП 131.13330.2020 Строительная климатология СНиП 23-01-99\* (с Изменениями). Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2021 г.
- ГОСТ 17.1.1.01–77. Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения.
- ГОСТ 17.1.13.13–86. Охрана природы. Гидросфера. Классификация водных объектов.
- ГОСТ 27065–86. Качество вод. Термины и определения.
- ГОСТ 19179–73. Гидрология суши. Термины и определения.
- Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно безопасные уровни воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное назначение. Утвержден приказом Роскомрыболовства от 28 июня 1999 г. № 96.
- ГН 2.1.5.1315–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-

питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы. Утверждены и введены в действие постановлением главного государственного санитарного врача РФ от 30 апреля 2003 г. № 78.

- Следует обратить внимание на то, что законодательные акты постоянно меняются и не редко противоречат друг другу. К сожалению, отменён документ ТСН 23-346-2003 Самарской области Строительная климатология Самарской области. Официальное издание. Самара: Главное управление архитектуры и градостроительства Самарской области, 2004 г., который содержал достаточно точные данные о метеоусловиях Самарской области.

Выводы по главе 1:

- Обзор литературных источников позволил выделить современные тенденции в исследовании проблемы по определению объёма поверхностного стока, изучить теоретические основы климатологии, метеорологии и процессов распределения ливневых потоков на поверхности городской застройки.
- В результате изучения литературных источников по определению объёма поверхностного стока выделены основные проблемы, которые необходимо решить в рамках настоящей работы. В связи с климатическими изменениями, которые будут нарастать в ближайшие десятилетия, требуется предпринять меры по измерению фактического количества всыпающих осадков. Этот параметр является компонентом водного баланса (поступление), на основе которого ведётся проектирование и эксплуатация ливневых систем водоотведения (отведение).
- Обзор методик расчета расхода ливневого стока позволил определить недостатки и неточности, связанные с недостаточностью исходных данных для определения воды, поступающей в ливневую канализацию.

## Глава 2 Теоретические основы и методы расчёта ливневого стока

### 2.1 Основные направления исследования

Проведя анализ различных методик расчёта ливневого стока, удалось определить вопросы, которые рассмотрены недостаточно детально, с точки зрения фактического определения количества ливневого и талого стока, достигающего дождеприёмника или сбрасываемые в накопительные водоёмы. Большинство нормативных документов, в частности [80] и другие ориентировано на проектирование систем ливневой канализации, задача которой обеспечить отвод стока при определённых нормативных условиях. Общий алгоритм расчёта можно разложить на следующие ключевые элементы:

- Определение среднегодового количества осадков, выпадающих в данной местности. Наиболее простой, быстрый и наглядный способ определить этот параметр, воспользоваться картами, например, из СП 131.13330.2020. Строительная климатология; Рекомендации НИИ ВОДГЕО к СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения; Методические указания по расчету объемов принятых (отведенных) поверхностных сточных вод. от 17 октября 2014 г. N 639/пр, однако эти данные весьма приблизительные и не отображают климатические изменения за последние годы. Более точные сведения возможно получить из региональных нормативов, например, ТСН 23-346-2003 Самарской области Строительная климатология Самарской области. Официальное издание. Самара: Главное управление архитектуры и градостроительства Самарской области, 2004 г., документ отменён, но представленная в нём информация представляет интерес для исследований. Самый точный способ — это сведения, которые предоставляют местные метеостанции. По этим данным можно проследить динамику изменения количества

выпавших осадков за определённые промежутки времени, например по месяцам за последние годы в конкретном населённом пункте. Для определения фактического количества выпавших осадков на территории конкретного объекта устанавливают осадкомеры (плювиографы);

- расчёт объёма поверхностного стока, попадающего в ливневую канализацию;
- гидравлический расчёт ливневой канализации;
- количество и состав загрязняющих веществ;
- проектирование очистных сооружений.

Таким образом, для повышения точности расчётов необходимо составление водного баланса, который позволит определить исходные данные для гидравлического расчёта системы водоотведения и мощности очистных сооружений приоритетные направления и результаты исследований в этом направлении изложены в работах [55, 89].

## **2.2 Составление водного баланса**

Составление водного баланса базируется на фундаментальном законе сохранения вещества, на основании которого устанавливается, что определённый объем на протяжении известного периода времени является разность между общим приходом и расходом воды равный изменению её запаса в данном объеме. Метод водного баланса предполагает непосредственное измерение запасов и потоков (расхода) воды, однако в ряде случаев при правильном выборе объема и периода времени, для которых рассчитывается водный баланс, некоторые элементы можно получить путем косвенных расчетов. Факторы, влияющие на выбор объема и периода времени при расчете водного баланса, включают размер исследуемого объекта, климатические условия, особенности поступления и расходования влаги, а также наличие или отсутствие гидротехнических сооружений. Выбор

периода времени может зависеть от цели исследования и доступности данных. Водный баланс, на основе которого ведётся проектирование, и эксплуатация ливневых систем водоотведения состоит из следующих основных компонентов и может, в общем виде представлен следующим образом:

$$Q_{oc} - Q_{cm} - Q_{uc} - Q_{\phi} \pm \delta = 0 \quad (5)$$

где  $Q_{oc}$  – объём воды, поступающей с осадками на определённую территорию;

$Q_{cm}$  – объём воды поступающей в систему ливневой канализации;

$Q_{uc}$  – объём испаряющейся воды, в том числе и поглощаемую растениями;

$Q_{\phi}$  – объём воды на фильтрацию в поверхности водотока;

$\delta$  – невязка или поправочный коэффициент.

Как показал анализ литературных источников, расчёт количества испарившейся воды с разных видов поверхности (водные, твердые, грунтовые) недостаточно надёжен. В настоящее время существует более десятка различных отечественных и зарубежных методик, основанных на опытных данных. Требуется учесть большое количество различных погодных условий, которые меняются случайным образом; изменение состояния поверхности стока (образование пор, увеличение шероховатости); развитие растительного покрова. Автором проведены расчёты и сравнение результатов по методикам [70, 86, 90, 22, 46]. При одинаковых исходных условиях сходимость результатов в пределах 25%. «Основными для расчета испарения с поверхности суши являются формулы, связывающие испарение с количеством осадков и другими составляющими водного баланса. К таким уравнениям относятся уравнения М.И. Будыко, В.С. Мезенцева, В.И. Бабкина, С.Ф. Аверьянова, А.И. Будаговского и других авторов. М.И. Будыко, путем обобщения уравнений Шрейбера и Ольдекопа, получил

следующее выражение:

$$E = \sqrt{E_0 x_0 (1 - \exp)(-E_0/x_0) th(x_0/E_0)}, \quad (6)$$

где  $E$  – норма годового испарения, мм/год;

$E_0$  – испаряемость;

$x_0$  – норма годовых осадков.

Уравнение В.С. Мезенцева имеет следующий вид:

$$E = E_0 \left[ \left( 1 + \frac{(kx + W_1 - W_2)}{E_0} \right) \right]^{-1/n}, \quad (7)$$

где  $E_0$  – максимально возможное испарение в данной местности при существующих в ней атмосферных условиях;

$x$  – осадки;

$k$  – коэффициент недоучета осадков, измеряемых с помощью осадкомера;

$W_1$  и  $W_2$  – влагозапасы метрового слоя почвы на начало и концрасчетного периода;

$n$  – параметр, характеризующий расчлененность рельефа» [49].

В работе [49] представлена более наглядная, графическая методика расчета среднего многолетнего суммарного испарения для равнинных районов избыточного и достаточного увлажнения по температуре и влажности воздуха на высоте 2 м, по данным, полученным с метеорологических станций. Величина среднего многолетнего суммарного испарения определяется непосредственно по номограмме (рисунок 10) по средним годовым значениям температуры и абсолютной влажности воздуха.

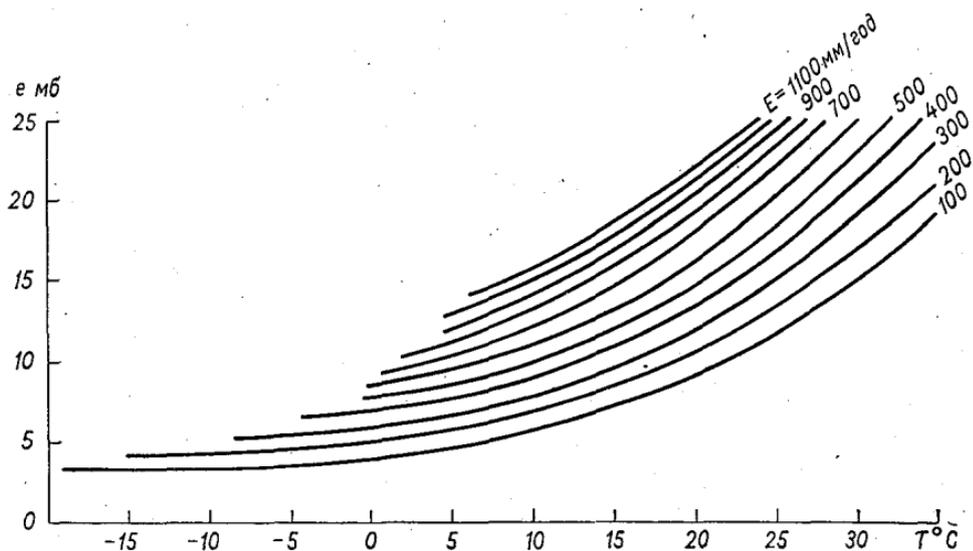


Рисунок 10 – График для расчета годовых величин испарения (мм/год) с почвы по средним годовым значениям температуры и влажности воздуха, измеренным на высоте 2,0 м

В практической работе, например, при заключении договора с абонентом на водоотведение, применение этих методик может быть затруднительно для неподготовленных кадров. Поэтому графический способ, при минимуме исходных данных может быть использован при составлении водного баланса. Однако его точность не велика, поскольку не учитывает перечисленные выше факторы [79]. В настоящее время используется способ расчета объемов атмосферных осадков, изложенный в [57].

### 2.3 Характеристики поверхностного стока как дисперсной системы

Так как ливневый поток, двигаясь по селитебной территории, захватывает с собой мусор различного происхождения (органический, минеральный, техногенный) и фракционного состава, то его можно рассматривать как дисперсную систему. Аналогично характеристики дисперсных систем можно рассматривать при изучении процессов фильтрации воды в почву.

«Важнейшими характеристиками многих дисперсных систем (особенно

дисперсных систем с жидкой и твёрдой дисперсионными средами) являются размер и форма элементов дисперсной фазы (частиц), так как большая часть других свойств таких систем зависит именно от этих параметров. Определение этих параметров и есть цель дисперсионного анализа. Реальные дисперсные системы, как правило, полидисперсны и могут содержать частицы, минимальный и максимальный размер которых отличается на несколько порядков. Для таких систем определение некоторого среднего размера частиц считается недостаточным и для более полного описания конкретной системы необходимо установить распределение частиц по размерам, что также входит в задачу дисперсионного анализа» [84, 61].

«Методы проведения дисперсионного анализа очень разнообразны и в свою очередь подразделяются на прямые, с помощью которых происходит определение непосредственно размера частиц, и косвенные, которые позволяют измерить какой-либо параметр, зависящий от размера частиц» [71].

«Под размером частицы обычно понимают ее диаметр. С помощью этой величины однозначно можно охарактеризовать лишь частицы, имеющие сферическую форму. В случае, когда частица имеет неправильную форму, вводят понятие эквивалентного диаметра» [71].

«В простейшем случае, когда можно измерить все три линейных размера: длину  $l$ , ширину  $b$  и высоту  $h$ , эквивалентный диаметр  $d_{cp}$  рассчитывается как среднее арифметическое из них:

$$d_{cp} = \frac{l+b+h}{3}. \quad (8)$$

Иногда прибегают к следующему приему – реальную частицу заменяют на эквивалентную (по какому-либо параметру – объему, поверхности и т.д.) ей частицу правильной геометрической формы.

Одним из вариантов определения эквивалентного диаметра частиц является использование среднего проектированного диаметра, который

представляет собой диаметр круга, площадь которого равна площади изображения проекции частицы. Наиболее удобным способом считается определение статистического диаметра, который, как правило, принимается за статистическую длину хорд. На рис. 3 представлены возможные варианты измерения статистической длины хорд» [34].

«Статистическая длина хорд может быть измерена:

- как длина проекции изображения частицы на прямую в заданном направлении  $dF$ , измеряемая как расстояние между касательными к контуру изображения, проведенными параллельно выбранному направлению, и называемая средним диаметром Фере (рисунок 11, а);
- длина хорды в заданном направлении  $dM$ , делящая площадь проекции частицы на две равные части (диаметр Мартина) (рисунок 11, б);
- наибольшая длина хорды в заданном направлении  $d_{\text{макс}}$  (рисунок 11, в);
- сопоставление изображения частицы с кругом, площадь которого примерно одинакова с площадью изображения частицы  $d_{\text{ч}} = d_{\text{кр}}$  (рисунок 11, г).

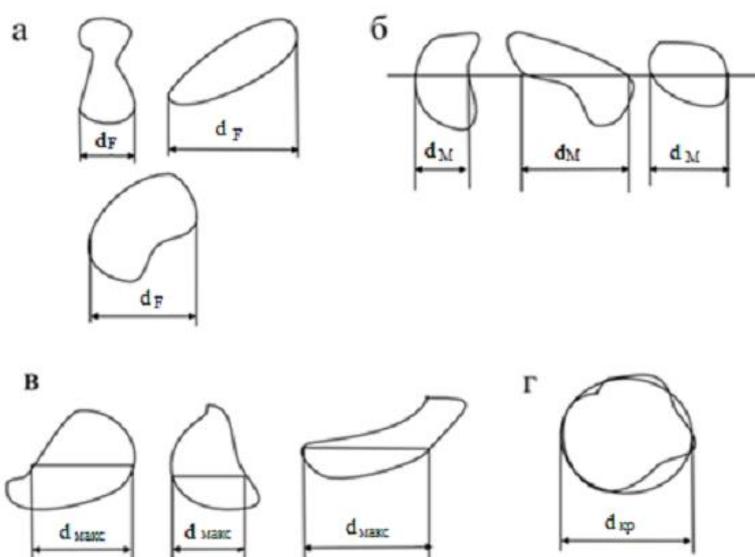


Рисунок 11 – Виды статистических хорд

Использование статистического диаметра применяется только при

измерении большого числа частиц при их случайном расположении и ориентации. Теоретические знания по данному вопросу способствуют пониманию процессов фильтрации и движению ливневого стока по различным поверхностям» [23, 38, 43, 44].

#### **2.4 Расчёт испарения как одного из компонентов водного баланса при определении количества ливневого стока селитебных территорий**

В настоящее время в нашей стране и за рубежом проведены многочисленные исследования по определению потерь дождя на испарение в воздухе и уносе ветром, которые находятся в пределах 0,4 – 42,0 % от вылитого объема воды (В.Е. Хабаров, 1982, Б.Б. Шумаков, 1990).

Объём испарения может быть достаточно большим, особенно на селитебных и промышленных территориях, на участках с большими асфальтированными и бетонированными покрытиями, например, дороги, площади, парковки. Этому вопросу уделено внимание в [56]. Как показывают наши исследования и литературные источники [85] в жаркие летние месяцы асфальтовая поверхность нагревается до 50°C. Также следует учесть интенсивность движения воздуха, которая способствует активному испарению. Потоки воздуха поднимаясь вдоль улиц могут разогнаться до 20 м/с, что характерно для большинства крупных городов Поволжья с их регулярной планировкой и ориентацией улиц. Например, автозаводской район Тольятти специально спроектирован для наилучшей аэрации с учётом направления преобладающих ветров со стороны Волги.

Таким образом для точного учёта поверхностного стока необходимо иметь данные для составления водного баланса. Он формируется из поступления, количества выпавших осадков, эта величина случайная, но её значения известны по многолетним наблюдениям и фактическим сведениям метеостанций. Расходная часть баланса состоит из расходов на испарение, фильтрацию в поверхность на пути водотока, транспирацию

(физиологическое испарение растениями), оставшаяся часть воды попадает в систему ливневой канализации.

Поскольку оценка величины испарения связана со многими трудностями, обусловленными погодными условиями неоднородностью поверхности стока растительным покровом, влиянием атмосферы и других природных факторов, надежные результаты могут быть получены лишь при комплексном использовании различных методов, дополняющих друг друга.

Исследование проводится с целью разработки эффективного метода определения количества испарившейся воды, опирающегося на доступные метеоданные, как одного из компонентов водного баланса при определении количества ливневого стока.

Влагоёмкость почвы является величиной переменной, зависящей от множества факторов, гранулометрического состава, пористости, влажности на определённый момент, наличием и близостью грунтовых вод. Другой, весьма трудно рассчитываемый аспект – эвапотранспирация, количество влаги, переходящее в атмосферу в виде пара в результате десукции (поглощение воды корнями растений) и последующей транспирации (физиологическое испарение), испарения из почвы и с поверхности растительности.

Учесть и прогнозировать всё это достаточно тяжело, кроме того, в современной городской застройке доля растительного покрова постоянно уменьшается за счёт увеличения поверхностей с твёрдым покрытием. Опираясь на предыдущий опыт автора, замечено, что площадь газонов и грунтовых поверхностей на муниципальных объектах г. Тольятти составляет менее 40% суммарной площади. коэффициентом поверхностного стока  $\Psi_i$  для грунтовых поверхностей равен 0,2, а для газонов 0,1, в то время как для кровли и асфальтобетонных покрытий (водонепроницаемые поверхности) – 0,95. Таким образом, наиболее целесообразно рассматривать испарения с почвы в совокупности с водонепроницаемых поверхностей.

Современная наука располагает несколькими способами расчета

испарения с твёрдых поверхностей. Известные методы можно разделить на расчеты испарения по данным градиентных наблюдений и расчеты испарения по температуре и влажности воздуха. В научной среде существуют сторонники разных методов, основываясь на обсуждениях данной темы можно сказать, что сегодня нет единого мнения, какой расчетный метод является более точным и удобным. Для определения количества испаряющейся воды с поверхности применяются специальные метеорологические приборы, однако применение их на общедоступных сельских территориях ограничено. Вести длительные метеонаблюдения на парковке или городской площади проблематично, в том числе и с метеорологической стороны. Таким образом можно сформулировать требования к методу расчета испарения. Он должен быть достаточно точным, основываться на доступных для использования метеорологических и геодезических данных не требовать трудоемких, технически сложных измерений.

Наиболее подходящим по эти требования является метод, базирующийся на схеме расчета испарения и ее модификациях [90] и рассмотренный в работе [13]. Некоторые аспекты данного метода для дальнейшего обоснования предлагаемых решений представлены ниже.

#### Математическая модель испарения.

Для формализации расчёта ливневого стока и в частности, одного из компонентов водного баланса – величины испарения, необходимо построить математическую модель, которая даст понимание взаимного влияния основных физических факторов. На основании данной модели можно разработать практические приёмы, которые лягут в основу для определения величины испарения при известных метеоусловиях для конкретного объекта водоотведения [16].

Литературный обзор показывает, что такие математические модели достаточно часто используются в зарубежной практике [100]. Однако к

нашим климатическим условиям они подходят с оговорками и требуют экспериментального подтверждения. Поэтому за основу взята математическая модель, предложенная д. т. н., профессором Поповым В. А. [70]

Процесс испарения представляет собой диффузию пара в атмосферу и, общем виде описывается уравнением Дирихле:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (9)$$

При стационарном протекании процесса, т.е. не зависимо от времени  $t$ , можно выделить граничные условия  $(0; l)$ , от поверхности почвы до заданного расстояния от неё. В результате получается линейная функция  $C=Ax+B$ :

$$C = \frac{c_l - c_0}{l} x + c_0, \quad (10)$$

при  $x=l$ ;

$$C = c_l - c_0 + c_0 = c_l. \quad (11)$$

на поверхности почвы выполняется условие при  $x=0$   $C=c_0$ . В условиях стационарного распределения водяного пара в диапазоне  $x=(0...l)$  поддерживается концентрация пара  $C=c_l$  за счёт градиента упругости водяного пара. На основании чего уравнение испарения с влажной поверхности имеет вид:

$$E = D(E_1 - e_0)B, \quad (12)$$

где  $E_1$  – упругость насыщения, (гПа);

$e_0$  – парциальное давление водяного пара в воздухе, (гПа);

$D$  – удельная всасывающая сила атмосферы 0,14 мм/(гПа×сут).

Ветер переносит воздух, который успел поглотить некоторое

количество водяных паров и замещает его более сухим. Согласно наблюдениям, увеличение скорости ветра на 0,25 м/сек ускоряет испарение почти в три раза. Для учёта влияния скорости ветра вводится коэффициент, учитывающий «ветровую тень», длину разгона воздушного потока в условиях селитебной территории.  $B=1+0,72 v$ .

Выводы по главе 2:

При рассмотрении теоретических основ и методов расчёта ливевого стока и составления водного баланса выделены принципиальные компоненты и алгоритмы вычислений. Проведено сравнение нескольких различных подходов к определению поверхности стока как дисперсной системы. Одним из важных критериев выбора была доступность к необходимым исходным данным, как для научных изысканий, так и для практического применения.

Выделены перспективные направления к дальнейшему уточнению количества фильтрующейся и испаряющейся воды с влагонепроницаемых и почвенных поверхностей. Однако такой расчёт требует дополнительного изучения термодинамических свойств разных материалов, их состояния на расчётный период, а также измерения локальных метеоусловий на определённой селитебной территории.

### Глава 3 Моделирование и расчёт ливневого стока на селитебных территориях

В данной главе анализируются методы и источники данных, используемых для создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) и расчета параметров земной поверхности за последнее время. Основная цель заключается в описании современного подхода к процессу цифрового моделирования рельефа, который начинается со сбора данных, продолжается предварительной обработкой данных и формированием ЦМР и завершается расчетом одного или нескольких первичных и вторичных параметров поверхности земли (рисунок 12).

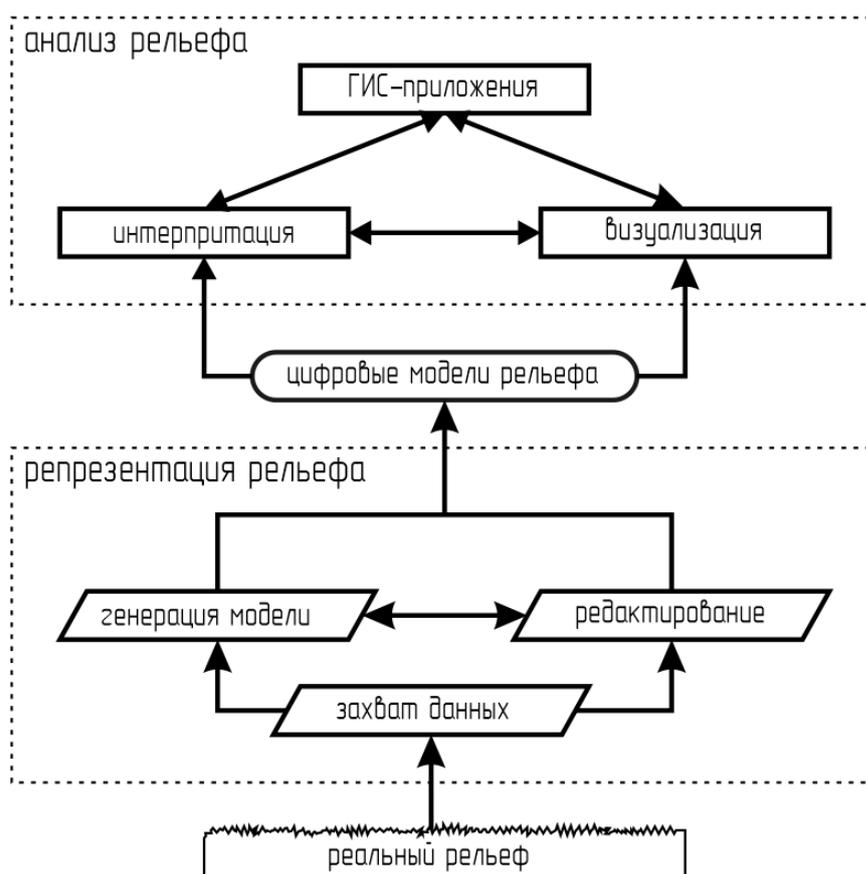


Рисунок 12 – Основные задачи цифрового моделирования рельефа

Наиболее передовыми являются способы, с применением технологии лидарного и радиолокационного дистанционного зондирования, которые изменили методы сбора данных об определении отметок изучаемой

поверхности. Также рассматриваются различные методы, которые в настоящее время используются для предварительной обработки ЦМР, некоторые проблемы, и тонкости, связанные с вычислением первичных параметров земной поверхности, которые выводятся непосредственно из ЦМР без дополнительных входных данных, и двух наборов вторичных параметров земной поверхности, которые обычно используются для моделирования поверхностного стока и сопутствующих взаимодействий между земной поверхностью и водным потоком и связанные с ним процессы. Необходимо уделить внимание проблемам и ошибкам, которые заложены в ЦМР, способы их распространения и дальнейшего устранения при расчете различных параметров земной поверхности, а также последствия такого упрощения для дальнейшей работы.

Поверхность суши играет фундаментальную роль в регулировании атмосферных, геоморфологических, гидрологических и экологических процессов, происходящих на поверхности Земли или вблизи нее. Эта связь часто настолько сильна, что понимание характера поверхности суши может непосредственно повлиять на понимание природы и масштабов вышеупомянутых процессов. Приложения, обычно используют цифровые модели рельефа (ЦМР) для представления поверхности и постоянно растущий и усложняющийся набор методов топографического анализа и визуализации. Эти методы и данные относятся к геоморфометрии, которая в самом широком смысле относится к науке о цифровом моделировании рельефа [105].

Современная геоморфометрия фокусируется на извлечении показателей (высотных отметок земной поверхности) и пространственных особенностей (объектов земной поверхности) из цифровой топографии. Это описание основано на специфическом и общем способах геоморфометрического анализа, впервые выделенных Эвансом (Evans, 1972). Специальный режим описывает отдельные элементы поверхности (т.е. формы рельефа), а общий режим описывает непрерывную поверхность суши

таким образом, что параметр поверхности суши является описательной мерой формы поверхности уклон, шероховатость, топографический индекс влажности, а объект земной поверхности - это отдельный элемент поверхности, например, граница водораздела, аллювиальный веер, дренажная сеть (рисунок 13).

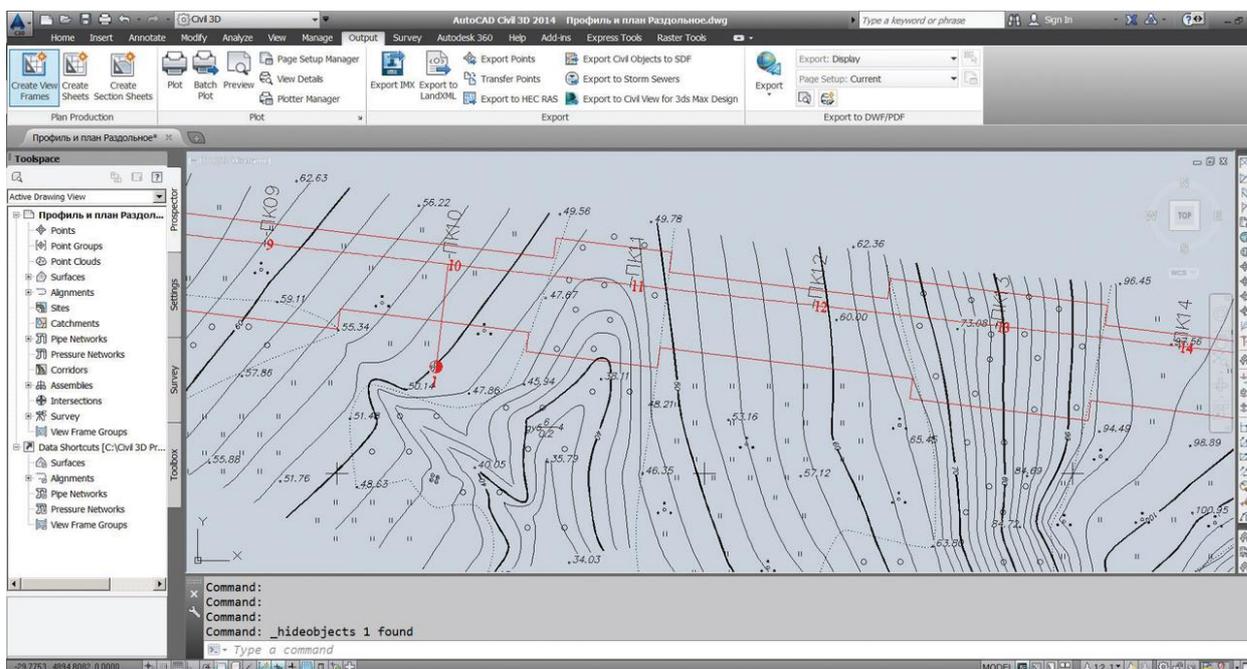


Рисунок 13 – Пример цифровой модели местности в AutoCAD Civil 3D

Геоморфометрия — это одновременно быстро развивающаяся и в то же время сложная область науки. Отчасти это связано с технологией — растет число источников цифровых данных дистанционного зондирования, и при создании ЦМР на основе этих, а также традиционных источников возникает множество тонкостей, указывающих на ряд ключевых вопросов: следует ли устранять нежелательные отклонения, следует ли сначала сглаживать ЦМР, и если да, то каким методом, какие алгоритмы следует использовать для распространения ошибки модели и как следует обрабатывать эту неопределенность (ошибку) в ходе последующего анализа. При решении практических задач, на которые из этих вопросов не может быть четких и однозначных ответов. Однако эти проблемы также можно объяснить постоянным ростом числа новых данных и алгоритмов для обработки ЦМР и

извлечения как описательных показателей (параметров), так и поверхностных особенностей (объектов). Значения этих параметров и/или характеристик объектов будут варьироваться в зависимости от множества факторов, включая математическую модель, с помощью которой они рассчитываются, размер расчётной области и разрешение сетки [109].

Несмотря на эти трудности, вычисленные параметры поверхности земли и объекты рельефа были использованы в большом количестве и разнообразии применений и условий окружающей среды — для прогнозирования распределения свойств почвы (Чжу и др., 1997, Бишоп и Минасны, 2005), моделирования процессов перераспределения почвы (т.е. эрозии и осадения), (Миташова и др., 1995), оценивать вероятность опасных склонов (Гуззетти и др., 2005, Хейр и др., 2007), моделировать потенциал солнечной радиации (Шури и Хофьерка, 2004, Рейтер и др., 2005), улучшать картографирование растительности (Антонич и др., 2005, Болстад и Лиллесанд, 1992) и анализ распространения лесных пожаров (например, Эрнандес Энсинас и др., 2007).

### **3.1 Оценка распределения потока по цифровым моделям рельефа по базовому алгоритму**

Рельеф территории водосбора имеет решающее значение для моделирования распределенных гидрологических процессов. Уклон определяет траектории движения поверхностного стока и существенно влияет на структуру подповерхностного водного режима. Наиболее частым подходом к измерению распределения стока является метод гидрологического моделирования, который широко применяется для решения геоморфологических и гидрологических задач [108]. Этот метод основан на следующих основных принципах:

- дренажный канал начинается в непосредственной близости от характерных вершин;

- в каждой точке канала гидрологический сток следует по одному или нескольким направлениям нисходящих склонов;
- дренажные каналы не пересекаются друг с другом;
- гидрологический сток продолжается до тех пор, пока он не достигнет впадины или выхода из системы.

Наиболее противоречивым допущением этого метода моделирования является определение направления стока. На ранних этапах разработки предполагалось, что сток следует только по самому крутому склону. Реализация этого метода с использованием растровой диаграммы направленности привела к тому, что гидрологический поток в точке следует только в одном из восьми возможных направлений, соответствующих восьми соседним ячейкам сетки. Однако при количественном измерении распределения потока это чрезмерно упрощенное предположение следует рассматривать как нелогичное что, создало бы значительные искажения в результатах, как утверждают Фримен [103], Холмгрен [104], Вулк и Маккейб [115], а также Пилеше и Чжоу [111]. Предполагается, что более сложный рельеф местности приводит к более сложным схемам дренажа. Попытки решить проблему привели к появлению нескольких предложенных алгоритмов множественного направления потока [112]. Эти алгоритмы оценивают значения распределения потока пропорционально градиенту наклона или увеличению градиента наклона в каждом направлении. Холмгрен [104] обобщает некоторые алгоритмы следующим образом (для всех  $\beta > 0$ ):

$$f_i = \frac{(\tan \beta_i)^x}{\sum_{j=1}^8 (\tan \beta_j)} \quad (13)$$

где  $i, j$  = направления потока (1...8),  $f_i$  = доля потока (0...1) в направлении  $i$ ,  $\tan \beta_i$  = градиент наклона между центральной ячейкой и ячейкой в направлении  $i$ , а  $x$  переменный показатель степени.

Изменяя показатель степени ( $x$ ) в уравнении (13), можно наблюдать два экстремальных подхода к оценке распределения потока. При  $x = 1$  поток будет распределяться по соседним ячейкам, расположенным ниже по склону, пропорционально градиентам склона. Другая крайность, когда  $x \rightarrow \infty$ , что будет приближаться к восьмиместному распределению дренажа упомянутой выше. Рекомендуется использовать значение  $x$  в диапазоне от 4 до 6. «Это дает результат между очень однородным распределением потока при  $x = 1$  и характерным потоком, который возникает, когда  $x$  становится больше 10. Пилеше и Чжоу [111] использовали математические поверхности (конус, полусферу и обратную полусферу) для проверки различных значений  $x$ . Они пришли к выводу, что значение  $x$ , равное 1, является оптимальным, особенно для выпуклых поверхностей» [111].

Однако постоянная зависимость между уклоном и распределением стока (величина  $x$ ) по поверхности местности также может быть проблематичной. На естественной поверхности можно ожидать менее концентрированного стока на верхнем склоне и более выраженного характера дренажа в нижней части заднего склона. Это ожидание тесно связано с топографической формой. «На верхнем склоне преобладают выпуклые формы склона, а поток расходится таким образом, что его распределение распределяется между всеми направлениями спуска. На нижней части склона преобладает вогнутый склон. преобладают формы, которые вынуждают поток направляться в основное русло стока» [106]. Другие трудности связаны со сложным рельефом, плоскими поверхностями и стоками. Сложный рельеф определяется как фасет поверхности ( $3 \times 3$  ячейки в растровой диаграмме направленности) без однородной топографической формы (выпуклой или вогнутой). Если грань состоит из нескольких впадин и гребней, исходящих из центральной ячейки, оценка распределения потока из этой ячейки становится более сложной. Плоские поверхности — это грани поверхности, у которых все ячейки имеют одинаковое значение высоты. Пока на ровной поверхности есть выход, вода будет двигаться по поверхности в этом направлении. Стоки — это небольшие

впадины (т.е. дренажные бассейны), которые могут нарушить предстоящий гидрологический анализ (например, оценку накопления стока), если с ними не обращаться должным образом. Ли [106] предложил возможные пути ее решения. Это исследование было сосредоточено на оценке распределения потока по растровой диаграмме направленности. Растровая диаграмма направленности на сегодняшний день является наиболее часто используемой моделью рельефа для целей моделирования, и ее легко интегрирован с другими типами пространственных данных. Учитывая ограничения и проблемы, связанные с алгоритмом восьми перемещений, в этом исследовании для оценки распределения потока по растровому ЦМР был использован подход множественного направления потока, основанный на анализе отдельных граней поверхности. Затем результаты этого алгоритма, основанного на форме, были оценены и сравнены с результатами «алгоритма восьми ходов».

Был сделан ряд предположений, главным образом для того, чтобы изолировать механизм распределения стока по суше от воздействия почвы, растительности и атмосферы:

- поток из ячейки сетки в соседние ячейки зависит от топографической формы поверхности;
- вода равномерно распределяется по ячейкам сетки (т.е. выпадает в виде однородных осадков);
- каждая ячейка растровой диаграммы, за исключением приемников, вносит свой вклад в единичный поток, и весь накопленный поток распределяется по ее окрестностям;
- способность к проникновению через поверхность равна нулю;
- поверхность голая (например, без растительности);
- испарение равно нулю.
- топографическая форма ячейки может быть оценена с помощью восьми соседних ячеек (окно  $3 \times 3$ ).

Ниже описана процедура использования предлагаемого метода для оценки распределения потока и последующего накопления потока на основе растрового ЦМР:

- выделить каждую ячейку сетки и фасет поверхности, образованный окном размером  $3 \times 3$  ячейки, чтобы классифицировать фасет на сложный, плоский и ненарушенный рельеф;
- эти три категории обрабатываются отдельно при определении их распределения потока с использованием алгоритмов, описанных ниже;
- результаты из разных категорий аспектов затем объединяются для создания потока распределение и накопление потоков по всей исследуемой территории.

Разделить каждую грань на сложную, плоскую или ненарушенную. Классификация фасета по одной из трех категорий основана на обычном процессе фильтрации по ячейкам размером  $3 \times 3$ , как описано ниже:

- если все ячейки в окне размером  $3 \times 3$  имеют одинаковые значения высоты, центральная ячейка помечается как плоская поверхность;
- проверяются восемь соседних ячеек вокруг центральной ячейки (по часовой стрелке), чтобы определить, есть ли несколько долин;
- ячейки, не классифицированные ни как плоские, ни как сложные, помечаются как ненарушенные.

Долина в данном контексте определяется как одна, или более высокие и низкие (по отметкам) соседние ячейки окружены ячейками с большей высотой. Центральные ячейки в этих гранях помечены как сложный рельеф. Пример грани, классифицированной как сложная, представлен на рисунке 14.

.90	.110	.90
.80	.100	.80
.60	.70	.60

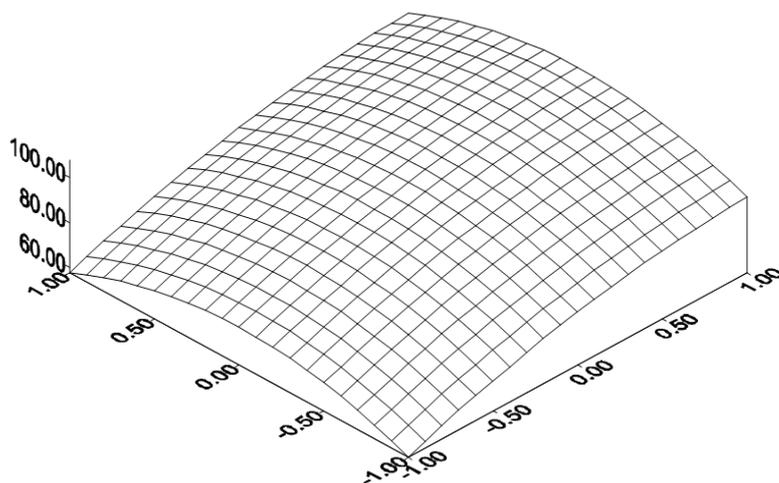


Рисунок 14 – Пример аппроксимации поверхности тренда второго порядка по девяти значениям высот в окне размером 3×3 ячейки

Растр слева показывает девять значений высот из фасета поверхности, а аппроксимированная поверхность тренда показана справа. Топографическая форма центральной ячейки выпуклая

Оценка распределения потока на сложной грани поверхности основана на топографической форме. Для каждой из долин, берущих начало от центральной ячейки, топографически оценивается форма. Если долина имеет ширину в одну, две или три ячейки, она рассматривается как вогнутая поверхность, а предполагаемое направление потока равно основному направлению стока. С другой стороны, если ширина впадины превышает три ячейки, она рассматривается как выпуклая поверхность, и поток воды будет распределен между всеми ячейками в этой впадине. Распределение потока между различными долинами распределяется в соответствии с шириной долины, т.е. пропорционально площади центральной ячейки, обеспечивающей поток в разных направлениях.

### **3.2 Расчёт поверхностного дождевого стока графоаналитическим методом**

Использование расчётно-графических программных продуктов позволяет автоматизировать процесс выполнения расчётов и построения

графиков, ускорить процесс решения задач, повысить точность результатов и снизить вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором [93]. Моделирование открытых потоков на селитебных территориях требует вычислительной мощности, долгого времени и большого количества входных данных для расчёта. «Для освоения методики моделирования гидравлических систем и правильной интерпретации результатов, автором проведён ряд цифровых и натуральных экспериментов для замкнутых гидравлических систем, запорной арматуры и трубопроводов, применяемых на очистных сооружениях ливневой канализации» [5, 6, 7, 9, 99].

Предлагается способ расчёта поверхностного дождевого стока методом конечных разностей, который позволит моделировать движение воды с исследуемого участка водосбора при различных условиях [101, 114].

Расчёт количества ливневого стока основан на решении основных уравнений Навье-Стокса и неразрывности потока. Особенность заключается в изменении случайным образом сечения потока значительной протяжённости, при таких условиях описать движение воды достаточно сложно [28, 30].

Дополнительные трудности в процесс построения линии свободной поверхности потока вносит отсутствие достоверных и своевременных данных об изменении характера потока, его формы, боковые притоки, ответвления от основного русла изменения уклона деформации формы живого сечения потока и пр. Для устранения этих трудностей можно применить уравнение Бернулли с предварительным выделением элементарных расчётных участков (рисунок 15).

Перед дождеприёмником устанавливается критическая глубина  $h_k$ .

Учитывая рекомендации «построение кривой свободной поверхности потока, т.е. кривой пересечения вертикальной продольной плоскости со свободной поверхностью потока, представляет большой практический интерес. Построив кривую, можно найти глубины воды в канале в различных

его сечениях. Зная глубины воды, в зависимости от длины потока, можно решить вопрос об определении площади вертикального сечения потока и пропускной способности водотока» [72].

Целью построения профиля неравномерного установившегося движения воды в каналах является определение глубины в конкретном его сечении или построение линии свободной поверхности на протяжении некоторого участка потока. Постоянной гидравлической характеристикой потока при неравномерном установившемся движении остается величина расхода  $Q$ .

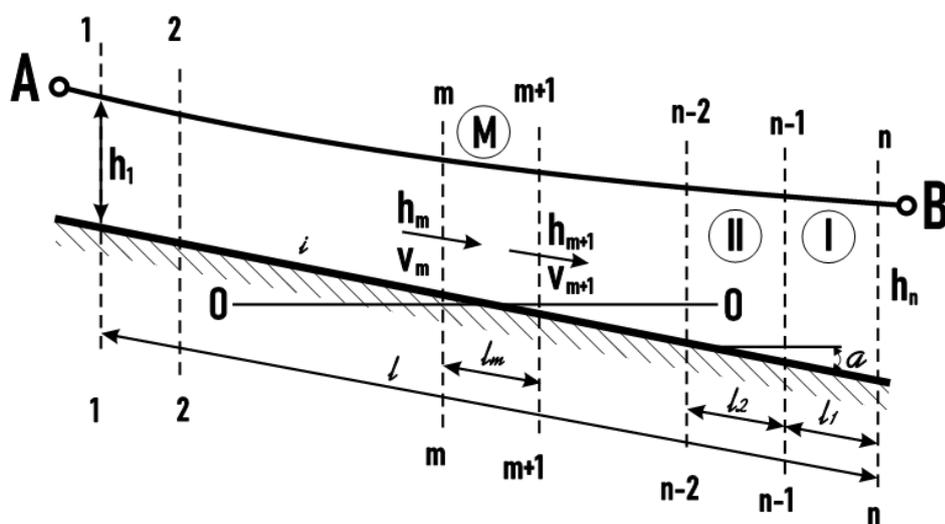


Рисунок 15 – Расчётные участки

Для построения кривой  $AB$ , характеризующей свободную поверхность потока, выделяются элементарные участки  $l$  малой длины. Каждый последующий участок рассматривается последовательно по течению. Расчет элементарного участка (например, участка  $M$ ) состоит в определении глубины  $h_m$  потока в начале данного участка (по известным величинам  $l_m$  и  $h_{m+1}$ ) и далее по сечениям. По полученным точкам,  $h$  строится кривая свободной поверхности.

Определение нормальной глубины наполнения потока  $h_0$  из условия равномерного движения воды в русле. Нормальная глубина – это глубина, установившаяся при заданном расходе в условном канале при равномерном

движении. В этом случае  $dh/dl \rightarrow 0$ , а числитель правой части дифференциального уравнения (14) тоже стремится к нулю.

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{(\omega \cdot C \cdot \sqrt{R})^2}}{1 - \frac{\alpha \cdot Q^2 \cdot B}{g \cdot \omega^3}} \quad (14)$$

При условии, что:

$$i + \frac{Q^2}{\omega^2 \cdot C^2 \cdot R} = 0. \quad (15)$$

Модуль расхода  $K_0$ , м<sup>3</sup>/с, определяется по формуле:

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}}, \quad (16)$$

или

$$K_0 = \omega C \sqrt{R}, \quad (17)$$

где  $i$  – продольный уклон дна канала;

$Q$  – расчетный расход воды, м<sup>3</sup>/с;

$\omega$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;

$C$  – коэффициент Шези, м /с;

$R$  – гидравлический радиус, м;

$B$  – ширина потока по верху, м;

$g$  – ускорение силы тяжести, м<sup>2</sup>/с;

$l$  – длина участка, м;

$h_0$  – нормальная глубина, м;

$h_k$  – критическая глубина, м;

$K$  – модуль расхода, м<sup>3</sup>/с;

$K_i$  – расходная характеристика, м<sup>3</sup>/с.

Сложность расчета состоит в том, что в правой части уравнения все компоненты зависят от значения  $h$ , поэтому проводится расчёт нормальной глубины  $h_0$ , м, графоаналитическим способом. Для этого задавая не менее пяти значений  $h$ , определяется расходная характеристика  $K_i$  м<sup>3</sup>/с, по формуле:

$$K_i = \omega_i C_i \sqrt{R_i} \quad (18)$$

Результат расчёта приведён в таблице 3.

Таблица 3 – Определение нормальной глубины графоаналитическим методом

Глубина наполнения канала $h$ , м	Площадь поперечного сечения русла $\omega$ , м <sup>2</sup>	Длина смоченного периметра $\chi$ , м	Гидравлический радиус $R$ , м	Коэффициент Шези $C$ , м <sup>0,5</sup> /с	Модуль расхода $K$ , м <sup>3</sup> /с
0,1	1,21	12,28	0,10	57,19	21,72
0,2	2,44	12,57	0,19	65,50	70,43
0,3	3,69	12,85	0,29	70,83	140,07
0,4	4,96	13,13	0,38	74,82	228,09
0,5	6,25	13,41	0,47	78,03	332,90
Контроль нормальной глубины $h_0 = 0,202$					
0,202	2,46	12,57	0,20	65,63	71,63

По данным таблицы 3 строится график  $h = f(K)$  (рисунок 16).

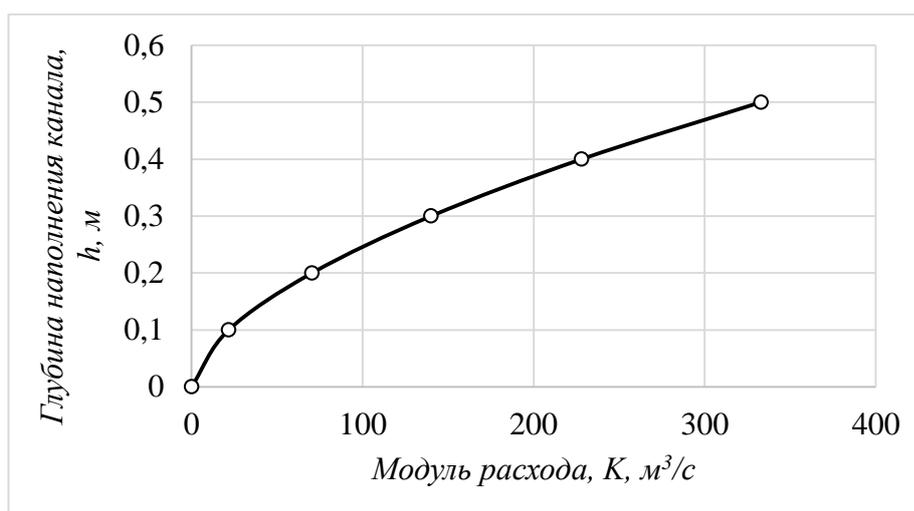


Рисунок 16 – График для определения нормальной глубины

Аналогичным образом определяются другие параметра потока, в частности критическая глубина потока [20]. Далее рассчитывается форма свободной поверхности потока. Предварительно определяется критический уклон:

$$i_k = \frac{g}{\alpha \cdot C_k^2 \cdot \frac{\chi_k}{B_k}}, \quad (19)$$

где  $\chi$  – длина смоченного периметра, м;

$\alpha$  – коэффициент пропорциональности.

В результате расчёта получены следующие результаты  $h_0 = 0,202$ ;  $h_k = 1,07$ ;  $i = 0,32$  (по рельефу)  $i_k = 0,0012$ . То есть  $h_0 < h_k$  и  $i > i_k$ , свободной поверхности является кривой спада типа  $b_2$  (рисунок 17).

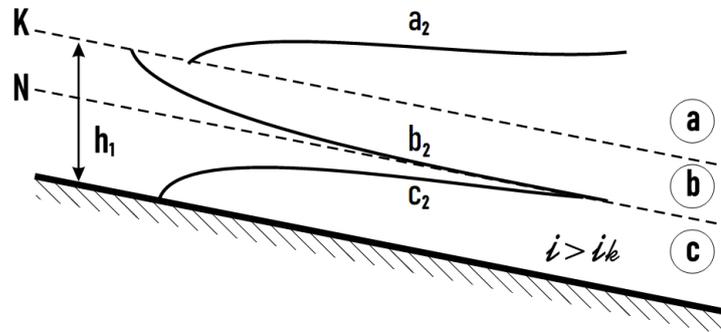


Рисунок 17 – Кривые свободной поверхности при  $i > i_k$   
Свободная поверхность потока находится между линиями  $K-K$  и  $N-N$ .  
Числитель правой части уравнения (20).

$$\frac{dh}{dl} = i \cdot \frac{1 - \left(\frac{K_0}{K}\right)^2}{1 - Fr} \quad (20)$$

где  $Fr$  – число Фруда.

Дробь имеет отрицательное значение, а выражения (20) показывает, что кривая свободной поверхности потока начинается с канала меньшего уклона и стремится к линии нормальных глубин  $N-N$ .

Определение координат кривой свободной поверхности потока по уравнению Б.А. Бахметева. При построении свободной поверхности для потока движение осуществляется вниз по течению. Поток по длине разбивается на 10 участков. Длина каждого участка находится из уравнения Бахметева:

$$l = \frac{h_0}{i} [\eta_2 - \eta_1 - (1 - j_{cp}) \cdot (B(\eta_2) - B(\eta_1))] \quad (21)$$

где  $\eta_1, \eta_2$  – относительные глубины соответственно в первом и во втором сечениях, м;

$B(\eta_1), B(\eta_2)$  – функции Бахметева;

$j_{cp}$  – коэффициент пропорциональности.

Результат расчёта приведён в таблице 4.

Таблица 4 – Расчет длин участков

№	Глубина наполнения канала, $h$ , м		Средняя глубина наполнения канала, $h$ , м	Коэффициент пропорциональности $j_{cp}$	Относительная глубина, $\eta$ , м	Функция Бахметева $B(\eta)$	Длина участка, $l$ , м
1	1,07	0,98	1,025	291,9	5,3	0,0076	0,031
2	0,98	0,89	0,935	283,8	4,85	0,0093	0,147
3	0,89	0,8	0,845	274,9	4,41	0,0117	0,376
4	0,8	0,71	0,755	265,0	3,96	0,0155	0,614
5	0,71	0,62	0,665	254,0	3,51	0,0209	0,964
6	0,62	0,53	0,575	242,3	3,07	0,0287	1,775
7	0,53	0,44	0,485	228,6	2,62	0,0422	3,224
8	0,44	0,35	0,395	212,6	2,18	0,0666	6,799
9	0,35	0,26	0,305	192,8	1,73	0,1196	19,258
10	0,26	0,22	0,241	177,7	1,29	0,2810	28,318
						сумма	61,57

В заключении строится линия свободной поверхности, нижняя двойная линия – поверхность дна канала (рисунок 18).

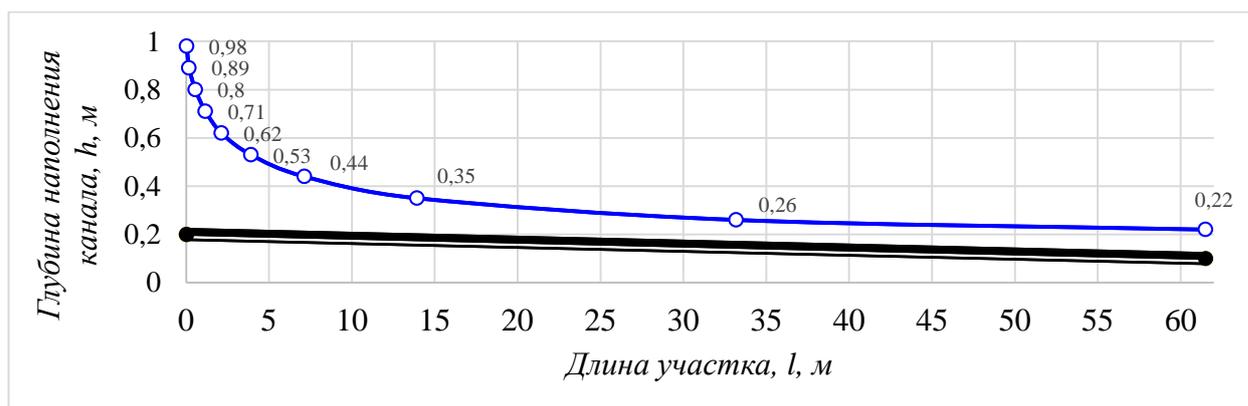


Рисунок 18 – Кривая свободной поверхности

Применение описанного метода возможно для расчёта количества ливневого стока с ограниченной территории. Задаваясь расходом (количеством выпавших осадков), площадью участка и некоторыми другими значениями можно составить водный баланс. Баланс составляется между поступлением воды и расходом на испарение, инфильтрацию, остальное отправляется в дождеприёмник. Как было отмечено выше, при движении воды по территории города невозможно выделить интересующий участок, поскольку общий поток неравномерно формируется и дополняется с прилегающих поверхностей тротуаров, крыш, дорог. Описанный метод

позволяет построить математическую модель определённого потока и рассчитать потери в процессе движения воды [8].

### **3.3 Программирование в среде LabVIEW виртуального ландшафта**

На основе рассмотренного выше алгоритма разработана программа для виртуального ландшафта, т.е. программно управляемой системы сбора данных, задания переменных, функционирования виртуальных приборов для постановки цифрового эксперимента [63]. Система организована в виде программной модели реального или проектируемого прибора, в котором представлены индикаторы, органы управления, регуляторы, а также реализована логическая схема работы канализационной системы, расположенной на определённом городском ландшафте [75].

Программа написана на графическом языке программирования «G», в среде LabVIEW разработчика National Instruments, которая основана на архитектуре обработки потоков данных. Последовательность выполнения операторов определяется наличием данных на входах, операторы, не связанные по данным выполняются параллельно в произвольном порядке [59].

В среде LabVIEW интерфейс пользователя состоит из двух частей:

- блок-диаграммы, описывающей логику работы виртуального прибора, там же осуществляется программирование с использованием графических представлений функций для управления объектами на лицевой панели (рисунок 19);
- лицевой панели, описывающей внешний интерфейс виртуального прибора с помощью элементов индикации и управления.

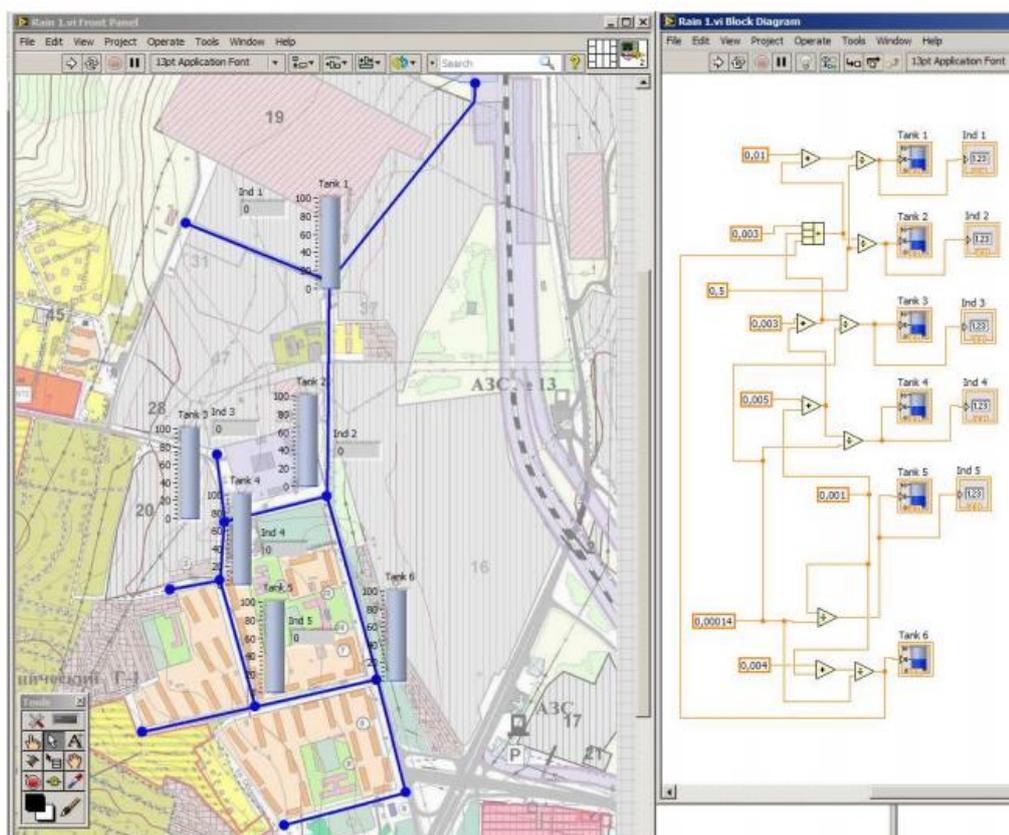


Рисунок 19 – Моделирование работы ливневой канализации района города

Среду графического программирования возможно использовать для создания комплексных приложений в процессах измерения, тестирования, управления, автоматизации научного и учебного эксперимента, создания виртуальных лабораторных работ, для решения прикладных научно-исследовательских задач благодаря интеграции с измерительными комплексами, встроенным функциям для численной обработки и средств графического представления данных [76, 77].

### Выводы по главе 3:

Применение цифрового моделирования ландшафта позволяет определять наиболее вероятные направления движения ливневого стока. Данные о высотных отметках и характере местности могут быть представлены в цифровом виде сразу (цифровая карта) или переноситься с аналоговой формы для построения цифровой модели селитебной территории. Рассмотрен современный подход к типичному процессу цифрового

моделирования рельефа, который начинается со сбора данных, предварительной обработкой и созданием ЦМР, а завершается расчетом одного или нескольких первичных и вторичных параметров поверхности земли. Используя потенциал расчётно-графического пакета AutoCAD Civil 3D проведено несколько экспериментов по моделированию поверхности стока. Также проведены цифровые эксперименты по моделированию выпадения осадков на определённую территорию и работу ливневой канализации.

## **Глава 4 Основные факторы, влияющие на формирование поверхностного стока**

### **4.1 Влияние изменений ландшафта на формирование ливневого стока**

Современная городская среда представляет собой комплекс природных, архитектурных, экологических, социально-культурных и других условий, которые представляются «естественными» для большинства жителей нашей страны, определяют комфортность проживания на некоторой территории.

Городской ландшафт оказывает значительное влияние на состав объектов хозяйствования, формирование инфраструктуры муниципального образования, которая обеспечивает его бесперебойную жизнедеятельность. Это придаёт дополнительную социальную значимость коммунальному хозяйству, как отрасли жизнеобеспечения.

Отведением и очисткой поверхностных стоков дождевых и талых вод в большинстве городов занимаются специализированные организации. Поверхностные стоки дождевых и талых вод серьезно влияют как на экологическую, так и на техногенную ситуацию в городах, загрязняя почву и водоемы продуктами разрушения и обработки дорожных покрытий, жизнедеятельности животных и природной органики, различными загрязнениями химического происхождения [36].

Услуги коммунальных организаций оформляются соответствующими договорами и стоят недешево. Основными критериями расчёта стоимости услуг по отведению поверхностных вод являются площадь водосбора, состав и свойства отводимых вод, их объем. Регулярное повышение тарифа за данную услугу вызывает желание абонентов точнее и тщательнее подходить к расчёту объёма поверхностного стока [41, 42].

При этом возникает ряд проблем, которым в действующей нормативной базе уделено недостаточно внимания. Нормативы уделяют внимание проектированию новых инженерных систем и основным принципам расчёта без учёта локальных особенностей объектов и климатических изменений. Понятно, что нормативные документы, разработанные для такой огромной страны, как Россия, не могут предусмотреть все особенности городов, промышленных площадок и климата. Однако, в рамках нормативных методик можно более точно рассчитать объём поверхностного стока для каждого отдельного объекта или территории с учетом индивидуальных особенностей. Конечно, этот вопрос требует затрат времени и ресурсов, как людских, так технических, а также специальных знаний и опыта исследовательской работы, что не всегда под силу коммунальной и ресурсоснабжающей организации [71, 77]. Стратегией развития жилищно-коммунального хозяйства в Российской Федерации, утвержденной Распоряжением Правительства РФ N 80-р от 26.01.2016г., определено в качестве приоритетов, в том числе, и наличие баланса интересов различных участников сферы ЖКХ, создание экономических предпосылок для стабильной деятельности каждого участника правоотношений, позволяющих ему вести безубыточную деятельность при соблюдении требований действующего законодательства. В таком случае абоненты обращаются за помощью в научно-исследовательские, проектные или экспертные организации. Ниже рассмотрены примеры исследования территории нескольких объектов, расположенных в Центральном районе г.Тольятти. Выбраны наиболее интересные объекты с точки зрения влияния микрорельефа на формирование поверхностного стока.

#### **4.1.1 Обследование территории муниципальных автодорог**

Как уже отмечалось выше, наиболее значимым фактором формирования ливневого стока является ландшафт, особенности микрорельефа и распределение различных типов поверхностей. В рамках муниципального контракта № 556-дг/2.1 от 31.05.2022 г. на оказание услуг

для нужд городского округа Тольятти. (Идентификационный код закупки 22 36320001741632401001 0073 000 0000 244) проведено техническое обследование территории муниципальных автодорог городского округа Тольятти с целью выявления возможности направления поверхностных сточных вод иных абонентов в муниципальные дождеприемные колодцы и предоставления экспертного заключения о соответствии одному из условий, указанных в п.123(4) и п.203 «Правил холодного водоснабжения и водоотведения», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 29.07.2013 г. № 644 (далее – Правила № 644) при расчете платы за негативное воздействие на работу централизованной системы водоотведения и за сброс загрязняющих веществ в составе сточных вод сверх установленных нормативов в рамках муниципальных контрактов на водоотведение ливневых сточных вод.

При расчёте площади отведения поверхностного стока необходимо исходить из конкретных условий исследуемого объекта: размеров, конфигурации и рельефа водосборного бассейна, источников загрязнения территории. При этом следует учитывать локализацию отдельных участков: зданий, сооружений и прочих строений; участков, под асфальтом, бетоном, плиткой и прочими искусственными покрытиями; площадь открытого грунта и занятого зелёными насаждениями. Дополнительно необходимо выделить участки с отводом поверхностных сточных вод, содержащих специфические примеси (например, промышленные, содержащие нефтепродукты стоки медицинских учреждений и пр.), а также площадей, отличающихся по характеру и интенсивности загрязнения.

Осадки, выпадающие на водосборном бассейне, стекают в виде поверхностного стока лишь частично, а частично расходуются на испарение и инфильтрацию. Объем воды на формирование поверхностного стока зависит как от интенсивности осадков, так и от характеристик водосборного бассейна. Безвозвратными потерями атмосферной влаги для данного водосбора признаются потери на испарение, так как они большей частью

уносятся воздушными потоками за пределы бассейна. Потери же влаги на инфильтрацию в почвенный покров следует рассматривать как «потери» лишь для конкретного участка водосбора или для данного дождя, поскольку позднее они все равно поступят в реку или водоем с подземными водами. Летом интенсивность осадков, полученная по средним месячным суммам, составляет 1,4 – 1,6 мм/ч, в апреле и октябре соответственно 0,25 – 0,30 мм/ч.

Расходы талых вод из-за различия условий снеготаяния по годам и в течение суток, а также неоднородности снежного покрова на застроенных территориях, могут колебаться в широких пределах. Но, они значительно меньше расходов дождевых вод и в большинстве случаев при расчёте водосточных сетей во внимание не принимаются.

Осмотр объектов, указанных в техническом задании, производился 6 июня 2022 г. С 12.00 до 12.45 во время дождя, интенсивностью до 2 мм/ч. По имеющимся материалам топографической съёмки (отметкам высот в характерных точках) построены вектора основных направлений поверхностного стока, определены уклоны дорог. При визуальном осмотре учтены особенности микрорельефа, которые могут существенно повлиять на водоток. К таким особенностям относятся: поперечные профили асфальтированных поверхностей (дорог, тротуаров, ответвлений дорог); профиль железной дороги; отсыпка грунта у заборов; вид покрытия на стоянках (асфальт, гравий); состояние растительного покрова [3].

На основании анализа топографической съёмки и данных Публичной кадастровой карты (rosreestr.ru, по состоянию на 2022 г.) выделены зоны, с которых возможен сток от дождевых и талых вод в направлении двух колодцев ливневых (поверхностных) вод №114 и №140, расположенных на ул. Вокзальная (см. приложения Б и В).

Дождеприемник, в который попадают сточные воды с исследуемой территории расположены проезжей части улиц Вокзальная (№114 напротив КПП-27; №140 напротив ж/д въезда у КПП-9). Состояние полотна дорог и бордюров хорошее.

Согласно проведённого анализа по г. Тольятти, конфигурация профиля и состояние магистральных городских дорог категорий А, Б снабжённых дождеприёмниками более чем на 80 % соответствует требованиям ГОСТ Р 52399-2005, водоотведение с полотна дороги организован по ГОСТ Р 59611-2021. По данным топографической съёмки и дополнительных промеров высот построен поперечный профиль автодороги по улице Вокзальной (рисунок 20).

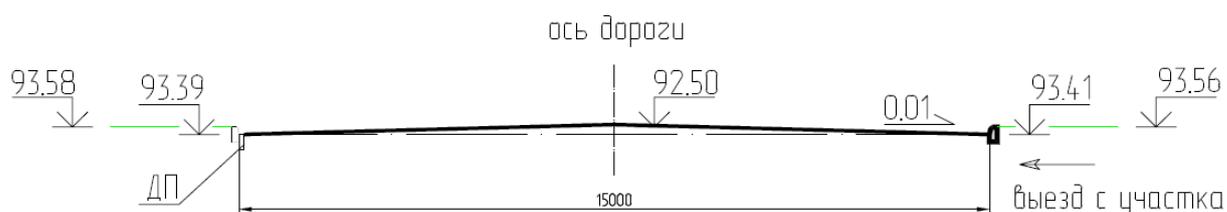


Рисунок 20 – Поперечный профиль автодороги по улице Вокзальной

На рисунке 21 показан узел примыкания дорожного полотна к бордюроному камню и расположение дождеприёмного колодца.

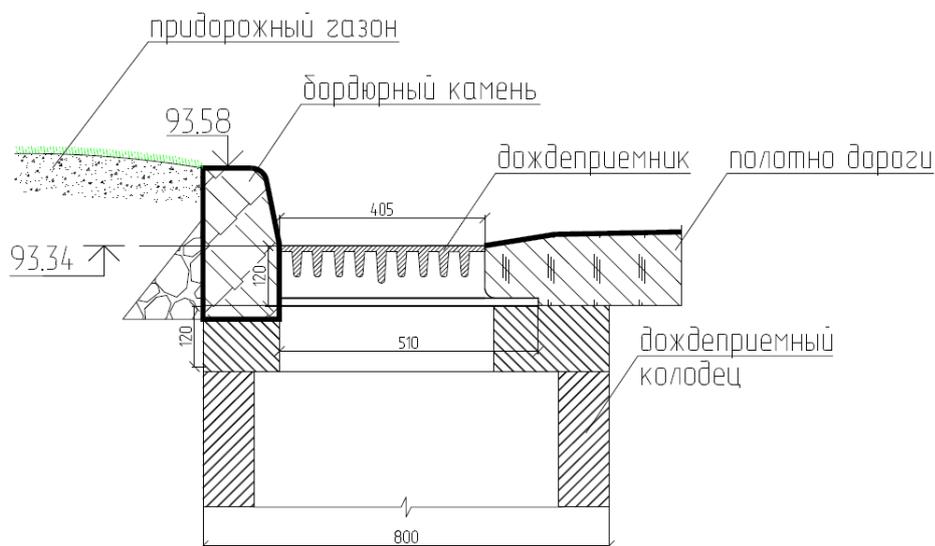


Рисунок 21 – Узел примыкания дорожного полотна к бордюроному камню

Далее приводится анализ возможности поступления поверхностного стока с прилегающих территорий в каждый из колодцев.

Дождеприёмник, ближайший к КК № 114, расположен на проезжей части муниципальной автодороги, его состояние рабочее, засорения нет. Состояние дорожного полотна и бордюров хорошее. Профиль дороги соответствует ГОСТ Р 52399-2005, водоотведение с полотна дороги организован по ГОСТ Р 59611-2021. С южной стороны дороги в дождеприёмники имеется сток со стоянок у КПП 27 и территории АО «АВТОВАЗ».

Дождеприёмник, ближайший к КК № 140, расположен на проезжей части муниципальной автодороги, его состояние рабочее, засорения нет. Состояние дорожного полотна и бордюров хорошее. Профиль дороги соответствует ГОСТ Р 52399-2005. Водоотведение с полотна дороги организован по ГОСТ Р 59611-2021.

С южной стороны дороги в дождеприёмники имеется сток со стоянки у КПП 9 и территории АО «АВТОВАЗ».

С северной стороны ул. Вокзальной, на расстоянии 20 м проложена однопутная железная дорога (*на топосъёмке и спутниковой фотографии отсутствует*) по насыпи с щебёночным балластом по «Инструкции по устройству верхнего строения железнодорожного пути»; СП 238.1326000.2015 «Железнодорожный путь». Отвод поверхностной воды с верхнего строения железнодорожного пути выполнен согласно приведённым нормативам.

Обследована территория объекта для выявления направления водостока, а также прилегающая территория в доступных пределах (промышленные объекты обнесены забором), а также дождеприёмники. Территория выбрана на основании анализа рельефа местности, направления понижения уровня земли.

Основное внимание при этом обращалось на:

- качество асфальтированных поверхностей (дорог, тротуаров);
- наличие и состояние бордюров;
- наличие водостоков с асфальтированных поверхностей на грунт;

- расположение зданий и сооружений, наличие и работоспособность дождевых стоков. Дождевые воды с кровли зданий выводятся на отмостку или на грунт (газон).

Граница зоны водостока определена по отметкам высот на поверхности земли, включены участки кровли, с которых вода также поступает в зону водостока. Расчёт произведён с помощью ГИС модулей для программных пакетов Autodesk. В приложении Г указаны преобладающие направления поверхностного стока с территории водосбора контрольных колодцев.

На основании визуального обследования и топографической съёмки выделена зона, с которой возможно поступление дождевых и талых вод в направлении дождеприемников и контрольных колодцев КК-114, КК-140, расположенных на улице Вокзальной.

Вывод. В КК-114 на улице Вокзальной имеется сток с городской территории по муниципальным автодорогам (ул. Вокзальной, ул. Цеховая), автостоянок возле КПП-27. Через контрольный колодец 114 также проходит транзитный поток с западного направления по трубопроводу диаметром 1500 мм. В КК-140 на улице Вокзальной имеется сток с городской территории по муниципальным автодорогам (ул. Вокзальной) с кадастровых территорий 63:09:0102159:599; 63:09:0102159:568). Через контрольный колодец 140 также проходит транзитный поток с восточного направления по трубопроводу диаметром 800 мм.

В КК-114 и КК-140 с северной стороны по грунту с растительностью поступает поверхностный сток с ж/д насыпи. В исследованных контрольных колодцах отбор проб дождевых и талых вод не может быть осуществлен отдельно от сточных вод иных абонентов.

#### **4.1.2 Исследование территории Школы №10**

В данном разделе приводится пример расчёта ливневого стока с бессточной территории, которая сформировалась в результате ремонта тротуара, обрамляющего периметр муниципального бюджетного общеобразовательного учреждения «Школа №10», находящегося в

ведомственном подчинении Департамента образования администрации г. Тольятти Самарской области.

Необходимо определить фактическое количество воды, поступающее в ливневую канализацию, в зависимости от объёма выпавших осадков (дождя), с учётом микрорельефа территории муниципального образования «Школа №10».

Для достижения поставленной цели сформулированы задачи:

- Рассчитать объём дождевых и талых вод на рассматриваемой территории школы.
- Рассчитать площадь зоны возможного стока поверхностных вод с учётом покрытия, в том числе и кровли зданий.
- Определить зоны и направления поверхностного стока в сторону дождеприемников.

Научная новизна заключается в доработке существующей методики, изложенной в «Рекомендациях по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты», разработанной ГНЦ РФ ФГУП НИИ ВОДГЕО [80] (далее «Рекомендации»). В частности, речь идет об определении объёма поверхностного стока с учётом измерения малых перепадов высот, определении направлений неорганизованного поверхностного стока, построении продольного профиля с учётом изменений локального ландшафта (микрорельефа).

На основании существующих «Рекомендаций», ведётся расчёт объёма поверхностного стока и заключается договор на услуги водоотведения. «Рекомендации» предназначены для проектирования систем ливневой канализации и очистных сооружений. Проектные решения направлены на обеспечения отвода дождевых и талых вод при наиболее неблагоприятных условиях. Фактические условия часто отличаются от проектных и при

переходе на коммерческие отношения, расчётные значения количества стока оказываются в разы больше, а иногда сток и полностью отсутствует [3, 4].

Использование в «Рекомендациях» данных только топографической съёмки не позволяет определять малые перепады высот конкретной местности, которые возникли за последние несколько лет, в том числе после проведения ремонта на внутриквартальных проездах и тротуарах. Автором приняты во внимание опыт по улучшению проектирования и эксплуатации ливневой канализации в других городах РФ, отмеченных в работах [78, 94, 26].

Далее рассматриваются решения поставленных задач, расчёт ведётся согласно «Рекомендаций». Годовой объем поверхностных сточных вод  $W_G$ , образующихся на территории водосбора, определяется по формуле (22), как сумма поверхностного стока за теплый (апрель-октябрь) и холодный (ноябрь-март) периоды года с общей площади водосбора.

$$W_G = W_D + W_T, \quad (22)$$

где  $W_D$ ,  $W_T$  – среднегодовой объем дождевых и талых вод, м<sup>3</sup>.

Среднегодовой объем дождевых ( $W_D$ ) и талых ( $W_T$ ) вод определяется по формулам (23) и (24):

$$W_D = 10 \times h_D \times \psi_D \times F, \quad (23)$$

$$W_T = 10 \times h_T \times \psi_T \times F, \quad (24)$$

где  $F$  – расчетная площадь стока, в га;

$h_D$  – слой дождевых осадков за теплый период года;

$h_T$  – слой талых осадков за холодный период года;

$\psi_D$  и  $\psi_T$  – общие коэффициенты стока дождевых и талых вод соответственно, определяемые как средневзвешенная величина [80, табл.10].

Сравнительный анализ результатов расчёта годового объема стока дождевых и талых вод с договорным объёмом (между абонентом и ресурсоснабжающей организацией) приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Расчет объема отведенных дождевых и талых вод

Месяц	Количество осадков за год $h_G$ , (мм)	Расчётный годовой объем $W_G$ , (м <sup>3</sup> )	Договорной объем годовой $W_G$ , (м <sup>3</sup> )
январь	45,2	710,48	710,508
февраль	32,5	510,85	510,874
март	58,2	914,82	914,857
1 квартал	135,9	2136,14	2136,239
апрель	44,1	316,13	321,123
май	25,4	182,08	184,955
июнь	27,5	197,13	200,247
2 квартал	97	695,34	706,325
июль	54,3	389,25	395,396
август	50,4	361,29	366,997
сентябрь	31,1	222,94	226,461
3 квартал	135,8	973,48	988,854
октябрь	49,9	357,71	363,356
ноябрь	23,4	367,81	367,829
декабрь	40,1	630,31	630,341
4 квартал	113,4	1355,83	1361,526
2021 год	482,1	5160,80	5192,944

Примечание: Количество осадков принято по данным Тольяттинской специализированной гидрометеорологической обсерватории. Дополнительно проведён анализ метеоданных за последние 2 года.

Как видно из таблицы, результаты расчётов, проведённые автором и ресурсоснабжающей организацией, практически совпадают. Расчётные значения немного меньше договорных (разница менее 1%), что вызвано погрешностью определения площадей.

При расчёте площади отведения неорганизованного поверхностного стока необходимо исходить из конкретных условий исследуемого объекта: размеров, конфигурации и рельефа водосборного бассейна, источников загрязнения территории. При этом следует учитывать локализацию отдельных участков: зданий, сооружений и прочих строений; участков, под асфальтом, бетоном, плиткой и прочими искусственными покрытиями; площадь открытого грунта и занятого зелёными насаждениями. Дополнительно необходимо выделить участки с отводом поверхностных сточных вод, содержащих специфические примеси (например, промышленные, содержащие нефтепродукты, стоки медицинских учреждений и пр.), а также площадей, отличающихся по характеру и интенсивности загрязнения.

Обследована территория объекта и прилегающая территория в пределах 30 – 120 м для выявления направления водостока. Территория выбрана на основании анализа рельефа местности, направления понижения уровня земли. Основное внимание, при этом, обращалось на:

- качество асфальтированных поверхностей (дорог, тротуаров);
- наличие и состояние бордюров;
- наличие водостоков с асфальтированных поверхностей на грунт;
- расположение зданий и сооружений, наличие и работоспособность дождевых стоков с кровли. Дождевые воды с кровли зданий выводятся на отмостку и далее на грунт (газон). Кровля главного здания школы плоская.

На основании анализа топографической съёмки и натурного обследования выделена зона водосбора площадью 2,2455 га. Расчёт площадей по виду покрытия приведён в таблице 6.

Таблица 6 – Вид покрытия, площади и общий коэффициент стока

Вид покрытия	Площадь, га	Коэффициент стока дождевых вод $\psi_D$	Коэффициент стока талых вод $\psi_T$
кровли зданий	0,2262	0,7	0,7
асфальт и бетон	0,5943	0,7	0,7
газоны	1,425	0,1	0,7
грунт без растений	0	0,2	0,7
ВСЕГО	2,2455		

Для определения направления поверхностного стока с территории школы построены продольные профили рельефа местности и смежных участков до зданий с выделением характерных точек микрорельефа (ограждения, бордюры, тротуары, автодороги) (рисунок 22). На профилях (рисунок 23) синим цветом выделена территория школы №10, красным – прилегающая территория.

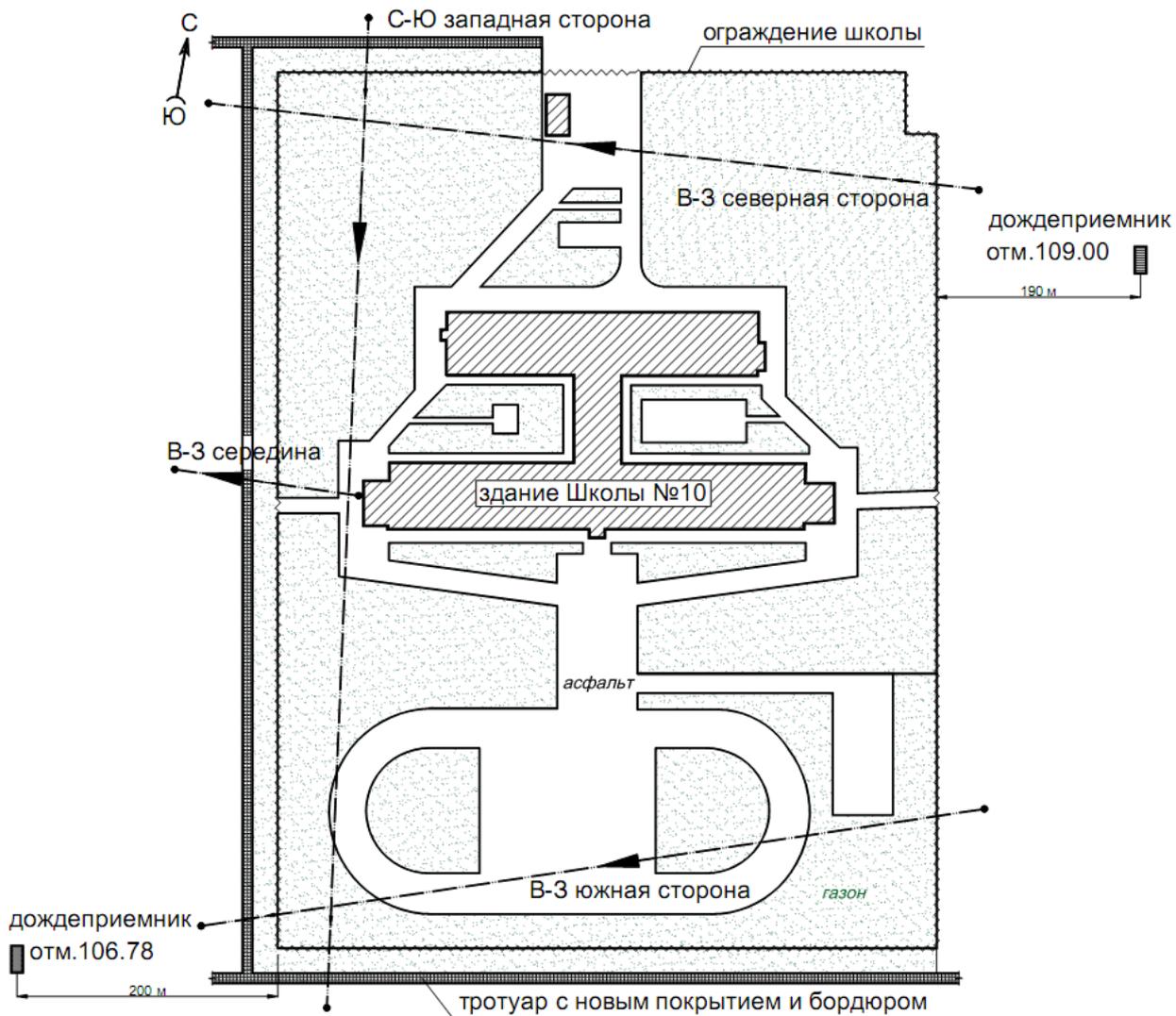
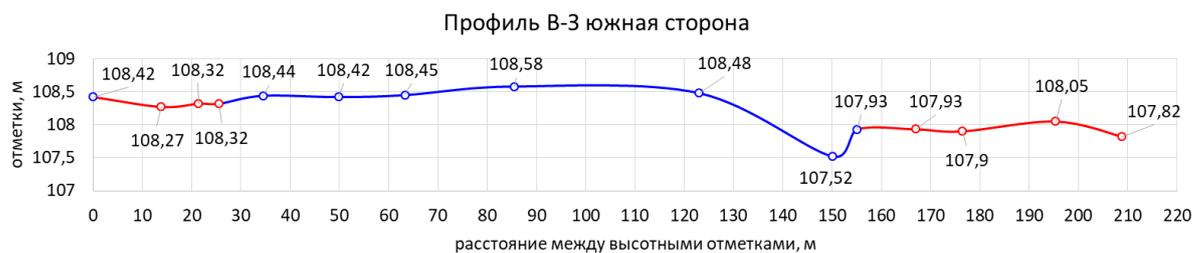
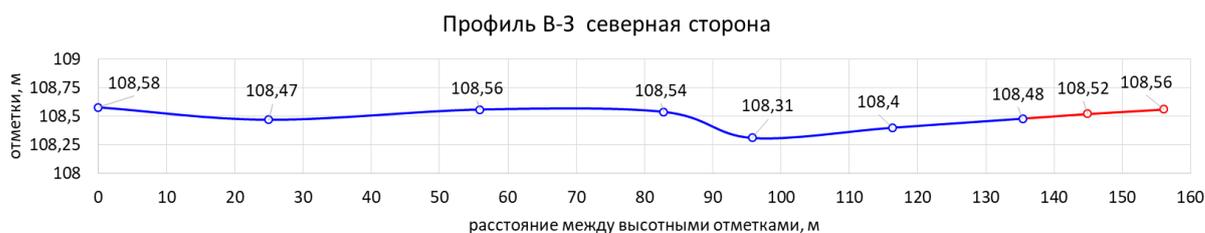


Рисунок 22 – Направления для построения продольных профилей рельефа на территории школы и прилегающих территорий





С-Ю западная сторона; В-3 южная сторона; В-3 северная сторона

**Рисунок 23 – Продольные профили поверхности рельефа на территории школы и прилегающей территории**

При промере высот в 12 точках по периметру школы обнаружены небольшие (0,08 – 0,2 м) превышения высот по линии ограждения, особенно заметные с северной, восточной и северо-западной сторон. С западной стороны проходит новый асфальтированный тротуар (рисунки 24, 25). Между тротуаром и забором имеется локальное понижение (0,15 – 0,3 м), препятствующее движению воды с территории школы в западном направлении в дождеприемник с отм. 106.78 (рисунок 25). Аналогичная ситуация и с южной стороны. Между школьным стадионом и асфальтированным тротуаром имеется локальное понижение, но менее выраженное по уклонам и отметкам. Наивысшая отметка территории школы 108.65, соответственно в дождеприемник с отм. 109.00 вода не поступает.



**Рисунок 24 – Общий вид одной из точек промера высотных отметок**



**Рисунок 25 – Замер уровня грунта относительно ограждения**

Используя полученные сведения на основании предложенных дополнительных промеров высотных отметок установлено, что территория Школы №10 находится в бессточной зоне, которая образовалась, в том числе, после укладки нового асфальта на тротуары с южной, северной и западной сторон. На протяжении десятилетий по периметру (ограждению) образовалось возвышение. Об этом свидетельствуют наблюдения формирования луж, особенно в период таяния снега на асфальтированных входах на территорию школы.

На основании натурного обследования и топографической съёмки установлено, что дождевые и талые воды не могут попадать с бессточной территории «Школы» в дождеприемники коммунальной организации. Фактическое количество воды, поступающее в ливневую канализацию, в зависимости от объёма выпавших осадков (дождя), с учётом микрорельефа территории муниципального образования «Школа №10», равно нулю. Услуга водоотведения физически не может быть оказана и, как следствие, нет предмета договора со специализированной организацией, а муниципальный объект «Школа №10» должен быть освобожден от финансовой нагрузки по оплате за водоотведение ливневых стоков и талых вод. Результат работы опубликован [3].

#### **4.2 Определить коэффициенты покрова $z_i$ для наиболее характерных типов естественных поверхностей в г.о. Тольятти**

Ещё один путь решения обозначенной проблемы является более точный расчёт объёма поверхностного стока, который учитывает не только ландшафтные особенности местности; микрорельеф, тип покрытия, но также и водопоглощающие свойства этих покрытий. Согласно применяемого алгоритма расчёта по [80] вид поверхности или площади стока разбит на группы, для которых применяется общий коэффициент стока,  $\Psi_0$ . Данный коэффициент удобен в расчёте, однако не учитывает местные особенности почв, которые в условиях городов Поволжья весьма разнообразны и

обладают большим диапазоном влагоёмкости. Если для твёрдых покрытий (кровли и асфальтобетонные покрытия)  $\Psi_{\partial}$  достаточно стабилен, то для естественных почвенных поверхностей он может значительно изменяться и зависеть от типа растительности, механических свойств и т.д. Настоящая работа посвящена уточнению коэффициентов покрова  $z_i$  для различных видов поверхности стока, на который опирается определение общего коэффициента стока  $\Psi_{\partial}$ .

Детальное обследование территорий при расчёте фактического поверхностного стока в сети дождевой канализации выявило определённые недостатки [80] замечено, что в ней не вполне детально рассмотрен вопрос о водопоглощающей характеристике поверхности. При проектировании городской системы ливневой канализации усреднённые данные водопоглощения поверхности выражены коэффициентом стока  $\Psi_{\partial}$  и определяется как средневзвешенная величина для всей площади водосбора с учетом средних значений коэффициентов стока для различного рода поверхности. В настоящее время, при заключении договоров между коммунальными службами и абонентами расчёт среднегодового количества дождевых вод  $W_{\partial}$  определяется строго по нормативу. Следует учесть, что нормативные документы: Рекомендации ВодГЕО; СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения», главным образом направлены на проектирование систем канализации для обеспечения расчётной пропускной способности трубопроводов.

Цель: определить коэффициенты покрова  $z_i$  для наиболее характерных типов естественных поверхностей в г.о. Тольятти.

Для достижения поставленной цели выделены следующие задачи:

- Выявить характерные типы почв и места отбора образцов на территории районов города.
- Провести лабораторные исследования отобранных образцов на предмет определения физико-механических свойств.

- Определить коэффициента покрова  $z_i$  для разных видов поверхности стока.
- Методы исследования: системный и факторный анализ, метод экспертных оценок.

Для именованная поверхности водостока с растительным слоем или спланированные дороги и площадки без твёрдого покрытия применяется термин «почва» – покровный слой, сформированный в результате совместного действия различных природных факторов почвообразования, в том числе биологического и антропогенного. «Доля осадков, которая превышает величину инфильтрации, расходуется на образование пленки и на заполнение бессточных неровностей на поверхности, т. е. расходуется на так называемое поверхностное задержание. Идущая на поверхностный сток и перехватываемая дождеприемниками часть осадков (за вычетом потерь на перехват, испарение в период ливня, аккумуляцию в неровностях поверхности и инфильтрацию) представляет собой общий слой стока. Количество перехваченной воды зависит от характера ливня, вида и плотности поверхностного (растительного) покрова и сезона года. Отношение объема поверхностного стока на водосборе в течение одного ливня к общему объему осадков, выпавших за время этого ливня, называется коэффициентом поверхностного стока  $\Psi$ » [80].

$$\Psi = z \cdot q^{0,2} \cdot t^{0,1}, \quad (25)$$

где  $z$  – коэффициент вида поверхности;  
 $q$  – интенсивность дождя, л/с на 1 га;  
 $t$  – продолжительности дождя, мин.

«Сеть отведения ливневого стока обычно обслуживает территории, имеющие различные поверхности – с покрытиями и без них. Для упрощения расчетов обычно находят среднее значение коэффициента стока по заданной территории. Его определяют путем умножения относительной площади

водосбора (с покрытием или без него) на соответствующий коэффициент. Сумма полученных значений дает среднее значение коэффициента стока» [80 п. 6.2.6. п. 7.3].

Использование усреднённых коэффициентов значительно упрощает проектирование, особенно при новом строительстве, когда не известны точные характеристики поверхностей. При коммерческих расчётах за водоотведение возникает необходимость точного определения количества воды, поступающего в дождеприёмные колодцы. В этом случае необходимо знать, какая часть воды задерживается разными видами почв.

Научная новизна заключается в доработке существующей методики, изложенной в «Рекомендациях», в частности, установлении математической зависимости и возможности точного расчёта коэффициент покрытия  $z_i$ , для определения коэффициента поверхностного стока  $\Psi$ , на котором базируются коммерческие расчёты за водоотведение дождевых и талых вод в систему ливневой канализации. Это будет способствовать повышению экономической эффективности при расчётах между абонентами и энергоснабжающими организациями, позволит более эффективно эксплуатировать и прогнозировать работу ливневую канализацию.

Поскольку оценка влажности связана со многими трудностями, обусловленными неоднородностью ее распределения в почве, влиянием атмосферы, растительного покрова и других природных факторов, надежные результаты могут быть получены лишь при комплексном использовании различных методов, дополняющих друг друга [3].

Площадь городского округа Тольятти составляет 31 480 га, из них селитебные территории – 5 270 га (16,7%); промышленные зоны – 5 533 га (17,6 %); территории, занятые транспортной инфраструктурой – 1 030 га (3,3 %); лесопарковая зона – 8040 га (25,5 %); земли сельскохозяйственного использования — 724 га (2,3 %).

«Дерново-подзолистые почвы левобережья Ставропольского района формировались под влиянием пойменных сосновых лесов на лёгких песчаных субстратах.

Дерновые и выщелоченные черноземы образовались под воздействием широколиственных лесов при периодически промывном режиме.

Формированию почв открытых пространств способствовала разнотравно-злаковая растительность на поверхностных суглинках. Прибрежная полоса занята аллювиальной почвой» [4].

Особенностью грунтовых поверхностей в г. Тольятти является наличие обширных техногенных искусственных почв. Они образовывались хаотичного перемешивания компонентов в процессе строительства, а в жилой застройке верхний плодородный слой перемещался и восстанавливался после завершения земляных работ. Таким образом можно выделить следующие типы почв:

- Черноземы типичные среднегумусные.
- Черноземы выщелоченные.
- Черноземы оподзоленные.
- Пойменные (аллювиальные).
- Дерново-подзолистые.

«Черноземы типичные среднегумусные и выщелоченные занимают около 80% селитебной территории г. Тольятти, преобладают в Автозаводском (обозначены символом ●) и Центральном районах (обозначены о), в Комсомольском – распространены песчаные и дерново-подзолистые почвы (обозначены × и \*), см. рисунок 26» [4].



А – Автозаводской р-н; Ц – Центральный р-н; К – Комсомольский р-н

Рисунок 26 – Места отбора проб почвы в г. Тольятти

Большая часть дождеприёмников в городе размещены на автомобильных дорогах в жилых и промышленных секторах. Муниципальные объекты, лечебные, учебные заведения, как правило, находятся в жилой застройке. Поэтому целесообразно проводить отбор проб почв не территории этих объектов и вблизи дорог. Отбор проб почвы осуществлялся согласно требованиям [33].

«Под гранулометрическим (механическим) составом почв и почвообразующих пород понимается относительное содержание в почве элементарных почвенных частиц (ЭПЧ) различного диаметра независимо от их минералогического и химического состава. Гранулометрический состав выражается, прежде всего, в виде массовых процентов фракций гранулометрических частиц разного размера. Гранулометрический состав почв отражает содержание минеральных частиц в мелкоземе, в состав которого входят частицы менее 1 мм» [25].

Классификация механических элементов почв по Н.А. Качинскому (1957 г.):

Граничные значения, мм	Название фракции
<0,0001	Коллоиды
0,0001 — 0,0005	Тонкий ил
0,0005 — 0,001	Грубый ил
0,001 — 0,005	Мелкая пыль
0,005 — 0,01	Средняя пыль
0,01 — 0,05	Крупная пыль
0,05 — 0,25	Тонкий песок
0,25 — 0,5	Средний песок
0,5 — 1	Крупный песок
1 — 3	Гравий
больше 3	Каменистая часть почвы

Основным параметром при расчёте коэффициентом поверхностного стока  $\Psi_i$  является коэффициент вида поверхности  $z_i$ , а интенсивность и продолжительности дождя случайными переменными. Поэтому необходимо найти взаимосвязь коэффициента  $z_i$  с какой-либо физико-механической характеристикой почвы. Значения коэффициента стока  $\Psi_i$  и коэффициента покрова  $z$  для разного вида поверхностей согласуются с типом почвы и очевидно с её составом. Таким образом в качестве исходного параметра для расчёта  $z$  можно использовать гранулометрический состав почвы.

Отобранные образцы были просушены в лабораторном помещении при средней температуре 22 С, влажности воздуха 42%. Просушенная почва размята в ступке, из пробы удалены посторонние включения (крупные органические остатки, мелкие камни) на сите для песка ГОСТ32727-2014 с квадратной ячейкой 4 мм.

Гранулометрический состав образцов проведён при помощи ситового метода. Результаты вычисления гранулометрического состава грунтов следует определять с погрешностью до 0,1 %.

Для снижения вероятности ошибок проведен анализ не менее 5 образцов из разных точек по районам города. Результаты приведены в таблице 7. Т.к. разброс значений составил фракционного состава находится в пределах 20%, т.е. состав почв практически идентичен, для контроля образцы были смешаны и получен средний гранулометрический состав для каждого района г. Тольятти.

Таблица 7 – Фракционный состав проб почвы по районам города

Район города	№ пробы	Фракционный состав, мм			
		>1	1 - 0,5	0,5 - 0,25	<0,25
Автозаводской	1	16	32	28	24
	2	22	25	34	19
	3	20	24	42	14
	4	24	25	33	18
	5	19	22	38	21
Средний %		20	26	35	19
% частиц $Q_i$		100,00	79,80	54,20	19,20
Центральный	1	20	22	40	18
	2	18	23	31	28
	3	22	16	29	33
	4	19	22	34	25
	5	20	22	27	31
Средний %		20	21	32	27
% частиц $Q_i$		100,00	80,20	59,20	27,00
Комсомольский	1	82	9	7	2
	2	74	18	5	3
	3	76	11	8	5
	4	84	7	8	1
	5	78	11	6	5
Средний %		79	11	7	3
% частиц $Q_i$		100,00	21,20	10,00	3,20

Для описания и расчета основных физико-механических параметров почвы применяется непрерывная функция распределения. Вид графиком может различаться в зависимости от фракционного состава проб [73].

Интегральная кривая – это график, отражающий суммарное

содержание фракций мельче определенного диаметра  $Q_i$  и представляет собой в общем виде некую функцию  $Q=f(d)$ . Принимая общее содержание частиц за 100%, уравнение нормального распределения может быть записано как:

$$F_g(d) = \frac{100}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{d-\bar{d}}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (26)$$

где  $d$  – средний размер частиц, величина которого зависит от метода усреднения, мм;

$\sigma$  – стандартное отклонение распределения вокруг среднего.

«По оси ординат отмечают суммарное содержание фракций в процентах в нарастающем порядке от наименьшего диаметра к наибольшему. Разность ординат двух точек кривой однородности показывает, чему равно процентное содержание в грунте частиц, диаметры которых находятся в пределах промежутка, соответствующего разности абсцисс этих двух точек» [81]. Разбивая интегральную кривую на интервалы по оси абсцисс и откладывая соответствующие ординаты точек пересечения вертикальных линий с интегральной кривой для каждого интервала  $\Delta d_i$  получается ряд интервалов  $\Delta Q_i$ . Усреднённое значение  $\Delta Q_i$  для оценки фракции пробы обычно выбирается около 60% (рисунок 27).

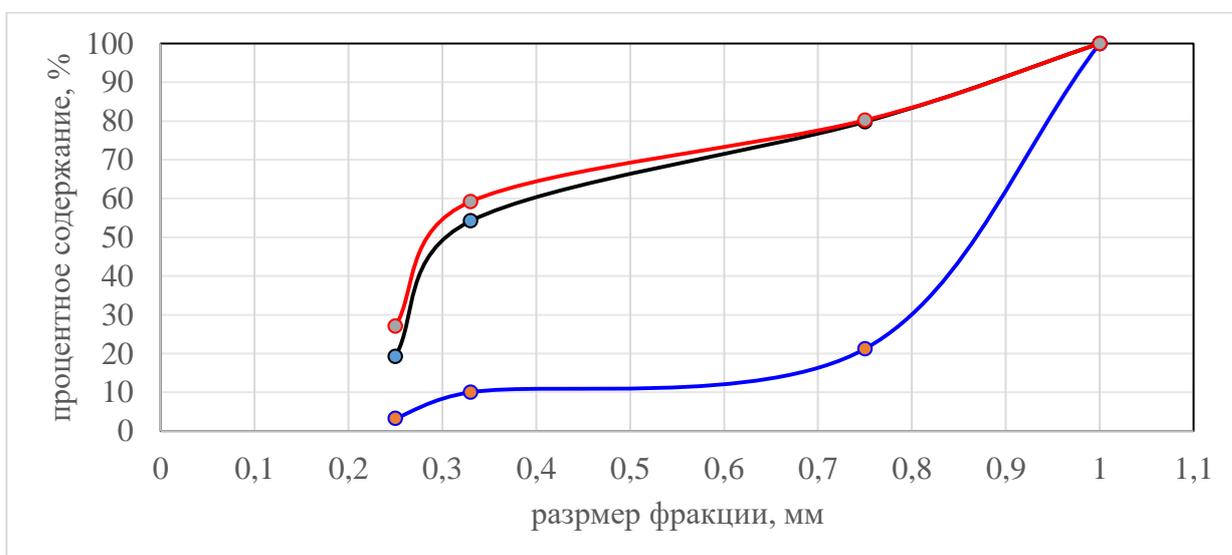


Рисунок 27 – Интегральное распределение частиц по размерам

Таким образом почвы из Автозаводского и Центрального районов можно отнести к фракциям средний песок (0,25 – 0,5); из Комсомольского к крупному песку (0,5 – 1) согласно классификации Н.А. Качинского. Опираясь на данные таблицы 8 и классификации механических элементов почв можно сопоставить значения коэффициента покрова  $z_i$  с размерами частиц почвы.

Таблица 8 – Значения коэффициента покрова  $z_i$  для разного вида поверхностей

Вид поверхности стока	Коэффициент покрова, $z_i$	Размер фракции $d$ , мм
Кровли и асфальтбетонные покрытия (водонепроницаемые поверхности)	0,33 - 0,23	
Брусчатые мостовые и щебеночные покрытия	0,224	
Булыжные мостовые	0,145	
Щебеночные покрытия, не обработанные вяжущими материалами	0,123	больше 3
Гравийные садово-парковые дорожки	0,09	1 – 3
Грунтовые поверхности (спланированные)	0,064	0,5 – 1
Грунтовые поверхности без растительности	0,52	0,25 – 0,5
Газоны, органо-минеральный грунт, содержащий от 3 % до 50 % (по массе) органического вещества	0,038	0,05—0,25

На рисунке 28 представлен график зависимости коэффициента покрова  $z_i$  от фракционного состава грунта  $d$ . По экспериментальным данным построен график 1 (пунктир), график 2 (сплошной) отражает расчётную зависимость, которая описывается следующим уравнением:

$$z_i = 0,074 \times d^{0,35}. \quad (27)$$

Графики имеют степенную зависимость и достаточно близко подходят друг к другу, критерий Пирсона  $R^2 = 0,9959$ .

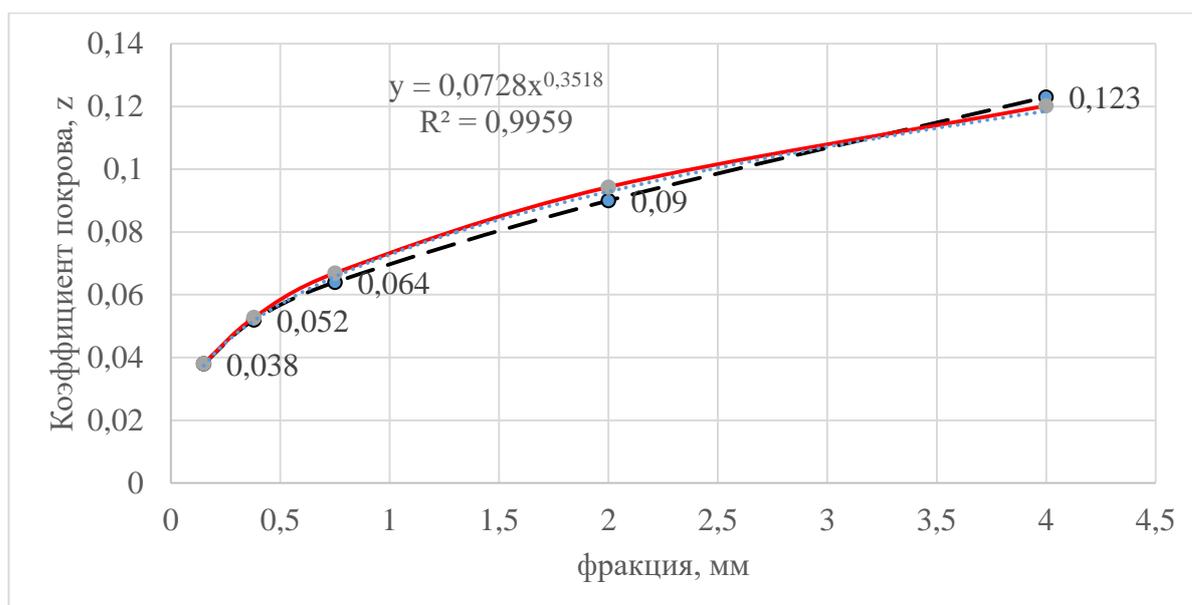


Рисунок 28 – Зависимости коэффициента покрова  $z_i$  от фракционного состава грунта  $d$ .

Используя полученную зависимость (27), можно определить значение коэффициента покрова  $z_i$  от фракционного состава грунта  $d$  для районов г. Тольятти: Автозаводской, Центральный – 0,054; Комсомольский – 0,071. Следует заметить, расчёт проведён для поверхности, практически свободной от растительности (грунтовые дороги, площадки хранения, стоянки, не благоустроенные территории).

### 4.3 Расчёт испарения как элемента водного баланса

Имея в основе математическую модель, рассмотренную в главе 2 и экспериментальные данные проведён расчёт испарения для промышленного предприятия – территория складов с погрузочной асфальтированной площадкой общей площадью 1,1 га. Для определения влияния нагрева асфальтированных поверхностей на испарение проведён натурный эксперимент.

Замеры температуры на асфальтированной поверхности тротуара в июле 2023 года показали, что на открытых солнечных поверхностях температура асфальта может достигать 48 °С, но в теневых зонах, а также

ночью температура поверхности практически равна температуре воздуха. Следует заметить, что при приближении дождя инсоляция значительно снижается, температура воздуха понижается на несколько градусов, а ветер усиливается. Однако, за счёт тепловой инерции температура прогретых поверхностей остаётся иногда выше на десятки градусов относительно температуре воздуха. На рисунке 29 представлены графики динамики температур воздуха и поверхности асфальтированного тротуара 6 июля  $T_{6.08}$  (пасмурный день) и 8 июля  $T_{8.08}$  (ясный день) 2023 года. Замеры температуры на поверхности асфальта  $T_{асф}$  проводились через 4 часа инфракрасным пирометром. Величина испарения с этой поверхности в ясный день почти в 2 раза выше, чем в пасмурный.

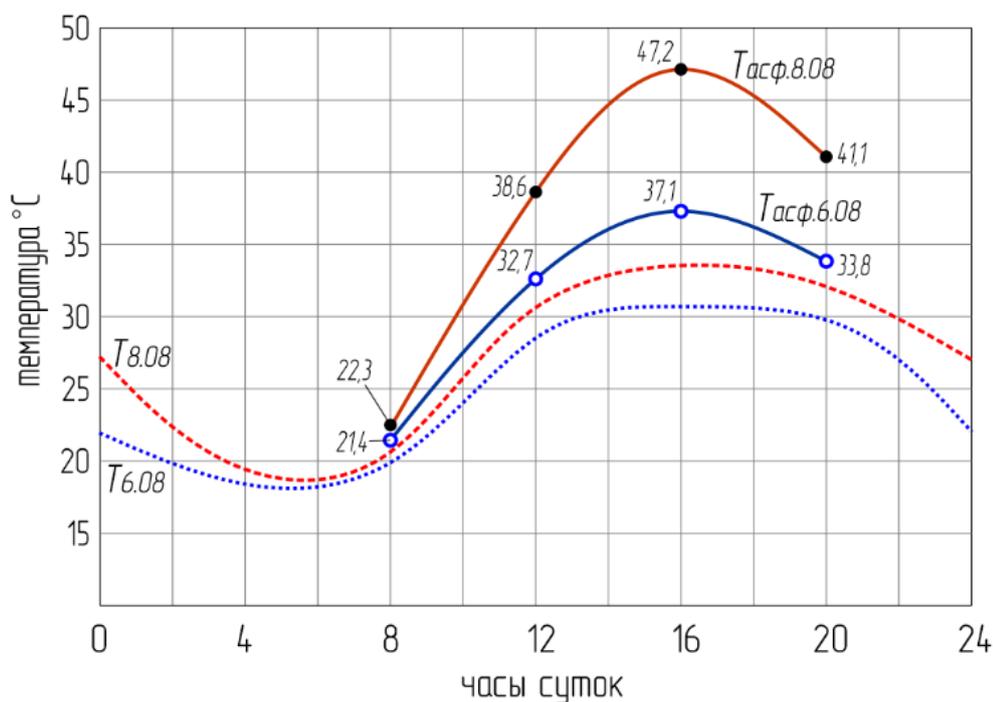


Рисунок 29 – Динамика температур.

В качестве исходных данных для расчёта взяты: топографическая съёмка М1:500; сведения из договора на водоотведение; метеорологические сводки за апрель – октябрь 2023 г., месячная за июль 2023; суточная за 16 июля. Выбор даты обусловлен максимальным количеством выпавших осадков – 7,18 мм/сут, продолжительность дождя 6 часов. На основании

суточной метеосводки проведён (таблица 9) расчёт количества испарившейся воды (таблица 10).

Таблица 9 – Метеосводка за 16 июля 2023 г.

Параметры	Ед. изм.	Значения							
		0	3	6	9	12	15	18	21
время, $\tau$	час								
осадки, $h$	мм						2,38	3,84	0,96
температура воздуха, $T_{cp}$	°С	18	17	16	19	20	17	17	17
относительная влажность, $\Phi$	%	77	68	87	66	71	91	92	87
скорость ветра, $v$	м/с	2,9	3,8	5,1	6	5,6	4,7	4,3	4,2
порывы ветра	м/с	7,7	10	11,8	8	8,4	10,4	10,9	11,5

Таблица 10 – Расчёт испарения за 16 июля 2023 г.

Параметры	Символ	Ед. изм.	Значение
скорость ветра средняя	$v$	м/с	4,58
температура воздуха средняя	$T_{cp}$	°С	17,69
относительная влажность средняя	$\Phi$	%	79,88
максимальная упругость вод. пара	$E_1$	гПа	20,14
парциальное давление водяного пара в воздухе	$\epsilon$	гПа	16,09
дефицит влажности	$d_v$	гПа	4,05
максимальное значение испарения	$E_{ис}$	мм	0,61

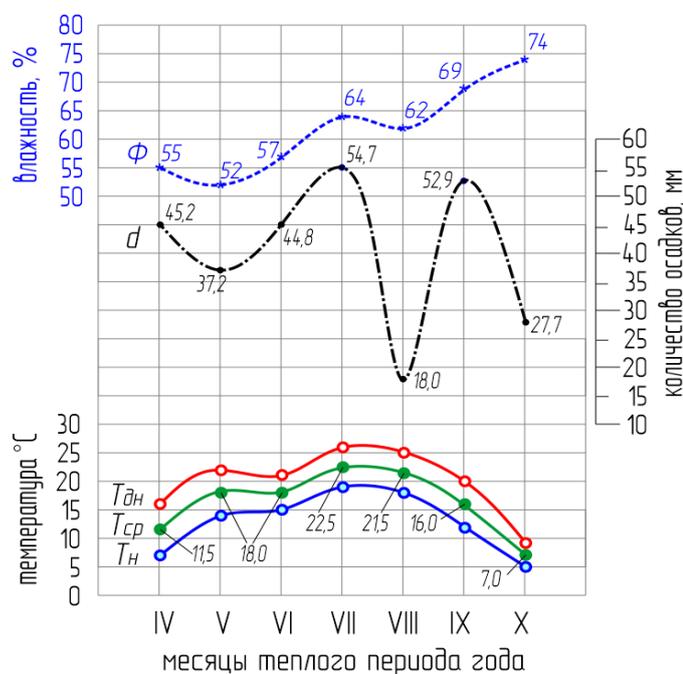
На следующем этапе проводится анализ месячных метеоданных за июль 2023 (таблица 11). Месяц выбран как средний за рассматриваемый теплый период года. Для практического расчёта необходимо рассматривать все месяцы года. Сводный график метеоданных, необходимых для расчёта испарения, за апрель – октябрь 2023 г. показан на рисунке 29.

Таблица 11 – Метеосводка за июль 2023 г.

дата	Температура воздуха $T$ , °С	Скорость ветра $V$ , м/с	Влажность воздуха $\Phi$ , %	Кол-во осадков $h$ , мм	максимальное значение испарения $E_{ис}$ , мм	Кол-во испаренной воды $h_{исп}$ , мм	максимальная упругость вод. пара $E_1$ , гПа	Парциальное давление водяного пара в воздухе $e_0$ , гПа	дефицит влажности $d_v$ , гПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20,4	2,8	84	6,8	1,62	5,18	23,95	22,5	1,44
2	19,2	3,2	79	0	0,00	0	0	0	0
3	22,5	2,7	68	0	0,00	0	0	0	0
4	24,5	3,1	62	0	0,00	0	0	0	0

Продолжение таблицы 11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	26,4	4,6	58	0	0,00	0	0	0	0
6	26,5	3,4	56	0	0,00	0	0	0	0
7	27,3	5,5	58	0	0,00	0	0	0	0
8	26,9	3,7	47	0	0,00	0	0	0	0
9	27,8	5,3	69	0	0,00	0	0	0	0
10	29,7	4,5	65	0	0,00	0	0	0	0
11	28,8	3,5	71	0	0,00	0	0	0	0
12	17,7	3,8	92	4,4	0,85	3,55	20,23	19,2	1,01
13	16,4	3,5	94	5,2	0,55	4,65	18,63	17,5	1,12
14	17,5	4,4	88	0	0,00	0	0	0	0
15	19,5	3,7	85	0	0,00	0	0	0	0
16	18,6	4,3	96	7,2	0,49	6,69	21,41	20,6	0,86
17	17,5	2,8	95	5,5	0,42	5,08	19,98	19,4	0,60
18	18,5	4,5	93	3,8	0,88	2,92	21,28	19,8	1,49
19	20	4,7	94	2,4	0,86	1,54	23,36	22,0	1,40
20	19,5	3,6	82	0	0,00	0	0	0	0
21	20,6	4,6	89	4,9	1,61	3,29	24,24	22,8	1,45
22	19,8	4,2	92	0,8	1,04	0,00	23,07	21,9	1,15
23	20	3,8	92	2,6	0,98	1,62	23,36	21,7	1,64
24	20,5	4,6	91	3,4	1,31	2,09	24,09	22,9	1,20
25	22,6	2,8	78	0	0,00	0	0	0	0
26	23,9	3,2	81	0	0,00	0	0	0	0
27	27,1	3,8	92	0,2	1,50	0,00	35,84	33,0	2,87
28	29,4	3,6	74	0	0,00	0	0	0	0
29	28,9	3,5	87	3,6	2,55	1,05	39,81	37,0	2,79
30	23,3	4,6	84	0	0,00	0	0	0	0
31	19,9	4,6	85	1,7	2,10	0,00	23,22	22,1	1,16
июль				52,48		37,66			



$\Phi$  – относительная влажность воздуха, %;  $d$  – количество осадков, мм;  $T_{дн}$  – дневные температуры, °C;  $T_{ср}$  – среднесуточные температуры, °C;  $T_{н}$  – ночные температуры, °C

Рисунок 29 – Сводный график метеоданных за апрель – октябрь 2023 г.  
При расчёте по среднесуточным метеоданным величина испарения

несколько меньше по сравнению с часовыми данными, т.к. не учитывается продолжительность дождя, т.е. дождь предположительно идет 24 часа. Однако такой расчёт позволяет значительно сократить объём обрабатываемой информации. В случае если величина испарения больше или приближается к количеству выпавших осадков, то стока в дождеприёмник нет, что отмечалось автором при проведении натурных наблюдений. Вода либо испаряется, либо заполняет поры и пустоты поверхности. При составлении водного баланса поступление и расход воды уравниваются.

Основываясь на полученном результате можно перейти к расчёту годового объёма поверхностных сточных вод, образующихся на территории водосбора с учётом испарения. В настоящей работе данные о годовом количестве выпавших осадков взяты из договора на водоотведение с промышленного объекта площадью 1,1 га. Результаты расчётов представлены в таблице 12, в столбце  $W$  сток с территории без учёта испарения;  $W_{ис}$  – с учётом испарения. Введение поправки на испарение, распределённой по месяцам дало расчётное снижение количество отводимой воды на 13%.

Таблица 12 – Результаты расчёта годового объёма поверхностных сточных вод с учётом испарения

Месяц	Количество осадков, h, мм	Объём стока $W$ , м <sup>3</sup>	Объём стока с учётом испарения, $W_{ис}$ , м <sup>3</sup>
январь	57,7	358,40	358,40
февраль	44,3	275,17	275,17
март	35,6	221,13	221,13
1 квартал	137,6	854,71	854,71
апрель	45,2	271,98	226,79
май	37,2	223,84	153,96
июнь	44,8	269,57	204,11
2 квартал	127,2	765,39	584,86
июль	54,7	329,14	256,25
август	18	108,31	41,55
сентябрь	52,9	318,31	275,90
3 квартал	125,6	755,76	573,70
октябрь	27,7	166,68	147,57
ноябрь	31,6	196,28	196,28
декабрь	32,2	200,01	200,01
4 квартал	91,5	562,97	543,86
2023 год	481,9	2938,82	2557,12

В процессе работы были рассмотрены различные методики определения величины испарения, которые применяются на практике [65]. Одним из важных критериев выбора был доступ к необходимым исходным данным, как для научных изысканий, так и для практического применения. Например, согласно СТП ВНИИГ 210.01.НТ-2010 «Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений» среднее годовое относительное испарение,  $E/E_0$  для Самарской области составляет 0,7, а рассчитанное 0,75. Однако имеется разбежка по средней месячной испаряемости, поскольку в предлагаемом расчёте взяты фактические метеоданные за 2023 год, а не многолетние как в [80]. Проведённый сравнительный анализ рассмотренных методик и контрольные расчёты показали сходимость результатов в пределах  $\pm 18\%$ , что подтверждает адекватность предложенного метода.

Перспективным направлением в дальнейшем уточнении количества испаряющейся воды является разделение влагонепроницаемых и почвенных поверхностей. Однако такой расчёт требует дополнительного изучения термодинамических свойств разных материалов, их состояния на расчётный период, а также измерения локальных метеоусловий на каком-либо объекте. В практическом плане проверочный расчёт испарения с разных поверхностей показал незначительное расхождение, поэтому для окончательного расчёта предлагается при расчёте количества среднегодовых объёмов поверхностных сточных вод вычитать из количества осадков за месяцы со средними положительными температурами рассчитанное значение испарения, а дальше вести расчёт согласно [80]. Предлагаемые решения направлены на повышение экономической эффективности при расчётах за водоотведение, позволит более эффективно эксплуатировать и прогнозировать работу городской инфраструктуры.

#### Выводы по главе 4

Проведя более 20 обследований муниципальных объектов разного назначения (детских садов, школ, больниц) выделены наиболее значимые компоненты водного баланса: микрорельеф; коэффициенты покрова  $z_i$ ; величина испарения с различных поверхностей. На основе теоретических знаний и проведенных экспериментов определены и апробированы следующие факторы:

- метод расчёта направлений поверхностного стока с помощью измерения малых высот, построения продольного профиля с учётом микрорельефа. Предлагаемый метод призван повысить достоверность расчёта объёма поверхностных вод, которые попадают в дождеприёмники; учесть влияние изменений ландшафта на формирование ливневого стока.
- определены коэффициенты покрова  $z_i$  для наиболее характерных типов почв в г.о. Тольятти. На основе анализа фракционного состава проб, отобранных в разных районах города, определено среднее (обобщённое) значение размеров частиц почвы  $d$ . Установлено математическое соответствие и предложено уравнение, которое позволяет рассчитать коэффициент покрова  $z_i$ , при известном среднем значении размеров частиц почвы.
- на базе математической модели, предложенной д.т.н., профессором Поповым В. А. апробирован расчёт испарения с различных поверхностей, который позволяет вычислить среднюю величину испарения опираясь на метеоданные и натурные эксперименты по влиянию температуры асфальтированных поверхностей на интенсивность испарения, что позволит внести поправку в расчёт среднегодового объёма дождевых вод  $W_\delta$ .

## Глава 5 Технико-экономическое обоснование применения результатов исследования

Значительный рост тарифов в коммунальной сфере и, в частности, области отведения поверхностного ливневого стока, вызывает обеспокоенность у потенциальных абонентов, к которым относятся муниципальные и производственные предприятия, жилой сектор.

Даже в рамках городского округа Тольятти услуги различных организаций, занимающихся водоотведением, различаются почти в 3 раза. В Автозаводском районе ответственность за содержание ливневой канализации несет АО «ТЕВИС», в Центральном и Комсомольском районе – муниципальная компания АО «ПО КХ г.о. Тольятти». Согласно Приказа № 757 от 23.11.2022 Департамент ценового и тарифного регулирования Самарской области по корректировке тарифов в сфере водоотведения для потребителей АО «Производственное объединение коммунального хозяйства городского округа Тольятти», таким образом в АО «ПО КХ г.о. Тольятти» стоимость водоотведения с 2020 по 2024 годы выросла более чем в 5 раз. По данным Администрации городского округа Тольятти тарифы за водоотведение поверхностного стока за последние годы изменялись следующим образом, руб./м<sup>3</sup> (таблица 13).

Таблица 13 – Тарифы за водоотведение поверхностного стока 2019 – 2023 г.

АО «ТЕВИС»	Тариф, руб./м <sup>3</sup>	АО «ПО КХ г.о. Тольятти»	Тариф, руб./м <sup>3</sup>
с 01.01.2019 по 30.06.2019	7,37	–	–
с 01.07.2019 по 31.12.2019	8,10	–	–
с 01.01.2020 по 30.06.2020	8,10	с 01.01.2020 по 30.06.2020	3,78
с 01.01.2020 по 31.12.2021	8,57	с 01.07.2020 по 31.12.2020	8,39
с 01.01.2021 по 30.06.2021	8,57	с 01.01.2021 по 30.06.2021	8,39
с 01.07.2021 по 31.12.2021	9,49	с 01.07.2021 по 31.12.2021	8,64
с 01.01.2022 по 30.06.2022	9,49	с 01.01.2022 по 30.06.2022	8,64
с 01.07.2022 по 30.11.2022	10,85	с 01.07.2022 по 31.12.2022	8,92
с 01.01.2023 по 31.12.2023	12,37	с 01.12.2022 по 31.12.2023	15,96
с 01.01.2024 по 30.06.2024	12,37	с 01.01.2024 по 30.06.2024	15,96
с 01.07.2024 по 31.12.2024	13,95	с 01.07.2024 по 31.12.2024	19,20
Рост тарифа за период	189 %		508 %

Экономическая ситуация в стране не позволяет надеяться на позитивные изменения тарифов в коммунальной сфере, соответственно поиск компромиссного решения между коммунальными службами и абонентами является важным шагом к удовлетворению обеих сторон.

Уточнение площадей и типов поверхностей, по которым осуществляется ливневый сток не всегда даёт экономический эффект. Т.к. при заключении договоров между абонентом, осуществляющим сброс, и сетевой компанией довольно часто бывают разногласия, урегулировать, которые можно только проведя дополнительные исследования. Для определённых групп абонентов, территория которых имеет чёткий водораздел, существует возможность установить приборы учёта сточных ливневых вод.

### **5.1 Расчёт экономической эффективности организации коммерческого учёта ливневого стока**

Расчёт экономической эффективности организации коммерческого учёта ливневого стока на муниципальных объектах выполнен согласно следующего документа: Методические рекомендации по выбору, установке и эксплуатации приборов учета и регулирования расхода тепловой энергии, холодной и горячей воды. Разработаны «Научно-консультационный центр жилищно-коммунального хозяйства» («НКЦ ЖКХ»).

Для окончательного решения об организации коммерческого узла учета ливневого стока, необходимо дать оценку экономической целесообразности внедрения данного мероприятия.

В качестве примера расчёта экономической эффективности от предлагаемых мероприятий по уточнению объёма ливневого стока, приводятся результаты исследования территории объекта «Тольяттинская городская общественная организация «Спортивный клуб «МЕГА-ЛАДА»

(рисунок 30). Экономический расчёт проведён на основе апробированного ранее (описание в главе 4) алгоритма исследования.

Проведён анализ проектной документации, топографической съёмки, схем, чертежей ливневой канализации. Основываясь на полученных данных установлено соответствие расположение дождеприёмников на местности и схеме инженерных сетей. Преобладающее направление стока (рисунок 31) в сторону улицы Республиканской является организованным из чаши стадиона и по периметру исследуемого объекта, площадью 33 499 м<sup>2</sup>. Дополнительно построены профили местности для проверки направления движения поверхностного стока к дождеприёмникам (рисунки 32, 33). В результате установлено, что сток на улицы Баныкина и Родины исключён из-за особенностей микрорельефа (бордюры, тротуар, участки с зелёными насаждениями).



Рисунок 30 – Вид сверху на объект исследования

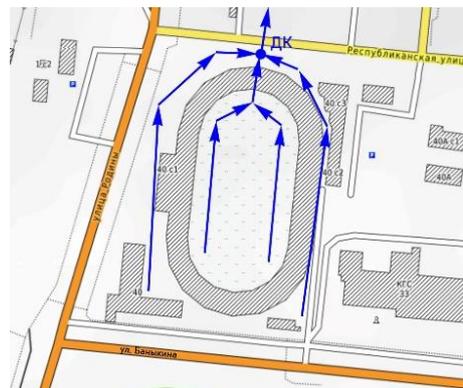


Рисунок 31 – Преобладающие направления стока



Рисунок 32 – Профиль в направлении Ю-С

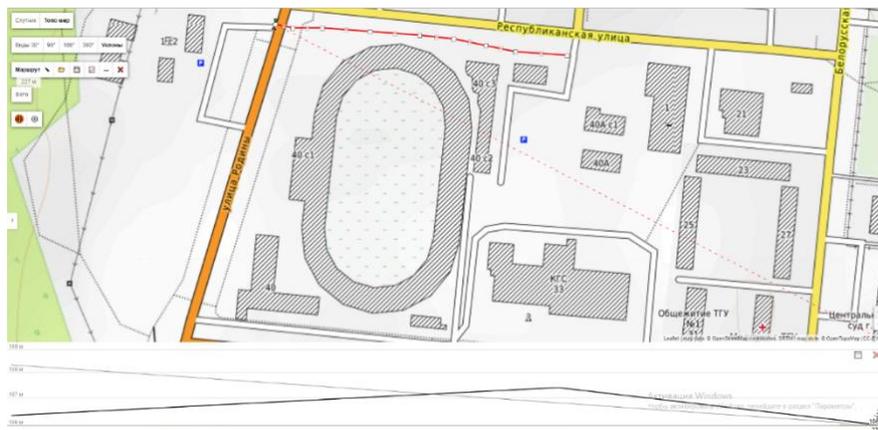


Рисунок 33 – Профиль в направлении В-3

Обследование существующей ливневой канализации заключается в определении места установки и проведении внешнего осмотра дождеприёмников на предмет организации направленного водотока, отсутствия преград на уровне микрорельефа; наличия засорения. В местах доступных для осмотра проведена оценка технического состояния ливневой канализации (степень физического износа), остаточного ресурса, возможность дальнейшей эксплуатации. Общее техническое состояние ливневой канализации оценивается как работоспособное. Разрушений, засоров и других повреждений не обнаружено. При выпадении дождевых осадков до 40 мм замечаний по работе ливневой канализации нет. В колодце имеется возможность установки прибора учёта сточных вод (рисунки 34, 35).



Рисунок 34 – Вскрытие люка



Рисунок 35 – Состояние лотков  
удовлетворительное, засорения нет

Определена возможность отбора проб вод, попадающих в ливневую канализацию для установления факта наличия или отсутствия смешения ливневых вод организации Заказчика с ливневыми водами иных объектов и прилегающих территорий. Сбор ливневого стока организован с чаши стадиона и с периметра участка. Сброс воды с прилегающих территорий в дождеприёмники абонента не попадают благодаря особенностям микрорельефа. В исследуемом колодце имеется возможность отбора проб сточных вод согласно:

- ГОСТ Р 51592-2023 «Требования к отбору проб»;
- ИСО 5667/10 (Актуализация 01.01.2021). Качество воды. Отбор проб. Часть 10. Руководство по отбору проб сточных вод;
- Постановление Правительства РФ от 22.05.2020 N 728 (ред. от 28.11.2023) «Об утверждении Правил осуществления контроля состава и свойств сточных вод и о внесении изменений и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации».

Определение возможности установки прибора учёта ливневого стока.

Согласно Постановлению Правительства РФ от 4 сентября 2013 г. N 776 «Об утверждении Правил организации коммерческого учета воды, сточных вод» коммерческий учет сточных вод может осуществлять: абонент; организация, которая занимается транспортировкой стоков.

Стоки могут сбрасываться в водную среду или в магистральный коллектор городской системы водоотведения. Сброс в водную среду должен соответствовать санитарно-эпидемиологическим нормативам. Концентрация примесей в стоках не должна превышать допустимые значения, что должно предотвратить загрязнение природных источников.

Данные фактического расхода, определяемые с помощью узла учета сточных вод, используются для контроля за стоками, снижения их расхода. Учет ливневых стоков является единственным показателем, с помощью которого можно отслеживать концентрацию вредных примесей,

попадающих в водоемы. Это позволит принять меры, которые должны уменьшить содержание вредных соединений с помощью очистных сооружений дождевых стоков.

Для организации учета сточных вод должны быть выполнены следующие действия:

- получение технических условий на проектирование узла учета сточных вод у эксплуатирующей организации с определением места размещения, схемы установки, технические параметры прибора.
- разработка проекта на узел учета, включающий в себя подбор счетчика, технологию монтажа. проектная документация должна соответствовать техусловиям, в частности точность, диапазон измерений, уровень погрешности прибора должен отвечать предъявляемым требованиям. проект должен пройти согласование с предприятием, которое будет осуществлять транспортировку стоков.
- монтажные и пусконаладочные работы.
- получение разрешения на эксплуатацию узла учета. узел учета сточных вод должен быть защищен от вмешательства в его работу.
- пользование информационными сетями для снятия показаний прибора учета, объема сточных вод.
- поверка, ремонт или замена по мере необходимости.

Определены условия размещения датчиков, подключения электропитания и системы диспетчеризации.

Измерительное устройство должно находиться в отдельном измерительном колодце или камере (рисунок 36). Оно устанавливается на прямолинейном участке сети. При установке на самотечных трубопроводах выбирается самая низкая точка прохождения потока. Приборы учета сточных вод размещаются на границе ответственности абонента и организации, осуществляющей транспортировку стоков.

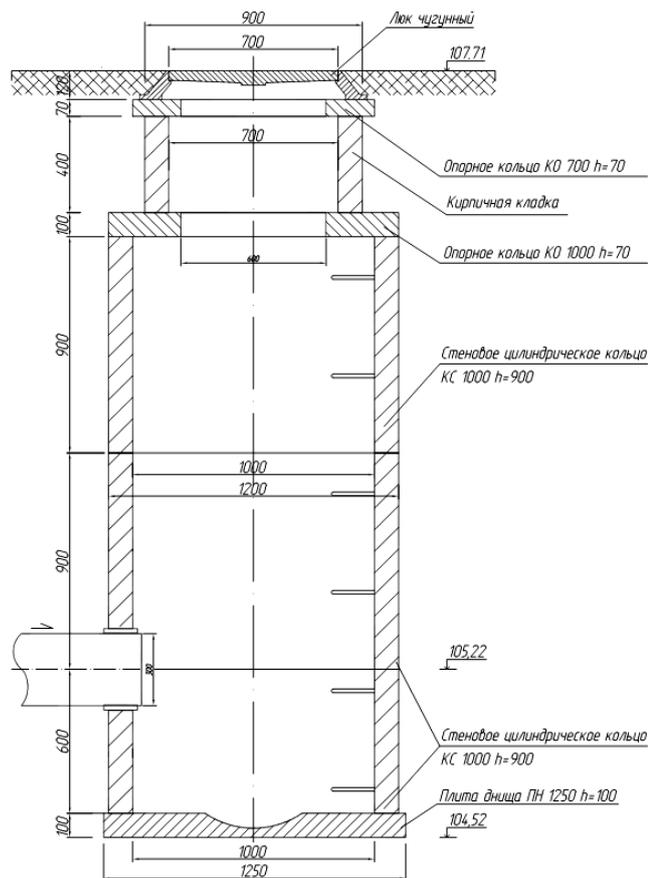


Рисунок 36 – Колодец, предназначенный для установки расходомера

Колодец ДК расположен на удалении от сооружения стадиона не более 12 м, обеспечить электроснабжение, передачу измерительной информации возможно от помещения кассы стадиона. В этом же помещении возможно расположить вычислитель, передающий преобразователь системы диспетчеризации.

## 5.2 Обоснование выбора типа средств измерения и комплектации узла учёта

Принцип действия расходомеров для не напорных трубопроводов и открытых каналов.

Измерение расхода жидкости ( $Q$ ) в трубопроводе или канале не может быть выполнено непосредственно, поскольку трубопровод не заполняется полностью. Необходимо произвести вычисления по следующей формуле:

$$Q = \tilde{V} \times F, \quad (28)$$

где  $F$  – площадь сечения потока,  
 $\tilde{V}$  – его средняя скорость.

При этом основной и непростой задачей является корректное определение средней скорости  $\tilde{V}$ , так как площадь сечения  $A$  определяется исходя из формы канала (которая может быть взята из документации, либо измерена при предпроектном обследовании) и уровня потока, измерение которого может выполняться различными способами (рисунок 37).

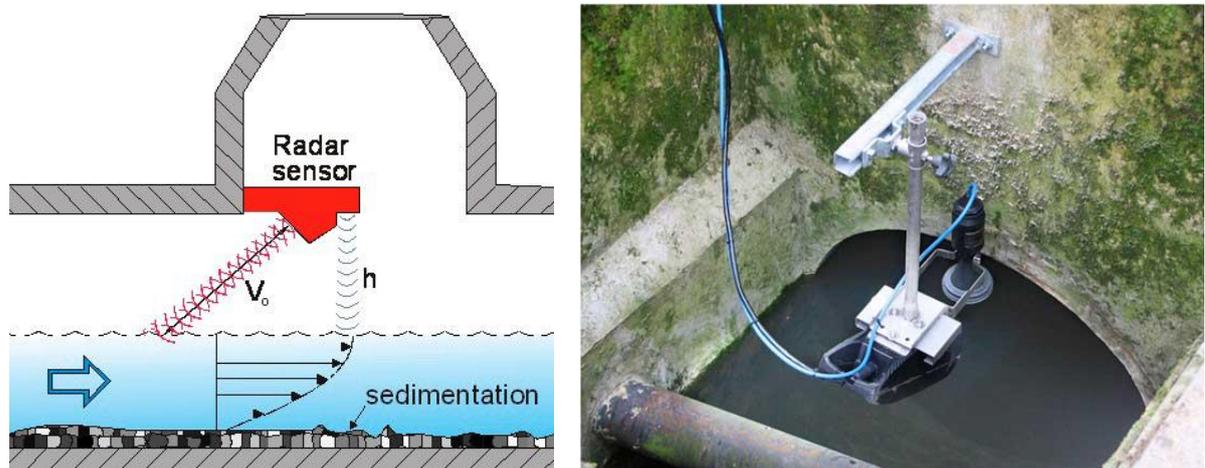


Рисунок 37 – Принцип действия ультразвукового расходомера

В настоящее время существует несколько методов измерения расхода сточных вод в безнапорных трубопроводах и большое количество различных типов оборудования для решения этой задачи. К таким методам можно отнести:

Использование в качестве расходомеров уровнемеров, установленных на лотках Паршалля или Вентури, либо непосредственно над каналом или в колодце трубопровода. При этом средняя скорость не измеряется вообще, а предполагается, что это величина постоянная и расход зависит только от уровня.

Радарные бесконтактные расходомеры, измеряющие уровень и скорость поверхностного стока. Средняя скорость потока определяется путем умножения скорости поверхностного стока на постоянный коэффициент.

Погружные ультразвуковые расходомеры на основе метода Доплера, измеряющие скорость в различных точках потока и вычисляющие среднюю скорость на основе дополнительно вводимых данных о шероховатости стенок трубопровода и т.д.

Системы, обеспечивающие перевод безнапорного режима работы трубопровода в напорный. При этом на самотечную трубу устанавливается секция, загнутая вверх, обеспечивающая заполнение трубы 100%, после чего измерение расхода в этой трубе обеспечивается ультразвуковыми или полнопроходными электромагнитными приборами учета, предназначенными для напорных трубопроводов.

Погружные ультразвуковые кросс-корреляционные расходомеры, измеряющие скорость в потоке по слоям и вычисляющие среднее ее значение на основе полученных данных о распределении скоростей по всему сечению потока.

Времяимпульсные расходомеры (метод еще называют транзит-тайм или время переноса) представляют собой два датчика, расположенных на противоположных стенках трубы или канала, каждый из которых является и приемником, и излучателем. Датчики направлены друг на друга и посылают узконаправленный ультразвуковой сигнал один в направлении другого. Ось, проходящая через датчики расположена под углом от 45 до 70 градусов к оси трубопровода. Двигаясь с потоком по течению ультразвуковой луч проходит расстояние от одного датчика до другого быстрее, чем против течения. Исходя из этого определяется скорость течения.

Способы установки расходомеров. На рисунках 38 – 40 показаны различные способы установки ультразвуковых расходомеров для определения расхода ливневых сточных вод.



Рисунок 38 – Временная установка контрольного расходомера на открытых колодцах



Рисунок 39 – Установка расходомера на горизонтальном участке самотёчного трубопровода



Рисунок 40 – Стационарная установка расходомера в колодце

## Расходомер для открытых каналов и стоков SLO-500f.

На основании проведенного анализа представленного на рынке оборудования к установке предложен расходомер для открытых каналов и стоков SLO-500f.

Ультразвуковой датчик устанавливается на определенной высоте над потоком и методом отражения измеряет расстояние до воды (рисунок 41). Данный параметр при известных остальных (тип и размеры измерительного лотка или водослива) дает информацию о текущем объемном расходе. Так как для стандартных типов лотков Вентури, Паршалла и водосливов эта величина является табличной либо рассчитывается по известным формулам.

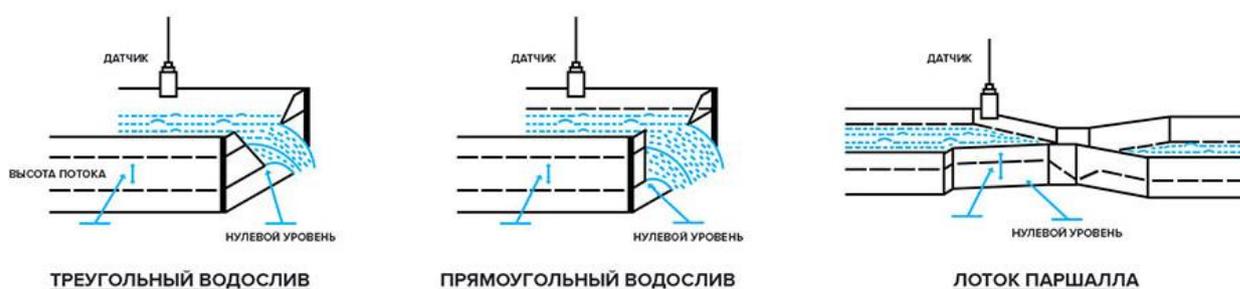


Рисунок 41 – Способы расположения датчика

Для измерения на самотечных трубопроводах потребуется оснастить узел учета небольшим измерительным лотком, установленным в разрыв трубопровода. Типоразмеры лотков приведены на рисунке 42. Материал лотка: полиэтилен, обычная либо нержавеющая сталь, бетон.

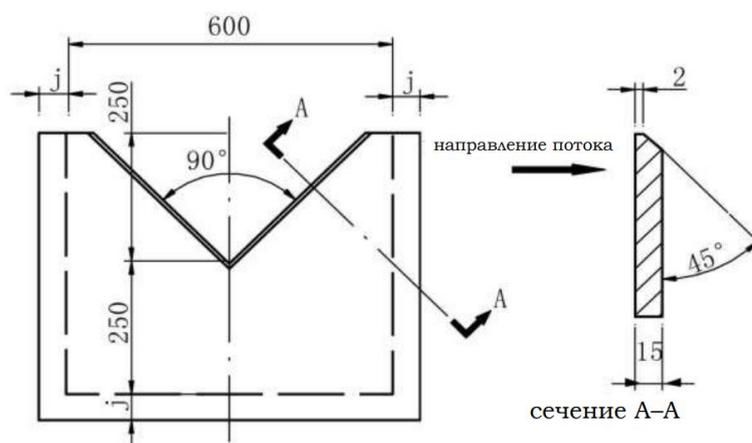


Рисунок 42 – Типоразмеры треугольного лотка

Некоторые технические характеристики расходомера SLO-500f:

- Ширина канала от 200 мм;
- Расстояние от датчика до воды 350 мм – 3000 мм;
- Погрешность измерения расхода 2-3%;
- Длина кабеля до датчика 10 метров / Опционально до 200 метров;
- Диапазон расхода от 0,1 л/с до 120 000м<sup>3</sup>/с.

Типы каналов Любые открытые, в том числе:

- Хозяйственно-бытовая канализация;
- Ливневая канализация;
- Класс защиты IP67;
- Дисплей ЖК с подсветкой, 2x8 символов;
- Выходные сигналы (для съема и передачи информации по каналам связи);
- Цифровой RS-485 (ModBus);
- Токовый 4 — 20 мА.

Архив записи результатов измерений за сутки/месяц/год:

- накопительный расход;
- отключения питания;
- изменения статуса прибора.

Диапазон температур –20° – +60°.

Питание прибора Переменное 220 В / Постоянное 24 В.

Гарантийный срок 60 месяцев.

Срок службы прибора составляет 8 лет.

### **5.3 Стоимость узла учёта ливневого стока**

Стоимость работ устройству узла учёта ливневого стока

Для определения стоимости оборудования, материалов и работ по устройству узла учёта ливневого стока, проведён анализ стоимости услуг различных проектных, строительно-монтажных организаций по Самарской

области. Рассматривалось не менее 3 предложений, рассчитывалось усреднённое значение, результат округлялся до сотен рублей. Расчёт стоимости проведён по уровню цен на материалы и работы на 2 квартал 2024 года.

В среднем по Самарской области стоимость проектно-изыскательских работ на устройство узла учёта ливневого стока составляет 47 000 рублей.

Стоимость работ по монтажу узла учёта складывается из следующих составляющих:

- подготовительных работ (ремонтных, строительного-монтажных, гидроизоляционных) – 12 000 рублей;
- монтаж датчиков и вспомогательного оборудования – 16 000 рублей;
- электромонтажные работы (кабельные проводки питания, контрольные, диспетчеризация) – 8 000 рублей;
- пусконаладочные работы (настройка базы данных, приемо-сдаточные испытания) – 18 000 рублей.

Стоимость оборудования и материалов узла учёта ливневого стока:

- расходомер для открытых каналов и стоков SLO-500F – 66 000 рублей;
- крепёжные материалы – 4 000 рублей;
- электроустановочное оборудование – 12 000 рублей;
- кабельная продукция – 5 000 рублей;
- расходные материалы – 5 000 рублей;

Всего оборудование и материалы – 92 000 рублей.

Общая стоимость устройства узла учёта ливневого стока на объекте составляет 193 000 рублей.

#### **5.4 Оценка экономической целесообразности установки приборов учета**

Оборудование узла учета требует определённых единовременных финансовых вложений, но в конечном результате приводит к

упорядочиванию взаимных расчетов между заинтересованными сторонами, а также к значительному снижению расходов абонента на оплату энергоресурса.

«Затраты на устройство узла учета окупаются, как правило, в период от нескольких месяцев до нескольких лет и зависят от размеров энергопотребления (объёма водоотведения), корректного расчёта договорных нагрузок, динамики роста тарифов. Основным показателем экономической эффективности установки приборов учета является срок окупаемости капиталовложений в оборудование узла учета» [12].

Срок окупаемости ( $T$ , лет) вычисляется как отношение объема единовременных капиталовложений в узел учета ( $K$ , руб.) к разнице между снижением ежегодных затрат на оплату энергоресурса ( $\Delta Z_m$ , руб./год) и величиной ежегодных затрат на реновацию, обслуживание, ремонт и поверку приборов учета ( $Z_p$ , руб./год).

$$T = \frac{K}{\Delta Z_m - Z_p}, \quad (29)$$

$$\Delta Z_m = Z_n - Z_\phi \quad (30)$$

где  $K$  – капиталовложения в сооружение узла учета, руб.;

$\Delta Z_m$  – снижение ежегодных затрат на энергоноситель, руб./год;

$Z_n$  – ежегодные затраты на энергоноситель по нормативу, руб./год;

$Z_\phi$  – ежегодные затраты на энергоноситель по факту, руб./год;

$Z_p$  – ежегодные затраты на реновацию, обслуживание, ремонт и поверку приборов узла учета, руб./год.

Очевидно, что оборудование узла учета целесообразно, если срок окупаемости ( $T$ , лет) не превышает срок службы узла учета ( $T_E$ , лет):  $T < T_E$ .

В выше приведённых формулах указанные факторы учитываются параметром  $Z_p$ . Для оценочных технико-экономических расчетов отчисления на реновацию можно принимать равным:

$$Z_p = \frac{K}{T_E}. \quad (31)$$

Результат расчётов годового объема стока  $W$  и итоговой стоимости за водоотведение за 2022, приведён в таблице 14. На основании этих расчётов подобрано оборудование и выполнен проект узла учёта в 2023 году. Однако, в связи с финансовыми трудностями заказчика узел учёта не оборудован и получить значение фактического объёма стока, поступающего в ливневую канализацию, не представляется возможным.

Таблица 14 – Результат расчётов годового объема стока  $W$  и итоговой стоимости за водоотведение за 2022

Месяц	Количество осадков, мм	Годовой объем стока $W$ , м <sup>3</sup>	Плата за объём поверхностных сточных вод, руб.	Плата за негативные воздействия на работу ЦСВ, руб.	Плата за сброс загрязняющих веществ в составе поверхностных сточных вод, руб.	Итого стоимость за водоотведение, руб.
январь	50,8	952,72	8231,53	4115,77	16463,06	28810,36
февраль	37,8	708,92	6125,04	3062,52	12250,07	21437,63
март	47,7	894,58	7729,21	3864,61	15458,43	27052,25
1 квартал	136,3	3195,28	27607,23	13803,61	55214,45	96625,29
апрель	36,1	673,01	5814,83	2907,41	11629,65	20351,89
май	26,1	486,58	4204,07	2102,04	8408,14	14714,25
июнь	37,8	704,71	6088,65	3044,33	12177,31	21310,29
2 квартал	100	1864,30	16107,55	8053,78	32215,10	56376,43
июль	46,7	870,63	7762,52	3881,26	15525,04	27168,82
август	46,8	872,49	7779,14	3889,57	15558,28	27227,00
сентябрь	50,1	934,01	8327,67	4163,84	16655,34	29146,85
3 квартал	143,6	2677,13	23869,33	11934,67	47738,67	83542,67
октябрь	36	671,15	5983,96	2991,98	11967,91	20943,84
ноябрь	27,1	508,24	4531,51	2265,75	9063,01	15860,27
декабрь	33,1	620,77	5534,79	2767,40	11069,58	19371,77
4 квартал	96,2	1800,16	16050,25	8025,13	32100,50	56175,88
Итого за год	476,1	9 536,88	83 634,37	41 817,18	167 268,73	292 720,28

Оценка экономической целесообразности установки приборов учета выполнена на основании сравнения итоговой стоимости за водоотведение в 2022 и 2024 годах, с учётом роста тарифов. Результат сравнения приведён в таблице 15.

Таблица 15 – Результат расчётов годового объема стока  $W$  и итоговой стоимости за водоотведение за 2022

Месяц	Количество осадков, мм	Годовой объем стока $W$ , м <sup>3</sup>	Плата за объём поверхностных сточных вод, руб.	Плата за негативные воздействия на работу ЦСВ, руб.	Плата за сброс загрязняющих веществ в составе поверхностных сточных вод, руб.	Итого стоимость за водоотведение, руб.
январь	50,8	952,72	15205,47	7602,73	30410,93	53219,14
февраль	37,8	708,92	11314,30	5657,15	22628,61	39600,07
март	47,7	894,58	14277,57	7138,79	28555,15	49971,51
1 квартал	136,3	3195,28	50996,68	25498,34	101993,37	178488,39
апрель	36,1	673,01	10741,28	5370,64	21482,55	37594,47
май	26,1	486,58	7765,85	3882,93	15531,71	27180,49
июнь	37,8	704,71	11247,10	5623,55	22494,20	39364,84
2 квартал	100	1864,30	29754,23	14877,11	59508,46	104139,80
июль	46,7	870,63	16716,06	8358,03	33432,12	58506,21
август	46,8	872,49	16751,85	8375,93	33503,71	58631,49
сентябрь	50,1	934,01	17933,07	8966,54	35866,15	62765,76
3 квартал	143,6	2677,13	51400,99	25700,49	102801,98	179903,46
октябрь	36	671,15	12886,04	6443,02	25772,08	45101,15
ноябрь	27,1	508,24	9758,29	4879,14	19516,58	34154,01
декабрь	33,1	620,77	11918,80	5959,40	23837,59	41715,79
4 квартал	96,2	1800,16	34563,13	17281,56	69126,25	120970,95
Итого за год	476,1	9 536,88	166 715,03	83 357,51	333 430,05	583 502,59

Примечание к таблицам 14 и 15:

- Прогноз слоя осадков на 2022 год определен в соответствии с пунктом 6 «Методических указаний по расчету объемов принятых (отведенных) поверхностных сточных вод», утвержденных Приказом Минстроя России от 17.10.2014 №639/пр.
- Объем стоков может корректироваться с учетом фактического слоя осадков по данным метеорологических наблюдений, предоставленных Тольяттинской СГМО.
- Расчет платы за сброс загрязняющих веществ в составе сточных вод сверх установленных нормативов состава сточных вод ( $P_{\text{норм. сост.}}$ ) (рублей), определяется по формуле, указанной в пункте 203 Правил №644 (ред. от 22.05.2020).
- Расчет платы за негативное воздействие на работу централизованной системы водоотведения ( $P_{\text{нег.}}$ ), определяется по формуле, указанной в пункте 123(4) Правил №644 (ред. от 22.05.2020).
- Величины тарифов по периодам 2022 и 2024 годов приведены в таблице 13.

Стоимость услуги водоотведения для исследуемого объекта выросла с 292 720 руб. в 2022 до 583 502 руб. в 2024 году, рост составил 290 782 руб. Как показывает опыт эксплуатации на других объектах установка приборов учёта у абонента позволяет сократить финансовые затраты на энергоносители в среднем на 30 %. В текущих ценах (2 квартал 2024 года) ожидаемая экономия от установки приборов учёта составит  $583\,502 \times 30\% = 175\,050$  руб. (к оплате по счётчику 408 451 руб.).

По приведённым выше формулам срок окупаемости от внедрения узла учёта составит:

$$З_p = \frac{193000}{8} = 24125 \text{ руб.}$$

$$\Delta З_T = 583502 - 408451 = 175050 \text{ руб.}$$

$$T = \frac{193000}{175050 - 24125} = 1,3 \text{ год.}$$

В условиях постоянного роста тарифов установка приборов учёта приобретает особую важность и способствует значительному снижению финансовых затрат на оплату энергоносителей. Однако, особенность распределения ливневого стока по различным поверхностям, микрорельеф не всегда позволяют организовать места для установки расходомеров. В этом случае объём стока определяется расчётным методом, который при тщательном учёте наиболее значимых факторов позволяет снизить финансовую нагрузку на абонента, а в некоторых случаях, полностью освободить от заключения договора на водоотведение, по причине отсутствия предмета договора, т.е. объёма воды, поступающего в дождеприёмники.

#### Выводы по главе 4

По нормативной документации в сфере тарифного регулирования и договорам между абонентами и энергоснабжающими организациями

проведен анализ динамики роста тарифов на водоотведение, намечены возможности снижения финансовых затрат путём установки приборов учёта ливневого стока и уточнения наиболее значимых факторов при расчётном методе.

На примере муниципального объекта рассмотрена возможность установки прибора учёта ливневого стока, выполнены инженерные изыскания и проектные работы для коммерческого узла учёта. По результатам исследования рынка приборов учёта расхода подобрано отечественное оборудование для не напорных трубопроводов и открытых каналов.

Проведено технико-экономическое обоснование, рассчитан экономический эффект и сроки окупаемости внедрения узла учёта ливневого стока. Получен удовлетворительный результат по срокам окупаемости в 1,3 года при ожидаемой экономии 175 050 руб.

## Заключение

На основании анализа литературных источников установлена необходимость совершенствования и уточнения действующих на 2024 год методик по расчёту объёма поверхностного ливневого стока.

Основные причины проведения дополнительных исследований связаны с изменением климата, которые в ближайшие десятилетия будут нарастать, и судя по прогнозам, повлекут за собой увеличение количества выпадающих осадков, повышение температур, усиление ветров и другие климатические катаклизмы.

Стремительное преобразование облика современных селитебных территорий способствуют значительной трансформации городского ландшафта, локальным изменению микрорельефа и характера поверхности, увеличивается асфальтированная или иная площадь с твёрдым покрытием, уменьшается грунтовые и травянистые участки. Увеличивается плотность и этажность жилой и административной застройки, развивается транспортная и коммунальная инфраструктура.

Развитие и изменения нормативно-технической и законодательной базы требует от всех заинтересованных сторон при оказании и получении коммунальных услуг более чёткого взаимодействия при заключении договоров на водоотведение и расчёте количественных параметров при оказании услуги. Таким образом определена проблемная область и сформированы задачи, позволяющие решить эти проблемы.

В соответствии с поставленными задачами проведён ряд экспериментов, позволяющих решить выявленные проблемы.

Наиболее важным, является решение задачи, связанной с определением площади водосбора, поскольку этот параметр лежит в основе расчётов и проектирования ливневой канализации и очистных сооружений. При расчёте площади отведения поверхностного стока с необходимо исходить из конкретных условий исследуемого объекта: размеров, конфигурации и

рельефа водосборного бассейна, источников загрязнения территории. При этом следует учитывать локализацию отдельных участков: зданий, сооружений и прочих строений; участков, под асфальтом, бетоном, плиткой и прочими искусственными покрытиями; площадь открытого грунта и занятого зелёными насаждениями.

Проведя более 20 обследований муниципальных объектов разного назначения (детских садов, школ, больниц) автором разработан и апробирован метод расчёта направлений поверхностного стока с помощью измерения малых высот, построения продольного профиля с учётом микрорельефа. Предлагаемый метод призван повысить достоверность расчёта объёма поверхностных вод, которые попадают в дождеприёмники; учесть влияние изменений ландшафта на формирование ливневого стока.

Ещё один путь решения обозначенной проблемы является более точный расчёт объёма поверхностного стока, который учитывает не только ландшафтные особенности местности; микрорельеф, тип покрытия, но также и водопоглощающие свойства этих покрытий. Согласно применяемой методике расчёта вид поверхности или площади стока разбит на группы, для которых применяется общий коэффициент стока,  $\Psi_0$ . Данный коэффициент удобен в расчёте, однако не учитывает местные особенности почв, которые в условиях городов Поволжья весьма разнообразны и обладают большим диапазоном влагоёмкости. Если для твёрдых покрытий (кровли и асфальтобетонные покрытия)  $\Psi_0$  достаточно стабилен, то для естественных почвенных поверхностей он может значительно изменяться и зависеть от типа растительности, механических свойств и т.д. В результате проведённых экспериментов уточнен коэффициент покрова  $z_i$  для различных видов грунтовых поверхностей стока по районам г. Тольятти.

Для формализации расчёта ливневого стока и в частности, одного из компонентов водного баланса – величины испарения, построен математическая модель, которая даёт понимание взаимного влияния основных физических факторов. На основании данной модели апробированы

практические приёмы определения величины испарения при известных метеоусловиях для конкретного объекта водоотведения. Рассмотрены различные методики определения величины испарения, которые применяются на практике. Одним из важных критериев выбора был доступ к необходимым исходным данным, как для научных изысканий, так и для практического применения.

На основании теоретического материала и полученных экспериментальных результатов предложен алгоритм расчёта поверхностного ливневого стока с учётом реальных условий селитебных территорий. В процессе работы использовались различные расчётно-графические программные продукты, для построения сложных профилей в условиях городской застройки, опираясь на топографическую съёмку. Проведены цифровые эксперименты по моделированию движения потоков жидкости как в открытых каналах, так и в трубопроводах. выполнены сравнительные расчёты с использованием различных алгоритмов оптимизации, определена возможность их применения для определения объёма стока. На основании этих данных выделены ключевые моменты, которые позволяют автоматизировать определение объёма стока.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. В перспективе, детальный анализ городского ландшафта позволит проводить более точную оценку количества и направлений поверхностного стока при проектировании ливневой канализации и очистных сооружений, что позволит снизить капитальные вложения и повысить экономическую эффективность городской инфраструктуры.

В дальнейшем необходимо уточнение количества испаряющейся воды с влагонепроницаемых и почвенных поверхностей. Однако такой расчёт требует дополнительного изучения термодинамических свойств разных материалов, их состояния на расчётный период, а также измерения локальных метеоусловий на каком-либо объекте. В практическом плане проверочный расчёт испарения с разных поверхностей показал

незначительное расхождение, поэтому для окончательного расчёта предлагается при расчёте количества среднегодовых объёмов поверхностных сточных вод вычитать из количества осадков за месяцы со средними положительными температурами рассчитанное значение испарения, а дальше вести расчет согласно Рекомендации ВодГЕО. Предлагаемые решения направлены на повышение экономической эффективности при расчётах за водоотведение, позволит более эффективно эксплуатировать и прогнозировать работу городской инфраструктуры.

Очевидным является применение информационных технологий при проведении как научных исследований, так в решении прикладных задач по определению объёма поверхностного стока. На сегодняшний день такие программы существуют, однако уточнение исходных данных, статистическая обработка накопленных результатов даст ещё больше возможностей для снижения капитальных вложений и повысит экономическую эффективность городской инфраструктуры, поможет защитить города от погодных катаклизмов и повысить комфорт городской среды.

## Список используемой литературы и источников

1. Алексеев М. И., Курганов А. М. Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий: учебное пособие. – М.: Издательство АСВ; СПб., СПбГАСУ, 2000. 352 с.
2. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 г. Сборник докладов / под ред. Н.П. Шакиной. ГУ «Гидрометцентр России». М.: Триада, Лтд, 2011. 72 с.
3. Анциферов С. А., Маслова Н.В., Грызунова Л.В. Влияние изменений ландшафта на формирование ливневого стока // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2022. № 4(23). С. 61–69. DOI: 10.36622/VSTU.2022.23.4.007.
4. Анциферов С. А., Маслова Н.В., Грызунова Л.В. Определение коэффициента покрова для почвенных поверхностей стока селитебных территорий // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14, № 3. С. 41–48. DOI: 10.17673/Vestnik. 2024.03.05.
5. Анциферов, С. А. Влияние геометрии улитки насоса на параметры потока / С. А. Анциферов, А. Ю. Алмаев, А. Ш. Шобутолибов // Природопользование и устойчивое развитие регионов России : Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 15–16 июня 2021 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2021. – С. 11-16. – EDN FUBQOW.
6. Анциферов, С. А. Моделирование конвективных воздушных потоков в жилом помещении / С. А. Анциферов, Н. В. Маслова, Е. В. Чиркова // Энергосбережение и водоподготовка. – 2023. – № 2(142). – С. 53-58. – EDN MPSLDS.
7. Анциферов, С. А. Опыт цифрового моделирования по выявлению зон выпадения конденсата на светопрозрачных ограждениях / С. А. Анциферов, Е. В. Чиркова // Жилищное хозяйство и коммунальная

инфраструктура. – 2024. – № 2(29). – С. 35-43. – DOI 10.36622/2541-9110.2024.29.2.004. – EDN RNJYJE.

8. Анциферов, С. А. Расчет поверхностного дождевого стока графоаналитическим методом / С. А. Анциферов // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения : Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием, Тольятти, 18–20 апреля 2023 года. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2023. – С. 12-20. – EDN OFGIYN.

9. Анциферов, С. А. Устранение ударов при закрытии дискового затвора на дренаже горизонтальных отстойников / С. А. Анциферов, Е. В. Чиркова, М. Н. Кучеренко // Градостроительство и архитектура. – 2021. – Т. 11, № 1(42). – С. 56-62. – DOI 10.17673/Vestnik.2021.01.7. – EDN SQYFPX.

10. Афонин В.В., Бондаренко Ю.В., Белов В.С. Отвод и очистка поверхностного стока с городских и рекреационных территорий: учебное пособие/ Издательский центр «Наука». – Саратов, 2007 – 156 с.

11. Ахмеджанов А.Х., Караданов Т.К., Исаков А.Н. Алгоритм расчета вертикального распределения парниковых газов в атмосфере по спутниковым данным // Гидрометеорология и экология. 2013. №1 (68). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-rascheta-vertikalnogo-raspredeleniya-parnikovyh-gazov-v-atmosfere-po-sputnikovym-dannym> (дата обращения: 11.06.2024).

12. Баженов В. И. Разработка методики расчета стоимости жизненного цикла оборудования, систем и сооружений для водоснабжения и водоотведения / В. И. Баженов, Е. И. Пупырев, Г. А. Самбурский, С. Е. Березин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 2. – С. 10-19.

13. Беглякова Т. И. Испарение с поверхности суши в бассейне Верхней Волги // Природообустройство. 2012. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/isparenie-s-poverhnosti-sushi-v-basseyne-verhney-volgi> (дата обращения: 3.08.2022).

14. Белла, Ф. Тольятти. Рождение нового города / пер. с фр. Ю. Горбунова. – Екатеринбург: TATLIN, 2014. – 142 с.
15. Белов Н. Н. Расчет дождевой канализационной сети. – М.: Издательство НКВД, 1931. 64 с.
16. Бефани А.Н. Основы теории ливневого стока. — Ленинград : Гидрометеоздат, 1958. — 23. — (Министерство высшего образования УССР. Одесский гидрометеорологический институт. Труды).
17. Бефани Н.Ф. Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально общих зависимостей. – Л. Гидрометеоздат. 1977г. 184 с.
18. Бефани, А.Н. Теория формирования дождевых паводков и методы их расчета / А. Н. Бефани. – Ленинград : [б. и.], 1967. – 16 с. : 24 см – (Доклады/ Организация объедин. наций по вопросам образования, науки и культуры. Междунар. симпозиум по паводкам и их расчетам. 15-22 авг. 1967 г. Ленинград, СССР).
19. Большаков Андрей Геннадьевич Основы теории устойчивого развития территории // Вестник ИрГТУ. 2003. №1 (13). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovy-teorii-ustoychivogo-razvitiya-territorii> (дата обращения: 15.08.2024).
20. Бочаров С.В. Гидравлика сооружений: учебное пособие для вузов / Политехнический институт ДВФУ. – Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2023.
21. Бочкарев Виктор Александрович, Бочкарева Анастасия Викторовна Оценка выбросов парниковых газов предприятиями энергетики // Вестник ИрГТУ. 2017. №2 (121). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vybrosov-parnikovyyh-gazov-predpriyatiyami-energetiki> (дата обращения: 24.05.2024).
22. Будыко, М.И. Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеоздат, 1956. - 255 с.
23. Бусарев А.В., Селюгин А.С., Каюмов Ф.Ф., Ибатуллин Л.Х. К вопросу определения качества дождевых стоков на примере г. Казани //

Известия КазГАСУ. 2017. №4 (42). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-opredeleniya-kachestva-dozhdevykh-stokov-na-primere-g-kazani> (дата обращения: 05.09.2023).

24. Вавилова Т.Я. Модели функционально-пространственной реорганизации производственно-селитебных территорий в контексте устойчивого развития // Вестник МГСУ. 2009. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-funksionalno-prostranstvennoy-reorganizatsii-proizvodstvenno-selitebnyh-territoriy-v-kontekste-ustoychivogo-razvitiya-1> (дата обращения: 15.08.2024).

25. Вадюнина А. Д. Методы исследования физических свойств почв / А. Д. Вадюнина, З. А. Корчагина. – М., 1986. – 416 с.

26. Великанов, Н.Л. Совершенствование системы ливневой канализации города / Н.Л. Великанов, В.А. Наумов, С.И. Корягин, А.В. Мойса // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2017. – №2 (40). – С.14-20.

27. Веретенников Д.Б. Историческое развитие и особенности формирования системы центральных и пешеходных пространств Тольятти // Современное строительство и архитектура. 2019. №3 (15). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istoricheskoe-razvitie-i-osobennosti-formirovaniya-sistemy-tsentralnyh-i-peshehodnyh-prostranstv-tolyatti> (дата обращения: 22.08.2023).

28. Викулин П.Д., Викулина В.Б. Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения: учебник. 2-е изд. М.: МИСИ-МГСУ, 2017. 249 с.

29. Водоснабжение и водоотведение. Наружные сети и сооружения: справочник / под ред. Б.Н. Репина. — М.: Высшая школа, 1995.- 431 с.

30. Воронов Юрий Петрович Цифровые модели рельефа в городах сибиря и проектирование коммунальных сетей // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-modeli-reliefa-v-gorodah-sibiri-i-proektirovanie-kommunalnyh-setey> (дата обращения: 05.012.2023).

31. Гниломедов А.С. Эволюция плотности и функциональной насыщенности городской среды на примере центральной планировочной зоны города Самары // Градостроительство и архитектура. - 2014. - Т. 4. - №2. - С. 16-20.
32. Горбачев П. Ф. Методы расчета ливневого стока. – М.: Издательство «Власть Советов» Президиума ВЦИК, 1937. 167 с.
33. ГОСТ 17.4.4.02-2017 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.
34. Градус Л. Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии. – М.: Химия, 1979. – 232 с.
35. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 50–67.
36. Дикаревский В. С. Отведение и очистка поверхностных сточных вод / В. С. Дикаревский, А. М. Курганов, А. М. Нечаев, М. И. Алексеев. – Л. : Стройиздат. Ленингр. отд., 1990. – 224 с.
37. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: издание второе, переработанное и дополненное. Учебное пособие. - М.: Издательство АСВ, 2004. - 256 с.
38. Земляная Нина Викторовна, Штэк Масим Владимирович Проблемы отвода дождевого стока в городе Владивостоке // Вологдинские чтения. 2012. №80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-otvoda-dozhdevogo-stoka-v-gorode-vladivostoke> (дата обращения: 05.09.2023).
39. Золина О.Г., Булыгина О.Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России. // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2016. – т. 1. – С. 84-103.
40. Иванкин Андрей Николаевич СОСТОЯНИЕ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И ИХ АССИМИЛЯЦИЯ В ПРИРОДЕ. ОБЗОР // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2022. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie->

parnikovyh-gazov-i-ih-assimilyatsiya-v-prirode-obzor (дата обращения: 19.02.2023).

41. Иванова, Н. А. Перспективы применения искусственного интеллекта в ландшафтном проектировании / Н. А. Иванова, С. А. Анциферов, Л. В. Грызунова // Цифровые технологии: настоящее и будущее : сборник статей по материалам II Национальной научно-практической конференции, Тольятти, 10 ноября 2023 года. – Тольятти: Частное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинская академия управления», 2023. – С. 45-51. – EDN BVEVBC.

42. Имитационное моделирование влияния антигололедных реагентов на ливневые воды / В. А. Седыкин, Е. А. Капалкина, С. А. Анциферов [и др.] // Экология и безопасность жизнедеятельности : Сборник статей XVI Международной научно-практической конференции, Пенза, 26–27 декабря 2016 года / Под редакцией В.А. Селезнева, И.А. Лушкина. – Пенза: Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, 2016. – С. 89-94. – EDN XRVBIJ.

43. Канцибер Юрий Алексеевич, Пономарев Андрей Борисович Расчеты характеристик поверхностного стока систем водоотведения на селитебных и производственных территориях Северо-Запада РФ // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2016. №1 (46). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschety-harakteristik-poverhnostnogo-stoka-sistem-vodootvedeniya-na-selitebnyh-i-proizvodstvennyh-territoriyah-severo-zapada-rf> (дата обращения: 05.09.2023).

44. Канцибер Юрий Алексеевич, Пономарев Андрей Борисович, Штыков Валерий Иванович Оптимизация гидрологических расчетов систем очистки поверхностного и дренажного стока воды // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-gidrologicheskikh-raschetov-sistem-ochistki-poverhnostnogo-i-drenazhnogo-stoka-vody> (дата обращения: 05.09.2023).

45. Карнацевич Игорь Владиславович, Мезенцева Ольга Варфоломеевна Структуры водного баланса элементарных водосборов в районе Омска // Вестник ОмГАУ. 2016. №3 (23). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/struktury-vodnogo-balansa-elementarnyh-vodosborov-v-rayone-omska> (дата обращения: 05.09.2023).

46. Кичигин, В. И. Исследование физико-химических характеристик поверхностного стока населенных пунктов / В. И. Кичигин, П. Г. Быкова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002. – № 11. – С. 28-32.

47. Кичигин, Виктор Иванович. Моделирование процессов очистки воды : Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Водоснабжение и водоотведение" направления подгот. дипломир. специалистов "Стр-во" / В. И. Кичигин. - Москва : АСВ, 2003. – 228 с.

48. Колобов Н.В. Климат Среднего Поволжья. Казань: Изд-во Казан. университета, 1968. 252 с.

49. Константинов А.Р. Испарение в природе. – 2-е изд., доп. и перераб. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. - 532 с.

50. Курбатова Анна Игоревна, Тарко Александр Михайлович Динамика выбросов парниковых газов в странах мира // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2015. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-vybrosov-parnikovyyh-gazov-v-stranah-mira> (дата обращения: 04.02.2024).].

51. Курганов А. М. Таблицы параметров предельной интенсивности дождя для определения расходов в системах водоотведения: справочное пособие. – М.: Стройиздат, 1984. 111 с.

52. Ленская О.Ю., Быков Д.В. Анализ изменчивости месячных сумм осадков с использованием индексов атмосферной циркуляции // Вестник Челябинского государственного университета. 2008. №17. С. 53–62.

53. Литвинова О.С., Гуляева Н.В. Анализ временных рядов осадков Обь-Иртышского междуречья в XX - начале XXI вв. // Динамика

окружающей среды и глобальные изменения климата. Ханты-Мансийск, 2010. №1. С. 38-45.

54. Логинова О.А., Азаревич Э.Н. Обзор методик расчета максимального расхода ливневого стока // Техника и технология транспорта. 2021. № 2 (21). С. 19.

55. Мелехин Александр Германович, Щукин Игорь Сергеевич Применение биоинженерных сооружений для очистки ливневых и талых вод с урбанизированных территорий // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2012. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniie-bioinzhenernyh-sooruzheniy-dlya-ochistki-livnevyh-i-talyh-vod-s-urbanizirovannyh-territoriy> (дата обращения: 07.09.2022).

56. Методика расчета гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий/С.В. Сольский. СПб: ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». 2005.

57. Методические указания по расчету объемов принятых (отведенных) поверхностных сточных вод. от 17 октября 2014 г. N 639/пр.

58. Миронова Марина Николаевна, Родина Мария Евгеньевна Инвестиционные проекты в крупнейших городах Самарской области // Вестник РУДН. Серия: Экономика. 2020. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/investitsionnye-proekty-v-krupneyshih-gorodah-samarskoj-oblasti> (дата обращения: 20.03.2024).

59. Михеев П.М. Учебный курс LabVIEW. Основы. – М.: Учебн.тех.центр, 2007. – 365с.

60. Молоков М. В., Шигорин Г. Г. Дождевая и общесплавная канализация. – М.: Издательство Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1954. 241 с.

61. Мустафаева Г.Р. Осаждение частиц в изотропном турбулентном потоке // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2017. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osazhdenie-chastits-v-izotropnom-turbulentnom-potoke> (дата обращения: 05.06.2023).

62. Мустафина А.Б. Изменения основных климатических показателей на территории Республики Татарстан за период 1966–2013 гг. // Географический вестник = Geographical bulletin. 2017. №2(41). С. 99–108.

63. Н.А.Спирин, В.В.Лавров. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учебник для вузов / Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.

64. Надысев В. С. Расчет дождевой и общесплавной канализации по методу «критических приливных площадей». – Л., Госводоканалпроект, 1949. 95 с.

65. Налимов В.В, Голикова Т.И. Логические основы планирования эксперимента. – М.: Металлургия, 1980. – 152 с.

66. Носков В. М. О взаимосвязи гидрологии и метеорологии // Географический вестник. 2014. №2 (29). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vzaimosvyazi-gidrologii-i-meteorologii> (дата обращения: 05.09.2023).

67. Переведенцев Ю.П., Соколов В.В., Наумов Э.П. Климат и окружающая среда Приволжского федерального округа. Казань: Казанский ун-т, 2013. 272 с.

68. Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Мирсаева Н.А., Николаев А.А. Изменения климата на территории Республики Татарстан // Географический вестник. 2024. № 1(68). С. 103–112.

69. Позаченюк Е.А., Меметова Р.Ш. Теоретические основы ландшафтного планирования селитебных территорий // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-osnovy-landshaftnogo-planirovaniya-selitebnyh-territoriy> (дата обращения: 15.08.2024).

70. Попов В. А. д. т. н., профессор, Рындин А. Н. Математические модели испарения / Попов В. А., Рындин А. Н. / Научный электронный журнал КубГАУ. № 01(17), 2006.

71. Потровец В.Р., Курзенков С.В., Дудко Н.И., Греков Д.В. Математическая модель пахотного слоя почвы как сплошной сыпучей среды, сжимаемой и способной к самоорганизации при ее обработке // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. №4.

72. Построение линии свободной поверхности при неравномерном установившемся движении воды: учеб.-метод. пособие / Р. Н. Вострова, О. К. Новикова, А. М. Ратникова; М-во транспорта и коммуникаций РБ, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 43 с.

73. ПРИКАЗ от 10 июля 2007 года N 89 О порядке проведения отбора проб почвогрунтов, их компонентов в целях определения их соответствия установленным экологическим требованиям.

74. ПРИКАЗ от 25 декабря 2008 года № 496-п. Об утверждении региональных нормативов градостроительного проектирования Самарской области. Волжская коммуна от 20 февраля 2009 г. № 59.

75. Примин О.Г., Тен А.Э. Анализ методов гидравлического расчета систем сбора и отвода поверхностных сточных вод // Системные технологии. 2022. №1 (42). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-gidravlichesкого-rascheta-sistem-sbora-i-otvoda-poverhnostnyh-stochnyh-vod> (дата обращения: 02.08.2024).

76. Прошляков И. А. Имитационная модель водоотдачи склонов для расчета поверхностного дождевого стока и водной эрозии // Эрозия почв, селевые потоки и методы борьбы с ними: сб. науч. трудов. Тбилиси, ГрузНИИГиМ. – Тбилиси.: ГрузНИИГиМ, 1985. – С. 134–146.

77. Прошляков Игорь Валентинович, Исмайылов Габил Худушоглы К теории формирования максимального дождевого склонового стока // Природообустройство. 2016. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-teorii-formirovaniya-maksimalnogo-dozhdevogo-sklonovogo-stoka> (дата обращения: 15.02.2024).

78. Пупырев, Е.И. Комплексные решения в системах ливневой канализации / Е.И. Пупырев // Вестник МГСУ. – 2018. – Т.13. – Вып. 5 (116). – С. 651-659.

79. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши / Под ред. П.П. Кузьмина, С.М. Алпатьева. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 96 с.

80. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. - М.: НИИ ВОДГЕО, 2015. - 146 с.

81. Роул А. Основные принципы анализа размеров частиц // Техническая аннотация Malvern Instruments Limited. 2009. 12 с.

82. Руководящий документ. РД 52.27.724-2009. Наставление, по краткосрочным прогнозам, погоды общего назначения. Обнинск, 2009. 50 с.

83. Руководящий документ. РД 52.04.839-2016. Методические указания по производству и обработке данных наблюдений за атмосферными осадками на автоматических метеорологических постах. Санкт-Петербург, 2016. 31 с.

84. Семенюк Анатолий Васильевич Математическое моделирование турбулентной диффузии дисперсной фазы в пограничном слое двухфазного потока // Вестник ДВО РАН. 2004. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-turbulentnoy-diffuzii-dispersnoy-fazy-v-pogranichnom-sloe-dvuhfaznogo-potoka> (дата обращения: 05.06.2023).].

85. Серебрицкий И. А. Опыт Санкт-Петербурга в вопросах управления адаптацией к изменениям климата и смягчения антропогенного воздействия на климатическую систему [электронный ресурс]. <http://www.infoeco.ru/index.php?id=8780> (дата обращения 17.08.2022).

86. Соколова А. А., Чапмена Т. Г. Методы расчета водных балансов: руководство по исследованиям и практике. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 120 с.

87. Солодовников А.Б. Описание рационального метода расчёта дождевого стока / А.Б. Солодовников // Проектирование развития региональной сети железных дорог: сб. науч. тр. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС. № 2 2014. С. 93–101.

88. Солодовников А.Б. Описание рационального метода расчёта дождевого стока / А.Б. Солодовников // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. / под ред. В.С. Шварцфельда. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2014. – Вып. 2. – С. 93–101.

89. Способы и сооружения для очистки природных и сточных вод : [Учеб. пособие] / А. К. Стрелков, П. Г. Быкова, С. М. Шандалов, В. И. Кичигин; Куйбышев. инж.-строит. ин-т им. А. И. Микояна, Каф. водоснабжения, канализации и гидравлики. - Куйбышев : КИСИ, 1987. - 72 с.

90. СТО ГГИ 52.08.37-2015 Влагозапасы и промерзание почв, испарение с почвы и водной поверхности при региональном изменении климата. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши.

91. Тарасов Д. А. Параметрическая оптимизация изгибно-жестких нитей при заданных допустимых напряжениях и деформациях // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский гос. архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 2 (40). С. 5–9.

92. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Научное издание, 2022. – 124 с.

93. Чупин В.Р., Мелехов Е.С., Нгуен Т.А. Оптимизация параметров систем ливневой канализации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – № 1 (6). – 2014. – С. 73–80.

94. Чупин, В.Р. Оптимизация параметров систем ливневой канализации / В.Р. Чупин, Е.С. Мелехов, Т.А. Нгуен // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2014. – №1 (6). – С.73-80.

95. Швецов Е. Д. Наружные водостоки. – М.-Л.: Госстройиздат, 1934. 130 с.
96. Шугунов Л. Ж. Полуэмпирическая методика определения территориальных метеопараметров по данным отдельных пунктов наблюдений // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2007. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluempiricheskaya-metodika-opredeleniya-territorialnyh-meteoroparametrov-po-dannym-otdelnyh-punktov-nablyudeniya> (дата обращения: 05.09.2023).
97. Шумихина А.В. Динамика режима осадков в Удмуртской Республике и их связь с индексами атмосферной циркуляции // Географический вестник = Geographical bulletin. 2017. №1(40). С. 73–85. doi 10.17072/2079-7877-2017-1-73-85.
98. Щербань, А. В. Парниковый эффект и его воздействие на окружающую среду / А. В. Щербань // Экономика и экология территориальных образований. — 2021. — Т. 5, № 2. — С. 59–65.
99. Antsiferov, S. A. Development and testing of a steel regulating thermostatic valve / S. A. Antsiferov, E. A. Usmanova, E. V. Chirkova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : The International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice for the innovation Development” (CATPID-2019), Kislovodsk, 01–05 октября 2019 года. Vol. 698, 6. – Kislovodsk: IOP Publishing Ltd, 2019. – P. 066013. – DOI 10.1088/1757-899X/698/6/066013. – EDN UNSNZR.
100. Bouman, B. A. M. ORYZA 2000: modeling lowland rice / B. A. M. Bouman, M. J. Kropff, T. P. Tuong, [etc.]. – Los Banos: IRRI, 2001. – 235 pp.
101. Elliott, A.H.; Trowsdale, S.A. (2007). A Review of Models for Low Impact Urban Stormwater Drainage. Environmental Model. Software, Vol. 22. – P. 394–405.

102. Franzke C., Feldstein S.B. The continuum and dynamics of Northern Hemisphere teleconnection patterns // *J. Atmos. Sci.* 2005. Vol. 62. No.9. P. 3250–3267.
103. Freeman, T.G., 1991, Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid, *Computers & Geosciences*, 17(3): 413-422.
104. Holmgren, P., 1994, Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation, *Hydrological processes*, 8: 327-334.
105. John P. Wilson, Digital terrain modeling, *Geomorphology*, Volume 137, Issue 1, 2012, Pages 107-121, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.012>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X11001449>).
106. Lee, J. G., et al A watershed-scale esign optimization model for stormwater est anagement ractices. *b m d Environ. Modell Softw.:* *Environ. Data News*, 2012, 37, 6–18; doi:10.1016/ j.envsoft.2012. 04.011.
107. Meta Yolanda Berghauser Pont, Per André Haupt. *Space, Density and Urban Form*. Printed in the Netherlands, 2009. 303 c.
108. Moore, I.D., Grayson, R.B. and Ladson, A.R., 1994, Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications, in Beven, K.J. and Moore, I.D. (eds), *Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 7-34.
109. Nelson, A., Reuter, H.I., Gessler, P., 2009. DEM production methods and sources. In: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, and Applications*. Elsevier, Amsterdam, pp. 65–85.
110. Osborn T.J., Jones P.D., Lister D.H., Morice C.P., Simpson I.R., Winn J.P., Hogan E., Harris I.C. 2021. Land surface air temperature variations across the globe updated to 2019: the CRUTEM5 dataset. *Journal of Geophys. Res.:* *Atmospheres*, 126, e2019JD032352, doi: 10.1029/2019JD032352.

111. Pilesjö, P. and Zhou, Q., 1996, A multiple flow direction algorithm and its use for hydrological modelling, in Geoinformatics'96 Proceedings, April 26-28, West Palm Beach, FL, 366-376.
112. Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. and Planchon, O., 1991, The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models, *Hydrological Processes*, 5: 9-79.
113. Scaife A.A. et al. European climate extremes and the North Atlantic Oscillation // *J. Climate*. 2008. Vol. 21. No. 1. P. 72–83.
114. Wilson J.P., Gallant J.C. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York: Wiley. 2007. – P. 1–27.
115. Wolock, D.M. and McCabe Jr., G.J., 1995, Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL, *Water Resources Research*, 31(5): 1315-1324.

## Приложение А

### Список публикаций по теме диссертации

[https://elibrary.ru/author\\_items.asp?authorid=804559](https://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=804559)

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

- Анциферов С. А., Маслова Н.В., Грызунова Л.В. Определение коэффициента покрова для почвенных поверхностей стока селитебных территорий // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14, № 3. С. 41–48. DOI: 10.17673/Vestnik. 2024.03.05.
- Анциферов С. А., Маслова Н.В., Грызунова Л.В. Влияние изменений ландшафта на формирование ливневого стока // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2022. № 4(23). С. 61–69. DOI: 10.36622/VSTU.2022.23.4.007.
- Анциферов, С. А. Устранение ударов при закрытии дискового затвора на дренаже горизонтальных отстойников / С. А. Анциферов, Е. В. Чиркова, М. Н. Кучеренко // Градостроительство и архитектура. – 2021. – Т. 11, № 1(42). – С. 56-62. – DOI 10.17673/Vestnik.2021.01.7. – EDN SQYFPX.
- Анциферов, С. А. Опыт цифрового моделирования по выявлению зон выпадения конденсата на светопрозрачных ограждениях / С. А. Анциферов, Е. В. Чиркова // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2024. – № 2(29). – С. 35-43. – DOI 10.36622/2541-9110.2024.29.2.004. – EDN RNJYJE.
- Анциферов, С. А. Моделирование конвективных воздушных потоков в жилом помещении / С. А. Анциферов, Н. В. Маслова, Е. В. Чиркова // Энергосбережение и водоподготовка. – 2023. – № 2(142). – С. 53-58. – EDN MPSLDS.
- Antsiferov, S. A. Development and testing of a steel regulating thermostatic valve / S. A. Antsiferov, E. A. Usmanova, E. V. Chirkova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : The International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice for the innovation Development” (CATPID-2019), Kislovodsk, 01–05 октября 2019 года. Vol. 698, 6. – Kislovodsk: IOP Publishing Ltd, 2019. – P. 066013. – DOI 10.1088/1757-899X/698/6/066013. – EDN UNSNZR.

## Продолжение приложения А

- Доклады и публикации по результатам участия в научных конференциях:
- Анциферов, С. А. Расчет поверхностного дождевого стока графоаналитическим методом / С. А. Анциферов // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения : Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием, Тольятти, 18–20 апреля 2023 года. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2023. – С. 12-20. – EDN OFGIYN.
  - Иванова, Н. А. Перспективы применения искусственного интеллекта в ландшафтном проектировании / Н. А. Иванова, С. А. Анциферов, Л. В. Грызунова // Цифровые технологии: настоящее и будущее : сборник статей по материалам II Национальной научно-практической конференции, Тольятти, 10 ноября 2023 года. – Тольятти: Частное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинская академия управления», 2023. – С. 45-51. – EDN BVEVBC.
  - Анциферов, С. А. Влияние геометрии улитки насоса на параметры потока / С. А. Анциферов, А. Ю. Алмаев, А. Ш. Шобутолибов // Природопользование и устойчивое развитие регионов России : Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 15–16 июня 2021 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2021. – С. 11-16. – EDN FUBQOW.
  - Имитационное моделирование влияния антигололедных реагентов на ливневые воды / В. А. Седыкин, Е. А. Капалкина, С. А. Анциферов [и др.] // Экология и безопасность жизнедеятельности : Сборник статей XVI Международной научно-практической конференции, Пенза, 26–27 декабря 2016 года / Под редакцией В.А. Селезнева, И.А. Лушкина. – Пенза: Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, 2016. – С. 89-94. – EDN XRVBIJ.

## Приложение Б

### Фотоматериалы с объектов, на которых проводились натурные эксперименты (промышленная зона)



Рисунок Б.1 – Дождеприёмник у КПП 27  
Южная сторона дороги



Рисунок Б.2 – Дождеприёмник и КК №114 у КПП 27  
Северная сторона дороги



Рисунок Б.3 – Сток со стоянки и территории АО «АВТОВАЗ»  
Южная сторона дороги



Рисунок Б.4 – Насыпь железной дороги  
Северная сторона дороги

Продолжение приложения Б



Рисунок Б.5 – Смыв грунта на дороге



Рисунок Б.6 – Повреждённая крышка колодца



Рисунок Б.7 – Дождеприёмник у КПП 9  
Северная сторона дороги



Рисунок Б.8 – Дождеприёмник и КК №140  
Северная сторона дороги



Рисунок Б.9 – Вид от КК №140 в  
западном направлении  
Северная сторона дороги



Рисунок Б.10 – Вид от КК №140 на  
стоянку у КПП 9

Продолжение приложения Б



Рисунок Б.11 – Железная дорога в  
районе КК №140  
Западное направление



Рисунок Б.12 – Железная дорога в  
районе КК №140  
Восточное направление

## Приложение В

### Фотоматериалы с объектов, на которых проводились натурные эксперименты (селитебная территория)



Рисунок В.1 – Контрольный колодец  
ЛК-13

Размещение на местности



Рисунок В.2 – Контрольный колодец  
ЛК-13

Общий вид



Рисунок В.3 – Дождеприёмник 2  
Общий вид



Рисунок В.4 – Дождеприёмник 2



Рисунок В.5 – Дождеприёмник 10  
Общий вид



Рисунок В.6 – Дождеприёмник 10

## Продолжение приложения В



Рисунок В.7 – Продовольственный рынок



Рисунок В.8 – Место сбора мусора

## Затопление бессточной области на территории школы №10



Рисунок В.9 – Северо-восточной угол



Рисунок В.10 – Калитка. Восточная сторона



Рисунок В.11 – Восточная сторона.  
Вид в южном направлении



Рисунок В.12 – Серверные ворота

Приложение Г

**Результаты расчёта и моделирования направлений поверхностного стока**

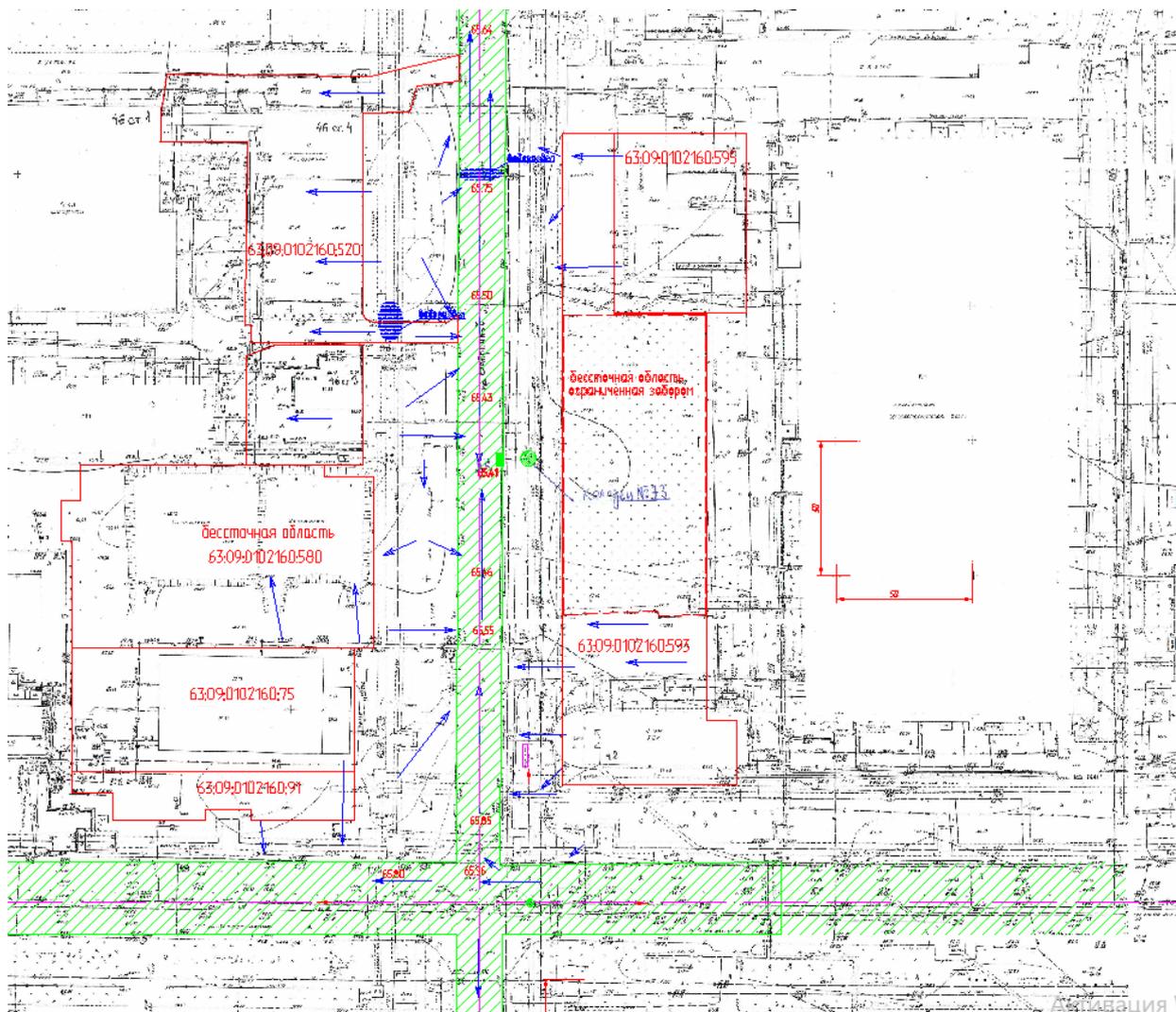


Рисунок Г.1 – Обследование муниципальных дорог (промышленная зона)



Продолжение приложения Г

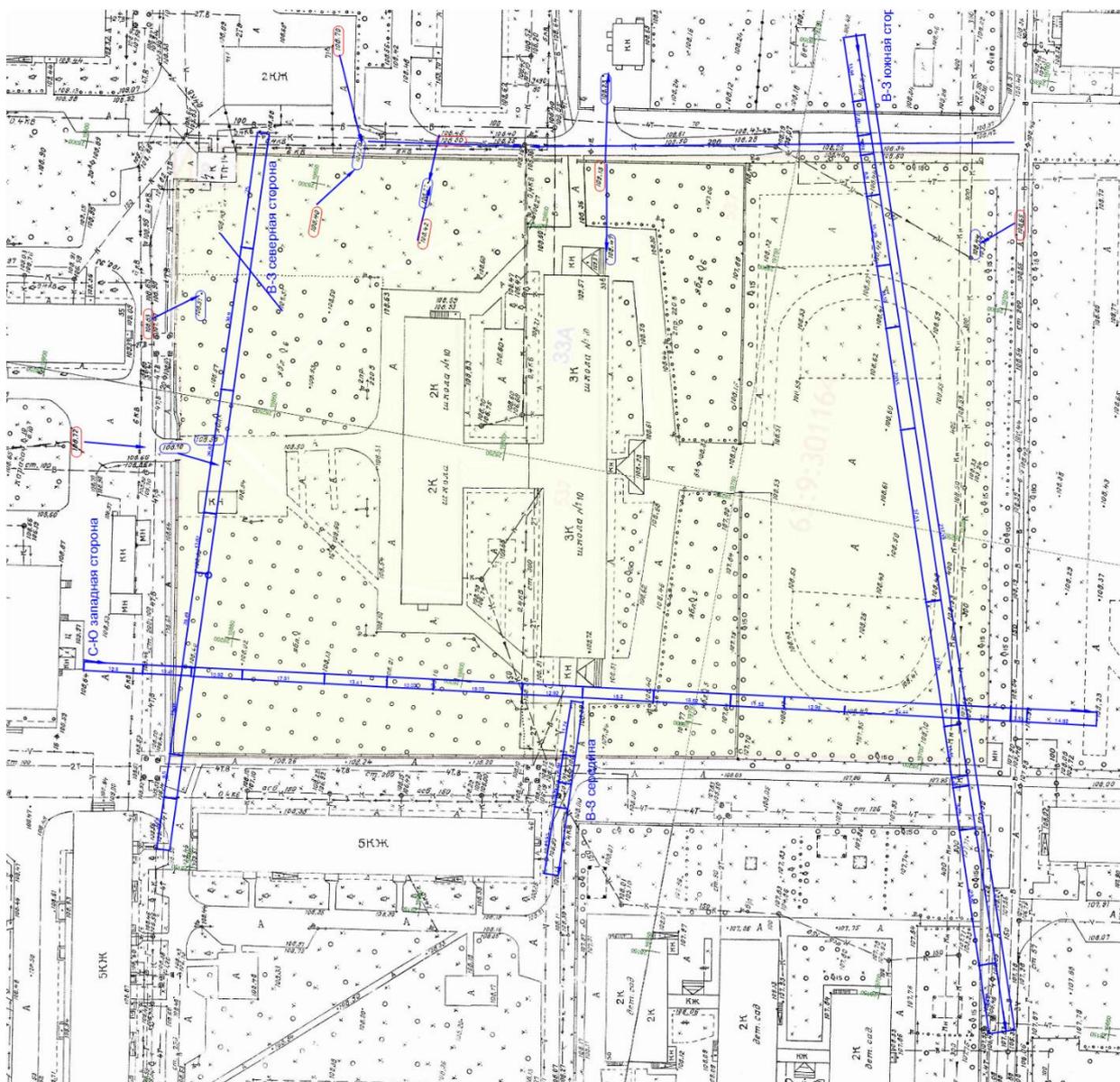


Рисунок Г.3 – Направления для построения продольных профилей поверхности школы №10 и прилегающих территорий