

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Горный институт Пермского федерального исследовательского  
центра Уральского отделения Российской академии наук»  
ПФИЦ ГИ УрО РАН**

*На правах рукописи*

Ляхин Юрий Сергеевич

**ОЦЕНКА И МИНИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ВОДОХРАНИЛИЩЕ  
(на примере Пермской ГРЭС и ПАО «ММК»)**

Специальность 25.00.27

Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (техн. науки)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор географических наук,  
профессор А.П. Лепихин

Пермь, 2018

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРОБЛЕМАТИКА ВОПРОСА ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	13
1.1. Технологические проблемы теплового загрязнения поверхностных водных объектов.....	13
1.2. Особенности регламентации теплового загрязнения поверхностных водных объектов.....	17
1.3. Метеорологические особенности районов расположения объектов исследования.....	22
1.4. Проблематика температурного воздействия Пермской ГРЭС на Камское водохранилище.....	35
1.5. Проблематика температурного воздействия ПАО «ММК» на Магнитогорское водохранилище.....	42
ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О СОСТОЯНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КРУПНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	47
2.1. Получение морфометрических характеристик участков водохранилищ.....	48
2.2. Исследование температурных полей водохранилищ.....	54
2.3. Наблюдение за метеопараметрами в районе размещения энергетических комплексов.....	61
ГЛАВА 3. МОДЕЛИ АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ.....	63
3.1. Общий анализ моделей.....	65
3.2. Оценка устойчивости водных масс при организации селективного забора воды.....	70

3.3. Методическое обеспечение проведения вычислительных экспериментов.....	75
3.3.1. Одномерные (1D) гидродинамические (гидротермические) модели.....	77
3.3.2. Двумерные (2D) гидродинамические (гидротермические) модели и принципы их построения.....	78
3.3.3. Трехмерные (3D) гидродинамические (гидротермические) модели и принципы их построения .....	84
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ СТОКОВ ПЕРМСКОЙ ГРЭС.....	88
4.1. Постановка задачи и анализ принятых сценариев.....	88
4.2. Результаты гидротермических расчетов в рамках 2D модели..	91
4.3. Результаты гидротермических расчетов в рамках 3D модели..	96
ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ МАГНИТОГОРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ СТОКОВ ПАО «ММК».....	116
5.1. Анализ «ноль» - мерных моделей водоемов-охладителей.....	116
5.2. Обоснование и описание сценариев моделирования в 2D постановке.....	123
5.3. Результаты гидродинамического и гидротермического моделирования в 2D постановке.....	131
5.4. Результаты гидротермических расчетов в рамках 3D модели .	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	153

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

Энергетика является не только важнейшим самостоятельным сектором экономики Российской Федерации, но и неотъемлемой частью ее промышленного производства. К одному из основных видов генерирующих станций, в современных условиях, следует относить тепловые энергетические станции (ТЭС) и их разновидность - ГРЭС. По данным системного оператора единой электроэнергетической системы России – суммарная установленная электрическая мощность тепловых электростанций ЕЭС России на 1 января 2018 года составляла 162,8 ГВт или 67,9 % от мощности всех электростанций. Всего в нашей стране, на данный момент, насчитывается 376 ТЭС (мощность более 25 МВт), 23 из которых имеют мощность более 1000 МВт [Динамика потребления электроэнергии..., 2016]. Эффективность работы данных станций напрямую зависит от температуры воды, поступающей на охлаждение конденсаторов турбин. С другой стороны, ужесточающееся законодательство диктует условия, при которых предприятия должны существенно уменьшать воздействие на водные объекты, в том числе и температурное, являющееся основным при эксплуатации ТЭС. Одним из оптимальных технических путей решения является переход на замкнутые оборотные системы водоснабжения. При этом должно обеспечиваться максимальное охлаждение отводимых подогретых стоков. Использование и строительство градирен для охлаждения воды, как один из вариантов, является не только достаточно дорогостоящим, но и сильно зависит от физико-географических, социальных условий, а также формирует на территории размещения станции особый микроклимат.

Поэтому, в настоящее время водохранилища – это наиболее распространенный тип охладителей для крупных тепловых электростанций. При их использовании возникают проблемы, которые индивидуальны для каждого водоема. Для малых водохранилищ – это ограничение мощности станции возможностями охлаждения, для крупных – это тепловое загрязнение, изменение ледово-термического режима, гидрофизических и

гидробиологических процессов, особенно в районах влияния сбросов подогретых вод. Так, при незначительном подогреве воды (до 27 °С) происходит сдвиг в физиологических циклах водных организмов, увеличение количества планктона и зарастания водной растительностью. При подогреве воды до 30 °С и выше уменьшается растворимость кислорода в воде, приводящая к его дефициту. Как следствие, наблюдаются явления, аналогичные заморным, вызывающие гибель гидробионтов. Изучению этих вопросов посвящено значительное количество работ как отечественных, так и зарубежных исследователей [Филатова и др., 1976; Браславский и др., 1989; Дьяков и др., 1997; Голованов и др., 2012].

Основными направлениями исследований можно назвать следующие:

- Натурные наблюдения (гидрологические, гидрохимические, гидробиологические), цель которых – получить комплексную картину воздействия термальных вод на водоем-охладитель, и на основе этого выработать практические рекомендации по улучшению его термического режима [Макаров и др., 1986];
- Теоретические исследования процессов с целью выработки расчетных зависимостей, характеризующих динамику теплового потока в водохранилище во времени и в пространстве, максимально приближенных к фактическим данным;
- Моделирование процессов, происходящих в водоемах-охладителях с использованием современных программных комплексов и вычислительной техники.

### **Изученность проблемы**

В целом, по проблеме температурного воздействия энергетических станций на водные объекты имеется достаточно большое количество работ. Большая часть из них была выполнена после ввода их в эксплуатацию в период 1960-1980 гг. и относится к крупным ТЭС и АЭС. Тематика работ связана, как правило, с изучением изменений в гидрологическом, гидрохимическом и гидробиологическом режимах данных водоемов под воздействием подогретых

стоков. Среди публикаций в этом направлении значительное количество работ посвящено воздействию Конаковской ГРЭС на Иваньковское водохранилище [Буторин, 1969, 1971; Литвинов и др., 1973, 1974; Флейс, 1974], Читинской ГРЭС на оз. Кенон [Борисенко и др., 1972; Вологодин, 1972; Шишкин, 1972], Сургутской ГРЭС на Сургутское водохранилище [Дубников, 1977], Костромской ГРЭС на Горьковское водохранилище [Готлиб и др., 1976] и др. Следует отметить, что многие ТЭС располагаются на берегах рек, и в этом случае влияние и распространение подогретых стоков имеет другие особенности.

Наиболее детальные исследования влияния Пермской ГРЭС на Камское водохранилище связаны с периодом ввода станции в эксплуатацию. Именно тогда, в 1985-1995 годы, проводились комплексные натурные наблюдения. Одним из важнейших итогов в данный период является установление возможности поступления подогретых вод в подводящий канал Пермской ГРЭС. В то же время, следует отметить, что не было уделено достаточного внимания изучению вертикальной неоднородности распределения температуры в исследуемом районе Камского водохранилища. Далее актуальность вопроса снизилась. В период 1996-2012 годов проводились отдельные инициативные работы по оценке воздействия Пермской ГРЭС на гидрологический и тепловой режим Камского водохранилища. Результаты исследований теплового загрязнения отражены в работах Е.Б. Бравой [Бравая и др., 1978], В.М. Носкова [Носков, 1988], В.Г. Калинина [Калинин, 2008], А.Б. Китаева [Китаев и др., 2015], а также в неопубликованных отчетах о работах Пермского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (1985-1991). Первые работы по гидродинамическому моделированию в двумерной постановке с целью прогнозирования были выполнены Лепихиным А.П. в 1995-1996 гг. [Лепихин и др., 1996].

Наиболее же детальное и активное изучение влияния и прогнозирования воздействия тепловых станций на водоемы-охладители, а также изучение плотностных эффектов наблюдается в последние 5-10 лет и связано оно,

главным образом, с быстрым прогрессом как средств измерений, так и вычислительных технологий. На протяжении 50 лет с высокой точностью выполняется так называемый закон Мура, согласно которому мощность ЭВМ увеличивается в 1000 раз за каждые 11 лет [Ильин, 2018].

В России среди наиболее актуальных работ можно выделить изучение влияния энергетических станций на температурный режим водоемов-охладителей Конаковской ГРЭС [Саминский и др, 2013; Григорьева и др., 2018], Белоярской АЭС [Верещагина и др., 2013; Arukhtin et al., 2013], Гусиноозерской ГРЭС [Гуржапов Б.О., Цыдыпов Б.З. и др., 2017], Шатурской ГРЭС [Дебольская Е.И. и др., 2010] и других. За рубежом современные исследования температурного воздействия и методов его оценки на водные объекты, в том числе с помощью модельных расчетов, распространены шире. К наиболее актуальным можно отнести исследования: Lale B., Asu I. et al (2013); Issakhov A. (2014); Ling F. et al (2017); Love R.V. et al (2018); Raptis C. E. et al (2016); Prats J. et al (2012); Madden N. et al (2013).

Первые прикладные модели в рамках «плоской» гидродинамики были разработаны Бернадским Н.М. еще в начале 30 годов XX века. В целом, их применение в значительной мере усложняется фрактальностью морфометрии естественных водных объектов, значительным различием масштабов естественных и технологических параметров, существенной изменчивостью гидрометеорологических факторов.

При этом, как правило, очень мощным лимитирующим обстоятельством выступает ограниченность мощностей доступных вычислительных средств. Поэтому наиболее распространённый подход к решению данных задач основан на плоских моделях в 2D постановке: Кинд Н.Я. и др. (1972); Трубина Е.К. (1967); Соколов А.С. (1997); Зиновьев А.Т. и др. (2014, 2017); Лепихин А.П. и др. (2011, 2013, 2015, 2017); Белолипецкий В.М. и др. (2006); Ляхин Ю.С. и др. (2015, 2017) и др.

В настоящее время компьютерное моделирование становится одним из наиболее активно используемых и эффективных инструментов решения актуальных водохозяйственных задач.

Однако многочисленные материалы полевых наблюдений показали, что представление о «двумерности» рассматриваемых полей, равномерности распределения температура воды по глубине нуждается в очень существенном уточнении. Поэтому для получения более адекватных результатов требуется переход к 3D-модели. Использование моделей в такой постановке представлено в работах Вольцингера Н.Е. и Клеванного К.А. (2018), Кошелева К.Б. (2017), Саминского Г.А. (2014), Любимовой Т.П. и Лепихина А.П. (2014, 2018) и др.

Так как эффекты плотностной стратификации могут быть обусловлены не только изменением температуры, но и содержанием взвешенных веществ и минерализации, они достаточно широко исследуются и находят практическое применение при решении ряда актуальных водохозяйственных задач. Ранее опыт использования комплексных моделей был применен при решении задач снижения жесткости забираемой воды на основном питьевом водозаборе г. Перми – Чусовских очистных сооружениях (ЧОС), а также при решении задач отведения высокоминерализованных сточных вод предприятий калийной промышленности [Лепихин и др., 2010, 2011, 2016].

**Объектами исследований являются:**

- Камское водохранилище, как водоем-охладитель Пермской ГРЭС;
- Магнитогорское водохранилище и резервуар-охладитель ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

**Предметом исследований** являются температурные поля, формируемые в водохранилищах под воздействием крупных энергетических комплексов с целью минимизации их воздействия на водный объект.

**Цель и задачи исследований.** Цель работы заключалась в разработке технологии повышения эффективности использования водохранилищ, как водоемов-охладителей крупных энергетических комплексов, путем сопряжения современных систем измерения и численного моделирования.



Исходя из поставленной цели исследования, были определены задачи:

- исследовать формирование теплового режима Камского и Магнитогорского водохранилищ в зоне влияния сбросов, соответственно, Пермской ГРЭС и ПАО «ММК» на основе комплексных натурных исследований;
- построить комбинированную систему численного моделирования Камского и Магнитогорского водохранилищ в районах размещения Пермской ГРЭС и ПАО «ММК», соответственно, а также выполнить на их основе сценарные расчеты;
- разработать рекомендации для формирования принципиальных проектных решений по минимизации воздействия подогретых стоков на окружающую среду и повышению устойчивости технической эксплуатации водоема-охладителя.

#### **Научная новизна работы.**

В течение 2013-2017 годов были впервые проведены детальные комплексные исследования температурного режима Камского и Магнитогорского водохранилищ во всей зоне возможного влияния подогретых сточных вод с помощью современного оборудования при различных метеорологических условиях. На их основе были определены основные особенности и масштаб существующих стратификационных эффектов.

Впервые, для корректного описания температурных полей, формируемых под воздействием энергетических комплексов, были использованы сопряженные гидродинамические модели 1D→2D→3D-постановках для Камского водохранилища в районе расположения Пермской ГРЭС и Магнитогорского водохранилища в зоне воздействия ПАО «ММК». При этом 3D-модели рассматривались не в гидростатическом приближении.

Решены актуальные задачи повышения эффективности водопользования и снижения отрицательного воздействия на водоемы на примере конкретных энергетических комплексов .

Впервые оценен комплекс метеорологических и технологических параметров, при которых становится возможным попадание в подводящий канал Пермской ГРЭС отводимых подогретых стоков.

Многовариантные модельные расчеты по оценке теплового воздействия энергетических установок позволили сформировать рекомендации для проектирования нового энергоблока в случае с Пермской ГРЭС и расширению резервуара-охладителя (переход на замкнутый цикл) на ПАО «ММК». При этом учитывались особенности существующей системы водопользования, экологического законодательства и гидрометеорологических условий.

В данной работе были применены новые технологии оценки теплового воздействия на поверхностные водные объекты, основанные на сопряжении современных как измерительных, так и программных комплексов, позволяющих проводить детальный учёт не только морфометрических, но и гидрометеорологических характеристик водного объекта.

#### **Практическая значимость результатов.**

Полученные результаты обследования акватории и последующие модельные расчеты легли в основу оценки изменения температурного воздействия стоков при реализации проекта строительства нового энергоблока Пермской ГРЭС и принятия технических решений по минимизации его воздействия на водный объект.

Выполнен комплекс полевых исследований Магнитогорского водохранилища в зоне деятельности ПАО «ММК» в период 2013-2017 годов. Результаты явились основой НИР по изучению и обоснованию схем движения водных потоков в существующей системе повторно-последовательного использования вод. В дальнейшем, на стадии предпроектных изысканий, был создан комплекс моделей и проведены многовариантные оценки для выбора наиболее оптимальных технических решений по переходу на оборотный цикл использования воды. Результаты работы явились неотъемлемой частью проекта «Реконструкция системы оборотного водоснабжения ПАО «ММК» с расширением резервуара-охладителя...».

**Основные защищаемые положения:**

1. Оценка воздействия крупных энергетических комплексов на водные объекты на примере Пермской ГРЭС и ПАО «ММК», на основе сопряжения современных средств измерений и комбинированных гидродинамических моделей в 1D→2D→3D-постановках;

2. Сценарный подход, включающий верифицированное сопряжение гидродинамических моделей в 2D и 3D-постановках в негидростатическом приближении, позволяет более полно и эффективно оценить экстремальные ситуации и наметить мероприятия по минимизации их последствий;

3. Для Пермской ГРЭС критические ситуации по технологическим показателям могут возникнуть при юго-восточных ветрах продолжительность более 12 часов и интенсивностью не менее 8 м/сек.;

4. Для повышения эффективности использования резервуара - охладителя ПАО «ММК» в наиболее теплый лимитирующий период года необходимо вовлечение в процесс охлаждения воды из наиболее глубоких (охлажденных) горизонтов;

5. Для повышения надежности функционирования системы водопользования ПАО «ММК» в наиболее теплый лимитирующий период, необходимо предусмотреть возможность отведения подогретых стоков в Магнитогорское водохранилище.

**Степень достоверности результатов исследований** определяется использованием стандартных методов испытаний и способов измерений с помощью сертифицированного оборудования, использованием современных методов статистического анализа, подтверждается согласованностью результатов гидродинамического моделирования и натурных измерений.

**Апробация работы.**

Результаты работ были доложены на ежегодной отчетной сессии Горного института УрО РАН ПФИЦ (Пермь, 2015, 2017), на V и VI Международной научно-практической конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2015, 2017), на научно-технической конференции

«Проблемы экологической безопасности предприятий горно-металлургического комплекса и моногородов» (Магнитогорск, 2017), на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экология водоемов-охладителей энергетических станций» (Чита, 2017).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 8 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, а также 1 Scopus и Web of Science.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5-и глав, заключения, списка литературы, включающего 108 наименований. Работа изложена на 165-и страницах печатного текста, осложнена 78-ю рисунками и 14-ю таблицами.

**Благодарность.**

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.г.н., проф. Лепихину А.П. за помощь в формировании научного направления диссертационной работы, д.ф-м.н., проф. Любимовой Т.П. и к.ф-м.н. Паршаковой Я.Н. за помощь в проведении модельных расчетов, а также своим коллегам к.т.н. Богомолу А.В., Лучникову А.И., Бессонову И.Д., Тиуну А.А. за помощь в выполнении работы.

## ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРОБЛЕМАТИКА ВОПРОСА ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

### 1.1. Технологические проблемы теплового загрязнения поверхностных водных объектов

Современный техногенный тип цивилизации, в значительной мере, основан на все более возрастающем потреблении энергетических ресурсов, и, в первую очередь, электроэнергии.

Суммарная установленная мощность электростанций России за 2008-2015 годы представлена на рисунке 1.1.1. Как следует из данного рисунка, в энергетической системе страны отмечается постоянный рост (около 1,5% в год) суммарной мощности электростанций, который обеспечивается, главным образом, за счет ТЭС. В 2015 году установленная мощность электростанций ЕЭС России составила 235,3 ГВт, из которых около 68% приходится на ТЭС, 20% – на ГЭС, 12% – на АЭС [Динамика потребления электроэнергии..., 2016]. Имеющиеся ветровые (ВЭС), геотермальные (ГеоЭС), приливные (ПЭС) станции в сумме дают не более 0,1% в общей мощности электростанций РФ.

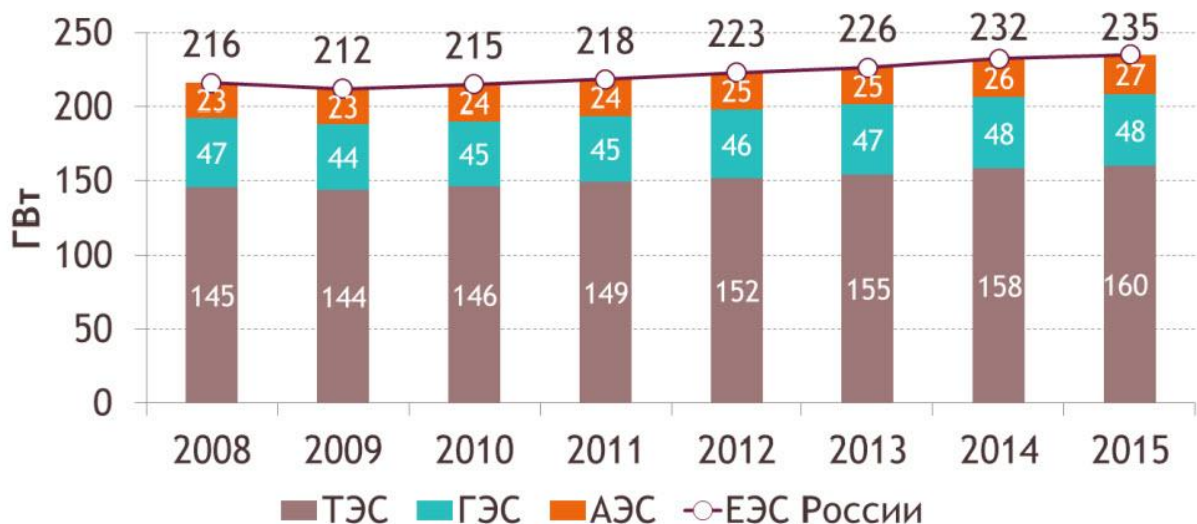


Рис. 1.1.1. Установленная мощность электростанций России  
[Динамика потребления электроэнергии..., 2016]

С позиции экологии принципиальное значение имеет то, какая доля потенциальной энергии топлива идет на выработку электрической энергии, и, соответственно, какая доля выбрасывается, ассимилируется с окружающей

средой. Термодинамический цикл Ренкина, лежащий в основе работы установок (ПТУ) ТЭС, в середине XX века имел температуру пара  $\sim 500$  °С и КПД  $\sim 35\%$ . В настоящее время, вследствие увеличения давления и температуры пара, на лучших энергоблоках достигается: «Альборг» (Дания), мощностью 400 МВт, КПД – 49%; «Гесслер» (Германия), мощность 740 МВт, КПД – 45,4%; «Кавагое-1» (Япония), мощность 700 МВт, КПД – 41,9% [Яковлев и др., 2006].

Используемые на некоторых ТЭС газотурбинные установки (ГТУ) имеют меньший КПД, около 36-39%. Главное же преимущество ГТУ заключается в ее компактности и отсутствии сложной системы технического водоснабжения.

Совмещение положительных качеств циклов ПТУ и ГТУ привело к созданию так называемой парогазовой установки (ПГУ). ПГУ – самый экономичный и экологичный комбинированный тепловой двигатель, используемый сегодня для получения электроэнергии. Существующие установки имеют мощность от нескольких десятков до 1000 МВт и КПД  $\sim 55-60\%$  [Яковлев и др., 2006]. Именно такая установка (ПГУ-800, мощность 861 МВт, КПД – 57%) является основой 4-го энергоблока Пермской ГРЭС, введенного в эксплуатацию в августе 2017 года.

Таким образом, в настоящее время, даже на лучших энергетических установках более 40% выработки энергии не преобразуется в электроэнергию, а требует ассимиляции в окружающей среде. Главный, основной поток тепловой энергии обусловлен потоком воды, используемой на охлаждение конденсаторов энергетических блоков.

Проблема теплового загрязнения окружающей среды заключается, в первую очередь, в ее локальности. Даже при современном быстром росте энергетики, в глобальном масштабе, тепловое загрязнение составляет  $\sim 0,02\%$  от суммарной солнечной радиации и составляет  $\sim 1,68 \cdot 10^5$  млн. МВт [Дёмина, 1996], т.е. при глобальной оценке тепловое загрязнение существенно ниже 0,1%. Однако, согласно оценкам, глобально энергетика не может превысить

0,2% от солнечной радиации без катастрофических последствий [Дёмина, 1996].

Ситуация радикально изменяется на локальном уровне, в непосредственной близости от энергокомплексов. В качестве среды, используемой для отведения тепла от рабочих модулей энергокомплексов, как правило, используется вода, как вещество, характеризующееся аномально высокой теплоемкостью [Беховых и др., 2008; Рид и др., 1982]. При этом ставится задача максимального обеспечения ассимиляции рассеивания отводимого тепла в объектах окружающей среды, в первую очередь, в атмосфере.

В зависимости от мощности энергетических установок и характера используемых поверхностных водных объектов может быть несколько принципиальных схем охлаждения отводимых теплых вод.

Наиболее простая схема охлаждения реализуется при наличии достаточно крупного поверхностного водного объекта. В этом случае может быть реализована прямоточная система охлаждения без повторного забора отводимых стоков.

Задача отведения сточных вод сводится к организации такой схемы, чтобы, с одной стороны, в установленных контрольных створах не наблюдалось бы, при сочетании наиболее неблагоприятных технологических, гидрологических и метеорологических факторов, превышения нормативных показателей температуры воды, с другой стороны, не допускалось бы в наиболее неблагоприятных условиях поступления отводимых стоков в канал забора свежей воды.

Поступление теплой воды в канал забора свежей воды может существенно увеличить температуру забираемой воды и, тем самым, существенно снизить эффективность работы энергоблоков.

При отсутствии крупных водных объектов невозможна организация прямоточной схемы охлаждения, создаются водоемы-охладители и организуется обратная система охлаждения. При этом, охлаждающая

способность поверхности воды согласно оценкам [Опекунов и др., 2014] в зависимости от температуры воды и воздуха, скорости ветра варьирует от 7 до 36 ккал/ч м<sup>2</sup> на каждый градус разницы температуры.

Технология расчета прудов-охладителей при заданных технологических и метеорологических параметрах достаточно детально изложена в «Методических указаниях по технологическим расчетам водоемов-охладителей» [РД 153-34.2-21.144-2003].

Однако проблема этих расчетов существенно усложняется значительной как внутригодовой, так и межгодовой изменчивостью метеорологических параметров, наличием неоднородных водных масс, не только по акватории, но и глубине водного объекта.

При глубинах свыше 3-4 м ветровое воздействие, как правило, не в состоянии обеспечить достаточное перемешивание водных масс, в этих условиях начинают существенную роль играть плотностные стратификационные эффекты. Более холодные, более плотные воды начинают формироваться в наиболее глубоких частях водоема.

При достаточной разнице температур нижний придонный слой воды достаточно устойчив и при поверхностных водозаборах он, как правило, исключается из активного функционирования.

В то же время, при достаточном объеме, эти нижние охлажденные слои воды могут быть существенным резервом, используемым для повышения устойчивости работы водоемов-охладителей во время наиболее неблагоприятных, с точки зрения температурного воздействия, метеорологических условиях.

В данной диссертационной работе в качестве примера энергетического комплекса с прямоточной системой охладителей рассматривается Пермская ГРЭС, использующая для охлаждения отводимых стоков Камское водохранилище, а в качестве примера системы оборотного водоснабжения – ПАО «ММК», использующий для этих целей Магнитогорское водохранилище и существующий резервуар-охладитель.



Если размеры зон теплового воздействия неприемлемо велики или водоем-охладитель не в состоянии обеспечить необходимую разницу температур сбрасываемой и забираемой воды, устанавливаются различного типа градирни, обеспечивающие более интенсивное снижение температуры воды, за счет увеличения теплообмена с атмосферой. По оценкам Яковлева Б.В. [Яковлев и др., 2006] для обеспечения снижения температуры воды на  $6^{\circ}\text{C}$ , на испарение израсходуется  $\sim 1\%$  охлаждаемой воды. Однако, при этом необходимо подчеркнуть, хотя устройство градирен достаточно часто является единственным приемлемым средством снижения температуры воды, подаваемой на охлаждение конденсаторов энергоблоков, их строительство весьма дорогостоящее, а необходимое снижение температуры достигается, как правило, значительными энергозатратами. Поэтому, в общем случае, более оптимальным вариантом повышения эффективности системы охлаждения ТЭС, может быть совершенствование использования самого водоема-охладителя. Для повышения его надежности и устойчивости функционирования, необходимо вовлечение, в наиболее теплые периоды года, воды из его нижних наиболее охлажденных горизонтов.

## **1.2. Особенности регламентации теплового загрязнения поверхностных водных объектов**

При анализе проблем оценки воздействия и регламентации теплового загрязнения поверхностных водных объектов широко используется, по аналогии с химической нагрузкой, термин «тепловое загрязнение». Соответственно, действующие системы регламентации теплового загрязнения построены по аналогии с системой регламентацией химической нагрузки. В нашей стране действуют две независимые общедофедеральные системы единых химических и физических показателей качества воды поверхностных водных объектов, определяющих допустимость их использования для определенных видов водопользования. Первая система, определяемая соответствующими «Гигиеническими требованиями...» [СанПиН 2.1.5.980-00] регламентирует

качество воды водных объектов, используемых для питьевых и хозяйственно-бытовых целей. Согласно данному документу, для обеспечения комфортных условий культурно-бытового и рекреационного водопользования, температура воды в контрольном створе объекта «Летняя температура воды в результате сброса сточных вод не должна повышаться более чем на 3 °С по сравнению со среднемесячной температурой воды самого жаркого месяца года за последние 10 лет».

Для систем централизованного водопользования температура воды не регламентируется. Так, температура воды в централизованных системах водоснабжения весьма опосредованно связана с температурой воды в источниках водоснабжения. Она, как правило, не влияет на регламентацию отведения термальных стоков. Значительно более чувствительны к температурным нагрузкам гидробионты, для которых вода является естественной средой обитания. Согласно действующему в РФ Приказу «Об утверждении нормативов качества воды...» [Приказ Минсельхоза России №552, 2017] «Температура воды не должна повышаться под влиянием хозяйственной деятельности (в том числе, при сбросе сточных вод) по сравнению с естественной температурой водного объекта более чем на 5 °С, с общим повышением температуры не более чем до 20 °С летом и 5 °С зимой для водных объектов, где обитают холодолюбивые рыбы (лососевые и сиговые) и не более чем до 28 °С летом и 8 °С зимой в остальных случаях. В местах нерестилищ налима запрещается повышать температуру воды зимой более чем на 2 °С».

Достаточно близкие нормативы имеют место и в природоохранном законодательстве ЕС [Parameters of water quality..., 2001]. При отведении теплых вод в море не допускается повышение воды более чем 3 °С в 75 % проб воды. При отведении стоков в пресноводные водные объекты, не допускается увеличение температуры воды более чем 1,5 °С, однако не в контрольном створе, как в нормативах РФ [Приказ Минсельхоза России №552, 2017], а за пределами зоны смешения. Для водных объектов, используемых для разведения лососевых рыб, при допущении увеличении в 1,5 °С,

устанавливаются весьма жесткие требования к максимальной температуре воды – не более 21,5 °С в течение мая-октября, и с ноября по апрель – не более 10 °С. Так как контрольный створ, согласно [Parameters of water quality..., 2001], устанавливается не далее чем 500 м от источника загрязнения, то он, как правило, находится значительно ближе створа полного перемешивания. Поэтому различия в данных нормативах ЕС и РФ не столь значительны.

Для получения объективной оценки влияния повышения температуры воды на гидробионты необходимо, кроме непосредственно, прямого воздействия анализировать и учитывать косвенное, опосредованное воздействие связанное:

- с увеличением скорости биохимических реакций. Согласно закону Ван Хоффа, скорость данной реакции увеличивается в 2 раза при росте температуры воды на 10 °С. У хладнокровных организмов повышение температуры усиливает скорость обмена веществ, и, соответственно, вызывает повышение потребления кислорода;

- с уменьшением содержания в воде растворимого кислорода. Так, если при температуре воды в 15 °С, равновесное содержание растворимого кислорода составляет ~ 11,5 мг/л, то при 30 °С оно снижается до 7,5 мг/л;

- с увеличением чувствительности гидробионтов к широкому кругу токсикантов;

- с увеличением вегетативного периода, что может приводить к трансформации сложившихся биоценозов. Происходит замена состава фито- и зоопланктона на виды толерантные к повышенной температуре. Наблюдается смена обычной водной флоры на сине-зелёные водоросли, которые характеризуются не только повышенным поглощением кислорода, но и существенной токсичностью продуктов их распада [Голованов и др., 2012].

В целом, влияние температуры воды на жизнедеятельность рыб, как важнейшего звена рассматриваемых гидробиоценозов, проявляется, как отмечается в [Голованов и др., 2012] на клеточном, тканевом, организменном, видовом и популяционном уровне.

Так как водные объекты в естественных условиях характеризуются значительной пространственной и временной изменчивостью теплового режима, то рыбы в процессе эволюции выработали системы адаптаций, позволяющих существовать им в весьма широком диапазоне температур.

Так как существенная пространственно-временная неоднородность температурных полей является характерной особенностью поверхностных водных объектов, то терморегуляционное поведение, наряду с адаптацией к кратковременным воздействиям сублетальных температур, являются важнейшими механизмами жизнеобеспечения ихтиофауны [Голованов и др., 2012]. В настоящее время уделяется весьма значительное внимание исследованию этих механизмов. Однако для реального их использования в решении задач повышения устойчивости гидробиоценозов, снижения негативного влияния тепловых выбросов ТЭС и АЭС на водные объекты, необходимо наличие детальной информации о характере и структуре температурных полей, в рассматриваемых водных объектах.

В нашей стране наиболее полный комплекс исследований по влиянию повышения температуры воды на ихтиофауну был выполнен в серии исследований В.К. Голованова. Выполненная им классификация рыб по отношению к температурному фактору позволила сделать вывод о том, что возможное дальнейшее потепление климата многие теплолюбивые виды рыб перенесут без особых проблем. У них существует определенный «температурный запас прочности» в несколько градусов. Это связано с тем, что большинство видов, обитающих в северо-западных и центральных регионах Европейской части России, существуют в температурных условиях на несколько градусов ниже значений их ЭФО (эколого-физиологического оптимума). Для холодолюбивых видов (налим, радужная форель, пелядь, корюшка) повышение среднегодовой температуры на несколько градусов может представлять определенную угрозу. Однако гораздо более опасными для всех видов являются случаи аномального повышения температуры в летний сезон года.

Критические значения температур воды для отдельных представителей ихтиофауны представлены в таблице 1.2.1.

Таблица 1.2.1

*Температурные характеристики молоди некоторых видов рыб по [Голованов и др., 2012]*

Вид	ОИТ, °С	ХЛМ, °С	КТМ, °С	ЛТ, °С
Карп	30,9±0,5	41,3±0,1	35,6±0,1	36,5±0,2
Плотва	24,0±0,3	34,4±0,3	32,0±0,3	32,6±0,3
Окунь	26,4±0,3	33,5±0,5	32,0±0,1	33,2±0,2
Щука	24,3±0,3	34,0±0,4	33,6±0,1	35,2±0,2

где, ОИТ – окончательная избираемая температура (наиболее комфортная), как правило, весьма близкая к величине эколого-физиологического оптимума (ЭФО);

ХЛМ – хронический летальный максимум;

КТМ – критический температурный максимум;

ЛТ – летальная температура.

Для осетровых рыб ОИТ (окончательно избираемая температура) и ВЛТ (верхняя летальная температура) несколько ниже, в сравнении с теплолюбивыми и эвритермными карповыми, окуневыми видами, но выше, чем у холодолюбивых лососевых и сиговых рыб. Зона эколого-физиологического оптимума осетровых видов (сеголетки и годовики) расположена в диапазоне температуры от 18 до 26 °С, верхняя температурная граница жизнедеятельности – в диапазоне 31-35 °С.

Из представленных выше материалов следует, что гидробионты имеют весьма гибкую и эффективную систему адаптации к повышенной температуре воды. Однако для ее эффективного использования для решения задач снижения техногенных воздействий на водные биоценозы необходима объективная информация о характере формирования температурных полей.

Кроме рассмотренных выше санитарно-гигиенических и рыбохозяйственных нормативов качества воды, существенную роль, а в ряде случаев и определяющее значение, имеют технологические нормативы. В отличие от вышерассмотренных экологических нормативов, требования к выполнению технологических нормативов, предъявляются не к конкретному

контрольному створу, а к качеству воды, поступающей на водозаборные устройства энергетических комплексов. Как правило, данные нормативы строятся на фиксации максимальных температур воды. В зависимости от технологических особенностей рассматриваемых объектов она составляет, как правило, около 27-30 °С. Так как в достаточно глубоких водоемах-охладителях распределение температуры воды весьма неоднородно по глубине, то при решении данных задач принципиальна не только оценка распределения температуры воды по акватории.

### **1.3. Метеорологические особенности районов расположения объектов исследования**

Характерная особенность водоемов-охладителей от водотоков-приемников сточных вод заключается в том, что их ассимилирующая способность определяется не только их гидрологическим режимом, особенностью морфометрии, но и метеорологическим режимом территории, в первую очередь, температурой воздуха и скоростью ветра.

Поэтому для выбора наиболее оптимального режима работы водоемов-охладителей необходим анализ температурного и ветрового режимов приземного слоя атмосферы в районе рассматриваемых водоемов-охладителей. Исходными данными послужили срочные (восемь сроков в сутки) значения температур воздуха, скорости и направления ветра за летние месяцы 2008-2017 гг. По срочным значениям температур воздуха были получены средние за сутки, и они уже подвергались анализу. По срочным значениям скорости ветра также рассчитывались среднесуточные величины, и, кроме этого, выбирались максимальные срочные скорости ветра за каждые сутки. Специальные характеристики ветра, такие как:

- повторяемость различных градаций скорости ветра;
- повторяемость направления ветра (румбы) на высоте 10-12 метров над земной поверхностью, осредненная за 10-минутный период;

- максимальные значения порыва ветра на высоте 10-12 м над земной поверхностью, осредненные за 10-минутный период, непосредственно предшествовавший сроку наблюдений на метеостанции.

Обработка метеорологической информации проводилась отдельно для температуры воздуха и ветровых характеристик, поэтому рассмотрим анализ этих наблюдений отдельно. Для анализа температурного и ветрового режима в районах расположения водоемов-охладителей Пермской ГРЭС и ТЭЦ-1 ПАО «ММК» были использованы данные наблюдений на метеостанциях г. Добрянка (для водоема-охладителя Пермской ГРЭС) и г. Магнитогорска (для водоема-охладителя ТЭЦ-1 ПАО «ММК»).

### ***Анализ температурного режима***

На первом этапе были рассчитаны статистические характеристики температуры воздуха за июнь, июль и август на метеостанциях (МС) в г. Добрянке и г. Магнитогорске (таблица 1.3.1-1.3.2). Данные таблицы показывают, что среднее значение температуры в июне-августе составляет в г. Добрянке – 17 °С, в г. Магнитогорске – 18,7 °С. Среднеквадратические отклонения температуры воздуха на обеих метеостанциях и за все три летних месяца примерно одинаковые – около 4. Коэффициенты вариации, соответственно, тоже близки – все около 0,2. Различаются лишь коэффициенты асимметрии, особенно в июне: если в г. Добрянке коэффициент асимметрии близок к нулю, то в г. Магнитогорске составляет 0,6.

*Таблица 1.3.1*

*Статистические характеристики температуры воздуха за июнь, июль и август на МС в г. Добрянке (по данным 2008-2017 гг.)*

Месяц	Выборка	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии
VI	268	16,4	16,3	4,6	27,4	4,1	0,25	-0,07
VII	189	17,9	18,4	9,0	26,2	3,8	0,21	-0,18
VIII	271	16,7	16,7	7,0	26,8	4,4	0,27	0,13

Таблица 1.3.2

Статистические характеристики температуры воздуха за июнь, июль и август на МС в г. Магнитогорске (по данным 2008-2017 гг.)

Месяц	Выборка	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии
VI	390	18,4	18,9	2,9	27,6	4,2	0,23	-0,57
VII	403	19,3	19,6	10,1	28,5	3,6	0,19	-0,25
VIII	402	18,4	18,4	8,1	27,8	3,9	0,22	-0,18

Затем сформированные из данных наблюдений ряды среднесуточных температур воздуха были проверены на однородность, причем проверялась однородность как между месяцами, так внутри каждого месяца между разными периодами наблюдений. Вторая проверка интересна выявлением тренда, обусловленного, по-видимому, изменением климата. Результаты проверки на однородность с использованием критерия Стьюдента температуры воздуха между летними месяцами на обеих метеостанциях приведены в таблицах 1.3.3.-1.3.4.

Таблица 1.3.3.

Оценка однородности с использованием критерия Стьюдента температуры воздуха за июнь, июль и август на МС в г. Добрянке (по данным 2008-2017 гг.)

Гр. 1 – Гр. 2	Объем выборки Гр. 1	Объем выборки Гр. 2	Среднее Гр. 1	Среднее Гр. 2	Критерий Стьюдента, t-value	Вероятность, p	Ср. отклонение Гр. 1	Ср. отклонение Гр. 2
VI - VII	268	189	16,4	17,9	-3,96	0,0001	4,11	3,82
VI - VIII	268	271	16,4	16,7	-0,836	0,405	4,11	4,43
VII - VIII	189	271	17,9	16,7	3,01	0,0027	3,82	4,43



Таблица 1.3.4.

Оценка однородности с использованием критерия Стьюдента температуры воздуха за июнь, июль и август на МС в г. Магнитогорске (по данным 2008-2017 гг)

Гр. 1 – Гр. 2	Объем выборки Гр. 1	Объем выборки Гр. 2	Среднее Гр. 1	Среднее Гр. 2	Критерий Стьюдента, t-value	Вероятность, p	Ср. отклонение Гр. 1	Ср. отклонение Гр. 2
VI - VII	390	403	18,4	19,3	-3,22	0,0013	4,19	3,61
VI - VIII	390	402	18,39	18,35	0,141	0,888	4,19	3,95
VII - VIII	403	402	19,3	18,4	3,509	0,0005	3,61	3,95

Таблицы 1.3.3. и 1.3.4 показывают, что по первому типу однородности результаты проверки совпадают по обеим метеостанциям: температуры за июнь и август образуют единую статистическую совокупность, а июль выделяется в отдельную совокупность, температура июля показывает отсутствие однородности и с июнем, и с августом.

Также были рассчитаны автокорреляционные и спектральные функции суточных колебаний температуры воздуха за летние месяцы (июнь, июль, август) на метеостанциях в г. Добрянке, г. Магнитогорске, г. Перми. Для г. Перми использовались данные из [Научно-прикладной справочник по климату..., 1990] в целях выявления каких-либо систематических ошибок в данных наблюдений пог. Добрянке и г. Магнитогорску, поскольку для этих метеостанций данные были взяты с сайта URL:<http://www.rp5.ru>, имеющего лицензию Росгидромета.

На рисунках 1.3.1-1.3.2 представлены автокорреляционные функции среднесуточной температуры воздуха за летние месяцы (июнь, июль, август) на метеостанциях в г. Добрянке и г. Магнитогорске. На этих же рисунках изображены теоретические автокорреляционные функции, рассчитанные по этим же данным, но в предположении, что ряды суточных температур воздуха можно описать процессом Маркова.

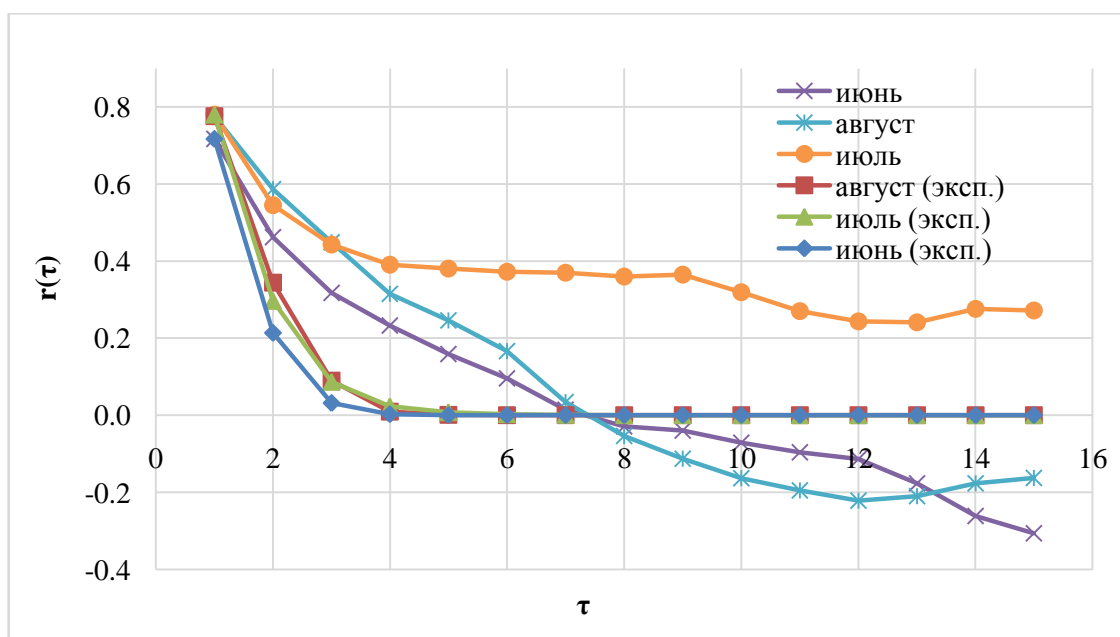


Рисунок 1.3.1 – Автокорреляционные функции эмпирические и теоретические (автокорреляционные функции цепи Маркова) среднесуточных значений температуры воздуха за летние месяцы (июнь, июль, август) на МС в г. Добрянке

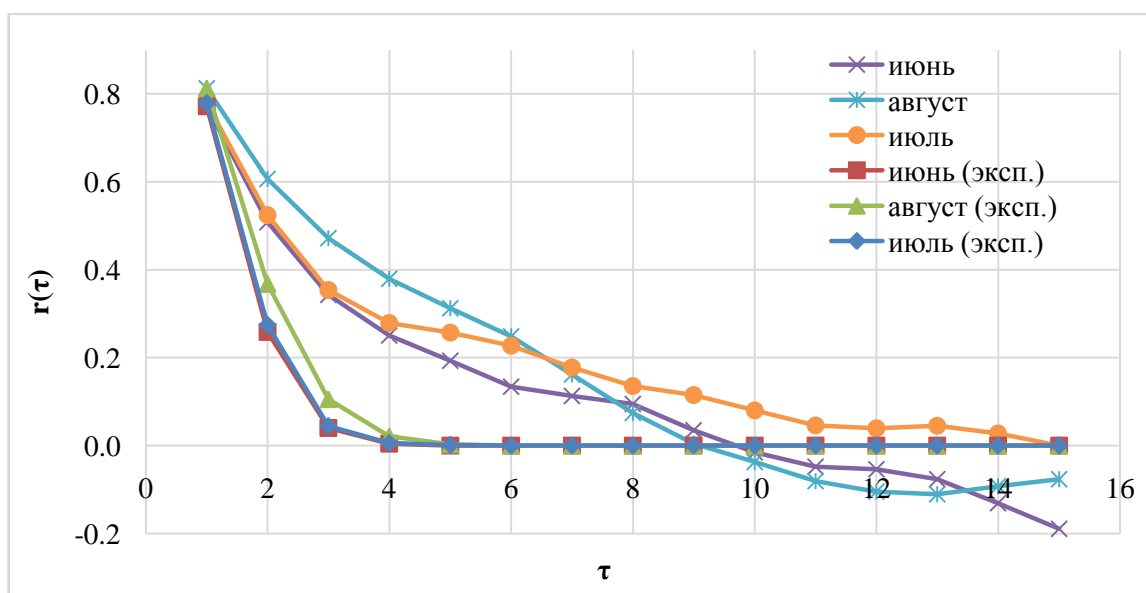


Рисунок 1.3.2 – Автокорреляционные функции эмпирические и теоретические (автокорреляционные функции цепи Маркова) среднесуточных значений температуры воздуха за летние месяцы (июнь, июль, август) на МС в г. Магнитогорске

Рисунки 1.3.1 и 1.3.2 показывают, что предположение о возможности представления рядов среднесуточных температур воздуха, как простой цепи Маркова не оправдалось. Автокорреляционные функции среднесуточных температур воздуха на обеих метеостанциях затухают гораздо медленнее, чем простая цепь Маркова.

Напомним, что простая цепь Маркова предполагает значимую связь только соседних элементов.

На рисунках 1.3.3.-1.3.4. представлены кривые распределения среднесуточной температуры воздуха в гг. Добрянка и Магнитогорск за все летние месяцы. Как показывает анализ этих рисунков, распределения рядов среднесуточной температуры воздуха в окрестности Добрянки и Магнитогорска за все летние месяцы в первом приближении можно описывать нормальным законом распределения.

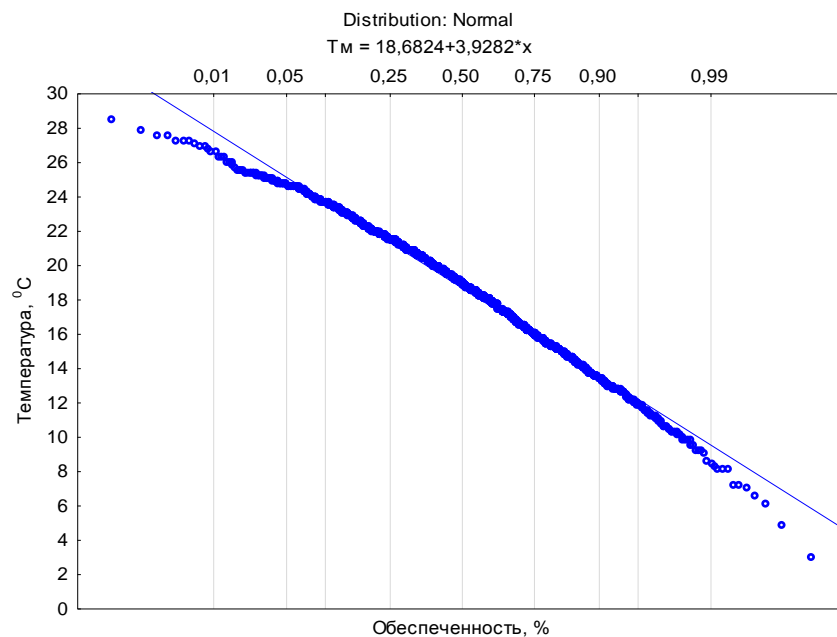


Рисунок 1.3.3. – Кривая распределения температуры воздуха в °С на высоте 2 м над поверхностью земли на метеостанции в г. Магнитогорске за июнь, июль, август (2005-2017 гг.)

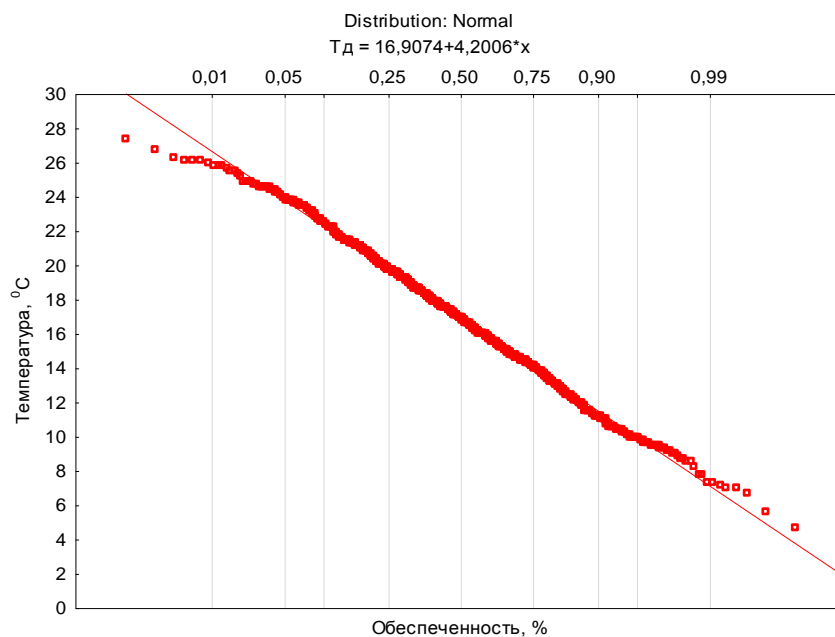


Рисунок 1.3.4. – Кривая распределения температуры воздуха в °C на высоте 2 м над поверхностью земли на метеостанции в г. Добрянке за июнь, июль, август (2008-2017 гг.)

### **Анализ ветрового режима**

Были рассчитаны статистические характеристики средних и максимальных скоростей ветра за июнь, июль, август на метеостанциях в г. Добрянке и г. Магнитогорске (таблицы 1.3.5, 1.3.6).

Таблица 1.3.5  
Статистические характеристики скорости ветра (м/сек) за июнь, июль и август на МС в г. Добрянке (по данным 2008-2017гг.)

Месяц	Объем выборки	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии
<b>Средняя скорость ветра</b>								
VI	268	1,74	1,57	0,25	4,5	0,78	0,45	0,90
VII	189	1,33	1,25	0,25	6,1	0,61	0,46	2,95
VIII	271	1,42	1,25	0,13	4,5	0,66	0,47	1,14
<b>Максимальная скорость ветра</b>								
VI	268	2,98	3	1	9	1,22	0,41	1,14
VII	189	2,37	2	1	8	0,87	0,37	1,99
VIII	271	2,44	2	1	9	1,04	0,43	1,56

Таблица 1.3.6

Статистические характеристики скорости ветра (м/сек) за июнь, июль и август на МС вг. Магнитогорске (по данным 2008-2017 гг.)

Месяц	Объем выборки	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии
<b>Средняя скорость ветра</b>								
VI	390	3,16	3	0,5	8,25	1,20	0,38	0,84
VII	403	3,12	2,88	0,38	9,75	1,27	0,41	1,00
VIII	402	2,85	2,63	0,38	9,63	1,32	0,46	1,44
<b>Максимальная скорость ветра</b>								
VI	390	5,50	5	2	12	1,85	0,34	0,74
VII	403	5,28	5	1	12	1,92	0,36	0,48
VIII	402	5,12	5	1	15	2,00	0,39	1,23

Данные таблиц 1.3.5 и 1.3.6 показали, что средние и максимальные скорости ветра в районе г. Магнитогорска существенно больше, чем в г. Добрянке, соответственно, выше среднеквадратическое отклонение. А коэффициенты вариации и асимметрии, наоборот - ниже.

Затем сформированные ряды наблюдений средних и максимальных скоростей ветра были проверены на однородность, проверялась однородность внутри каждого месяца между разными периодами наблюдений. Результаты проверки на однородность с использованием критерия Стьюдента скорости ветра между летними месяцами на обеих метеостанциях приведены в таблицах 1.3.7-1.3.8.

Таблица 1.3.7

Оценка однородности распределения скорости ветра с использованием критерия Стьюдента за июнь, июль и август на МС в г. Добрянке

Месяц	Среднее		Критерий Стьюдента, t-value	Вероятность, p	Объем выборки, N		Ср. отклонение	
	2013-2017 гг.	2008-2012 гг.			2013-2017 гг.	2008-2012 гг.	2013-2017 гг.	2008-2012 гг.
VI <sub>ср</sub>	1,64	1,82	-1,85	0,06	120	148	0,63	0,87
VII <sub>ср</sub>	1,33	1,32	0,056	0,95	102	87	0,69	0,49
VIII <sub>ср</sub>	1,27	1,52	-3,12	0,002	118	153	0,56	0,72
VI <sub>макс</sub>	2,89	3,05	-1,08	0,28	120	148	1,1	1,3
VII <sub>макс</sub>	2,38	2,36	0,203	0,84	102	87	0,98	0,75
VIII <sub>макс</sub>	2,21	2,608	-3,17	0,002	118	153	1,03	1,02

Таблица 1.3.8

Оценка однородности распределения скорости ветра с использованием критерия Стьюдента за июнь, июль и август на МС в г. Магнитогорске

Месяц	Среднее		Критерий Стьюдента, t-value	Вероятность, p	Объем выборки, N		Ср. отклонение	
	2013-2017 гг.	2008-2012 гг.			2013-2017 гг.	2008-2012 гг.	2013-2017 гг.	2008-2012 гг.
VI <sub>ср</sub>	2,94	3,34	-3,3	0,0009	180	210	1,1	1,2
VII <sub>ср</sub>	3,13	3,11	0,2	0,838	186	204	1,1	1,4
VIII <sub>ср</sub>	2,85	2,78	0,6	0,568	185	205	1,4	1,2
VI <sub>макс</sub>	5,1	5,9	-4,5	0,000008	180	210	1,7	1,9
VII <sub>макс</sub>	5,1	5,4	-1,4	0,164	186	204	1,7	2,1
VIII <sub>макс</sub>	5,01	5,14	-0,68	0,495	185	205	2,1	1,9

Проверка на однородность внутри каждого месяца между разными периодами наблюдений позволяет выявить климатические тренды. Таблицы 1.3.7 и 1.3.8 показывают разные результаты по метеостанциям. По г. Добрянка скорости ветра в июне, июле за десятилетие практически не изменились, в августе – стали меньше. По г. Магнитогорску, наоборот, в июне скорость ветра уменьшилась за последние 6 лет по сравнению с предыдущими 6-ю годами, а в июле и августе существенно не изменилась.

Также была рассчитана повторяемость направления ветра (румбы) на высоте 10-12 метров над земной поверхностью, осредненная за 10-минутный период, для обеих метеостанций: г. Магнитогорска за 2005-2017 гг. и г. Добрянка за 2008-2017 гг. Результаты представлены на рисунках 1.3.5–1.3.6.

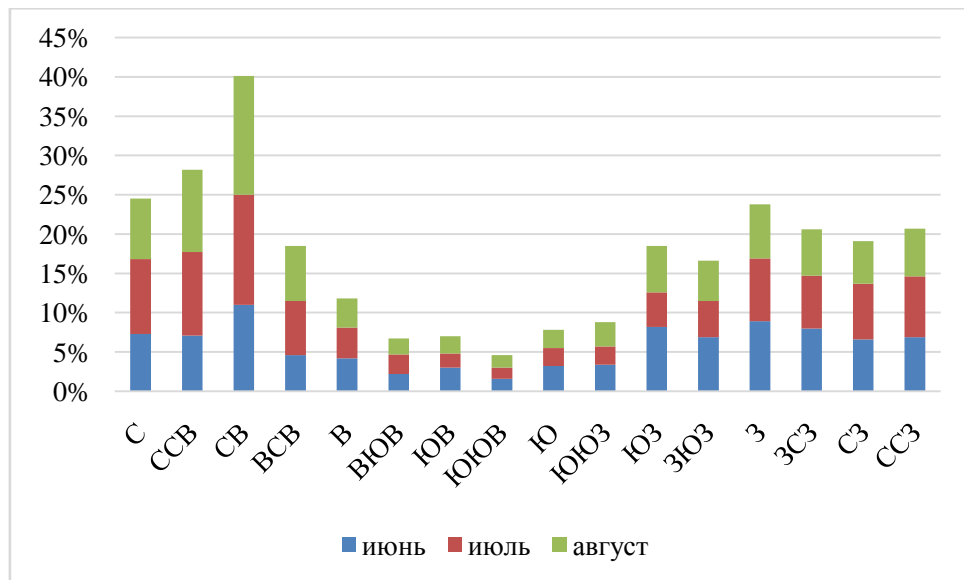


Рисунок 1.3.5. – Повторяемость направления ветра (румбы) на высоте 10-12 метров над земной поверхностью, осредненная за 10-минутный период, в г. Магнитогорске за 2005-2017 гг.

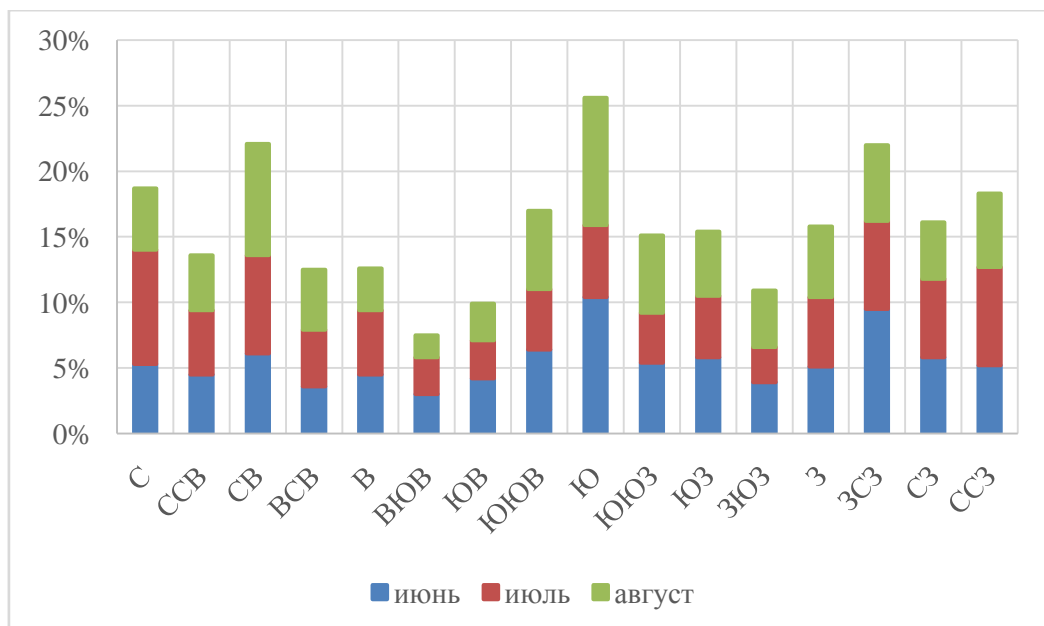


Рисунок 1.3.6 – Повторяемость направления ветра (румбы) на высоте 10-12 метров над земной поверхностью, осредненная за 10-минутный период, в г. Добрянке за 2008-2017 гг.

Анализ рисунков 1.3.5-1.3.6. показал, что в г. Магнитогорске наиболее часто дуют ветры северо-восточного направления (40%), гораздо реже – северо-северо-восточного и северного. Ветры южного направления дуют очень редко.

В окрестностях г. Добрянки, наоборот, чаще дуют ветры южного направления (26%), ненамного меньше (22%) западно-северо-западные и северо-восточные (22%). Вообще, по данным метеостанции г. Добрянка, направление ветра характеризуется более ровным распределением.

Эти же результаты подтверждают розы ветров, составленные по данным МС гг. Добрянка и Магнитогорск (рисунки 1.3.7-1.3.8.).

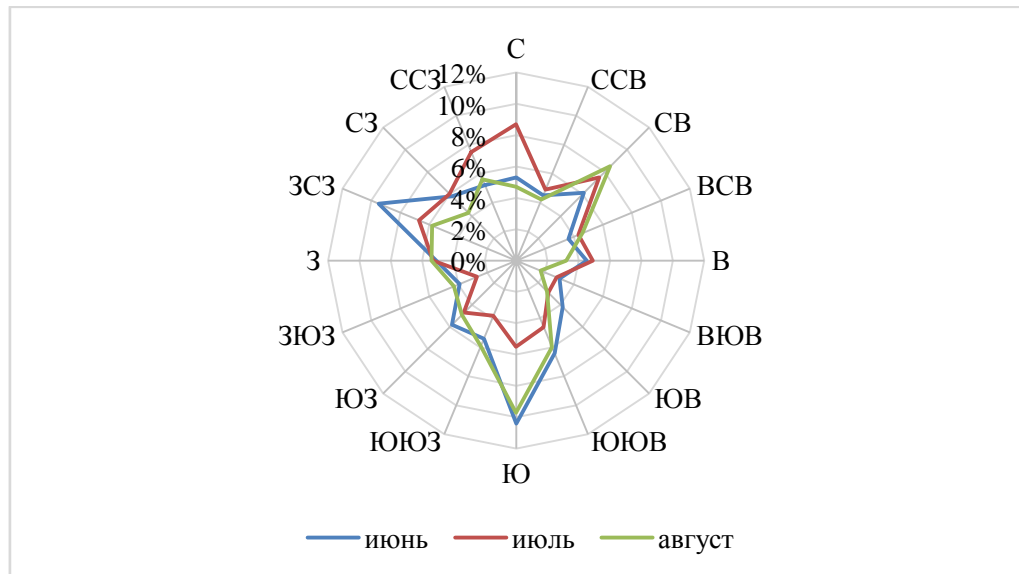


Рисунок 1.3.7. – Повторяемость направлений ветра на МС в г. Добрянке за июнь, июль, август (2008-2017 гг.)

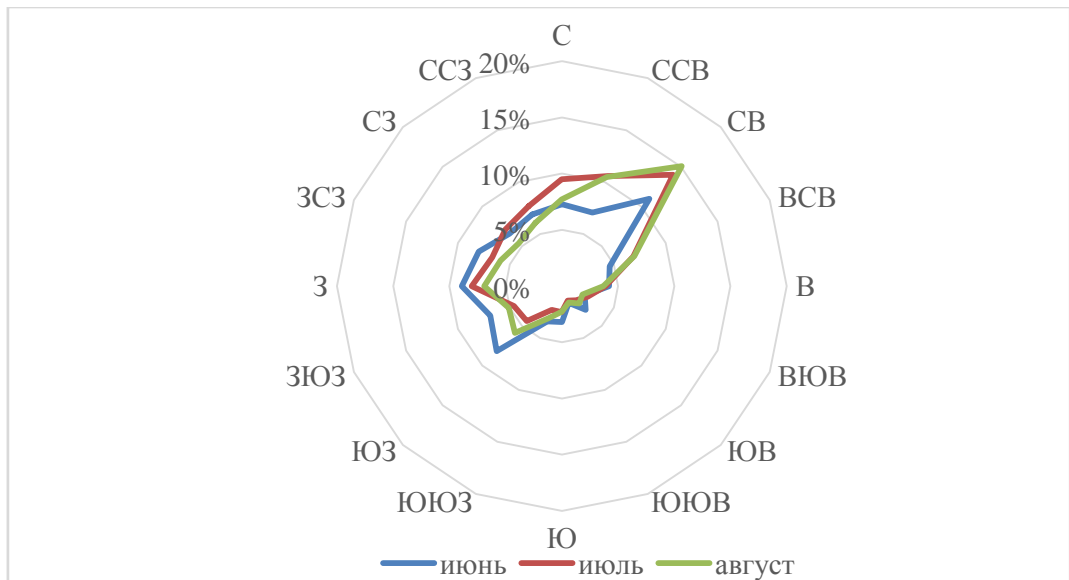


Рисунок 1.3.8. – Повторяемость направлений ветра на МС в г. Магнитогорске за июнь, июль, август 2005-2017 гг.



На рисунках 1.3.9 - 1.3.12. представлены кривые распределения средней и максимальной скорости ветра в гг. Магнитогорск и Добрянка. Анализ показывает, что распределения всех ветровых характеристик не подчиняются нормальному закону распределения.

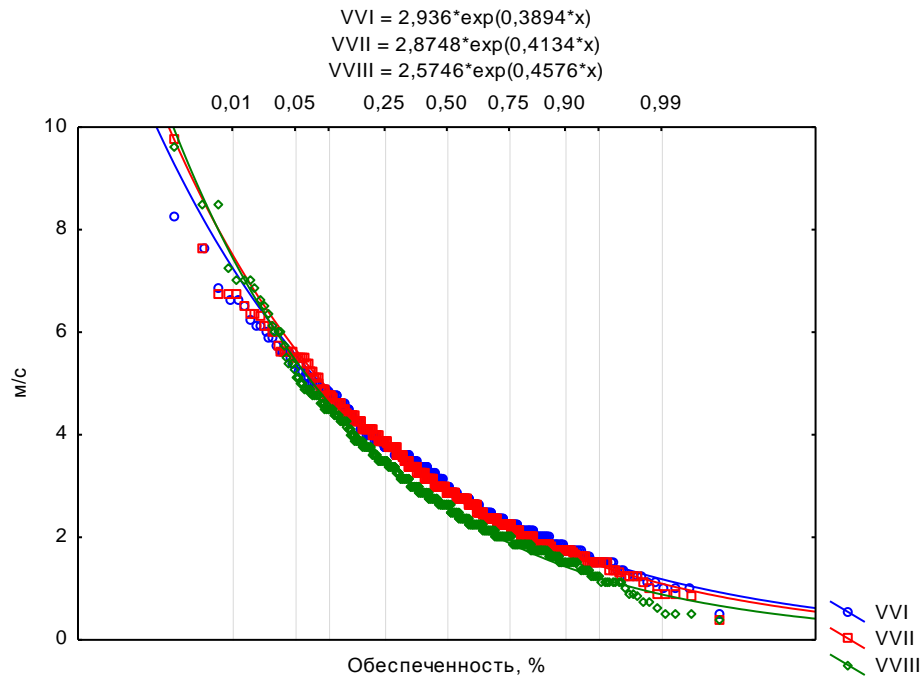


Рисунок 1.3.9 – Кривая распределения средней скорости ветра в г. Магнитогорске (2005-2017 гг.) за различные месяцы: июнь, июль, август

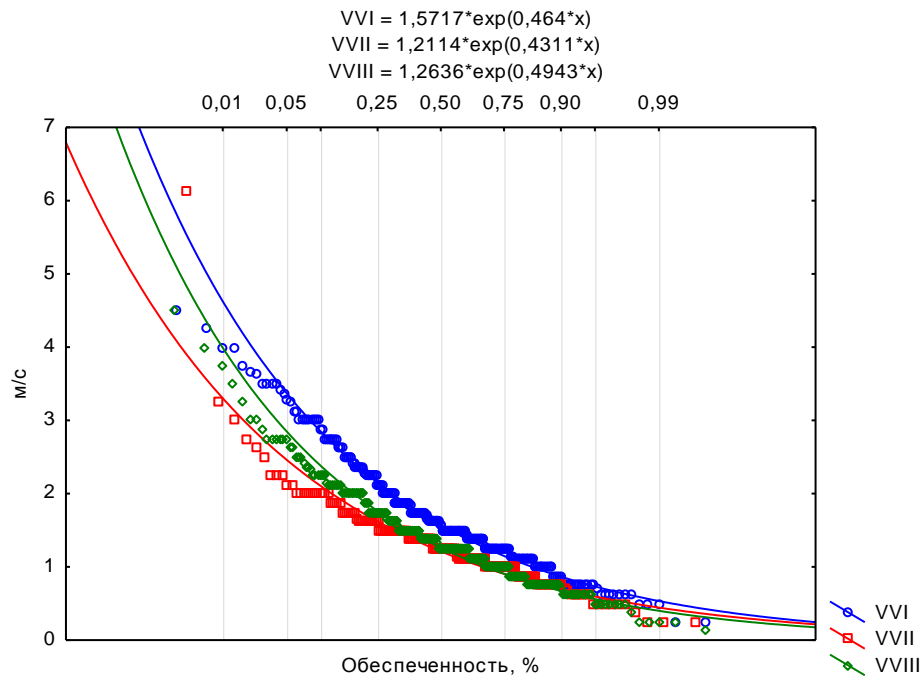


Рисунок 1.3.10 – Кривая распределения средней скорости ветра на метеостанции в г. Добрянке (2008-2017 гг.) за различные месяцы: июнь, июль, август

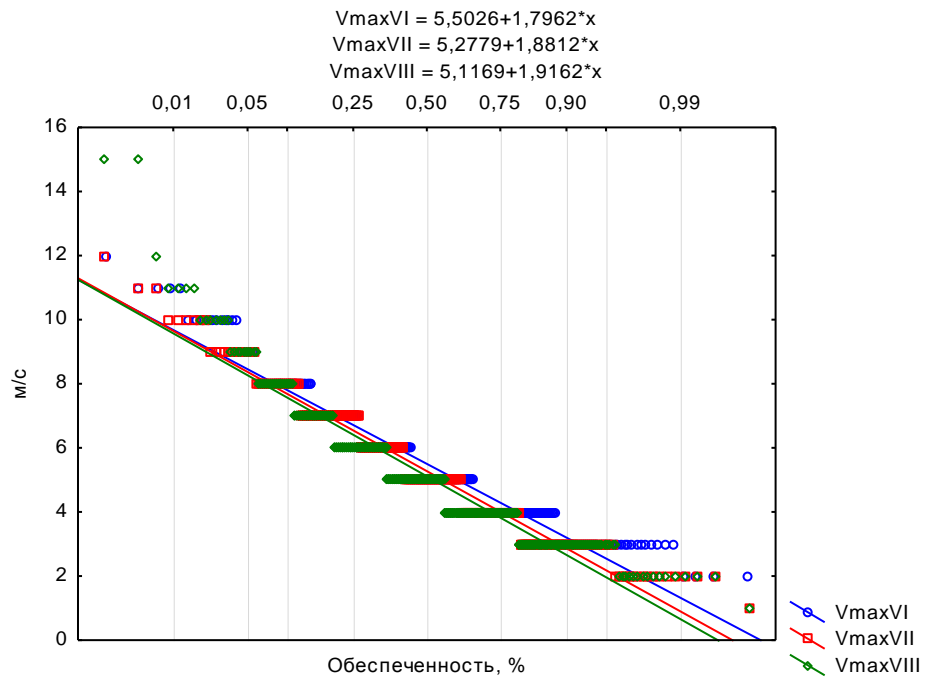


Рисунок 1.3.11 – Кривая распределения максимальной скорости ветра в г. Магнитогорске (2005-2017 гг.) за различные месяцы: июнь, июль, август

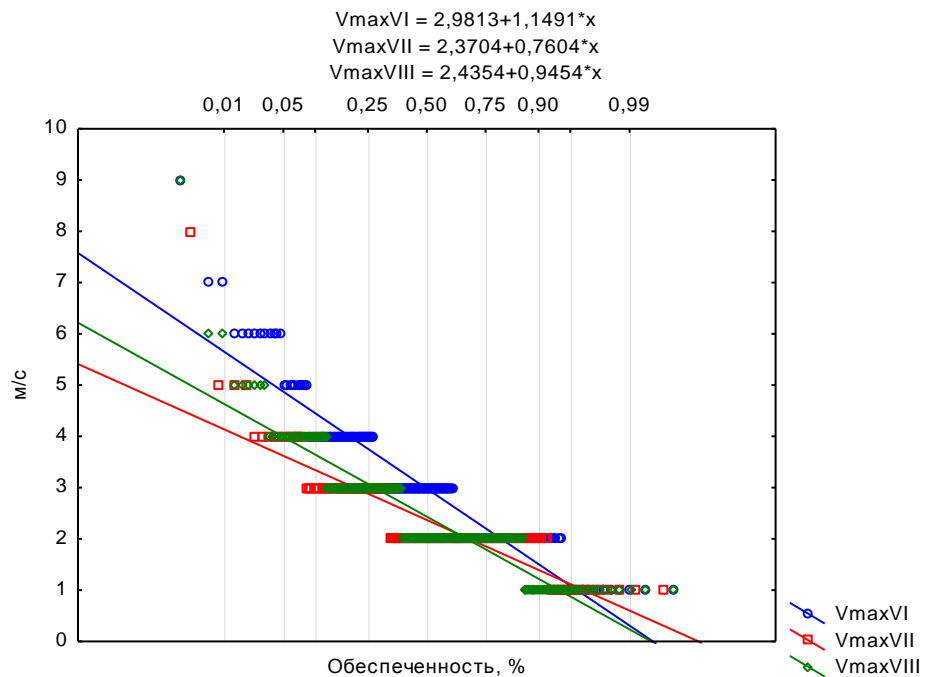


Рисунок 1.3.12 – Кривая распределения максимальной скорости ветра на метеостанции в г. Добрянке (2008-2017 гг.) за различные месяцы: июнь, июль, август

#### **1.4. Проблематика температурного воздействия Пермской ГРЭС на Камское водохранилище**

Камское водохранилище – первое в Камском каскаде, с напором 22 м. Площадь зеркала при нормальном подпорном уровне (НПУ = 108,5 м. абс.) составляет 1719 км<sup>2</sup>, общий объем 10,7 км<sup>3</sup>, полезный – 8,36 км<sup>3</sup>, средняя глубина – 6,2 м, максимальная – 28,1 м. [Отчет о НИР: Гидротермическое моделирование и тепловой расчет..., 2014] Это долинное водохранилище отличается большой изрезанностью береговой линии и наличием крупных заливов (рис. 1.4.1) [Дубровин и др., 1958].

Камское водохранилище представляет собой сравнительно узкий водоем, на большом своем протяжении вытянутый с севера на юг [Дубровин, 1959]. В его пределах выделяют два плеса: Камский и Сылвенско-Чусовской (рис. 1.4.1). Общая длина водохранилища по средней линии составляет 549,4 км, из них на Камский плес приходится 356,1 км, а на Сылвенско-Чусовской – 193,2 км.

Уровенный режим водохранилища имеет три четко выраженные фазы: весеннего наполнения, летне-осенней стабилизации и сработки водохранилища в зимний период. Летом уровень Камского водохранилища длительное время остается стабильным и плавно понижается к осени на 0,5-1,5 м. Зимнее понижение уровня обычно начинается со второй половины октября. Интенсивность спада уровня при зимней сработке – 4-5 см/сут. Предполоводная сработка Камского водохранилища производится до отметки 101,0 м. абс. [Матарзин и др., 1977].

Термический режим Камского водохранилища обусловлен тепловым балансом акватории и его изменением во времени, а также особенностями динамики водной массы. Приход и расход тепла осуществляется, главным образом, через водную поверхность и зависит от ее состояния. Распределение запаса тепла в водной массе, помимо климатических условий, определяется также своеобразием морфометрии ложа и гидродинамическими процессами [Матарзин и др., 1977].

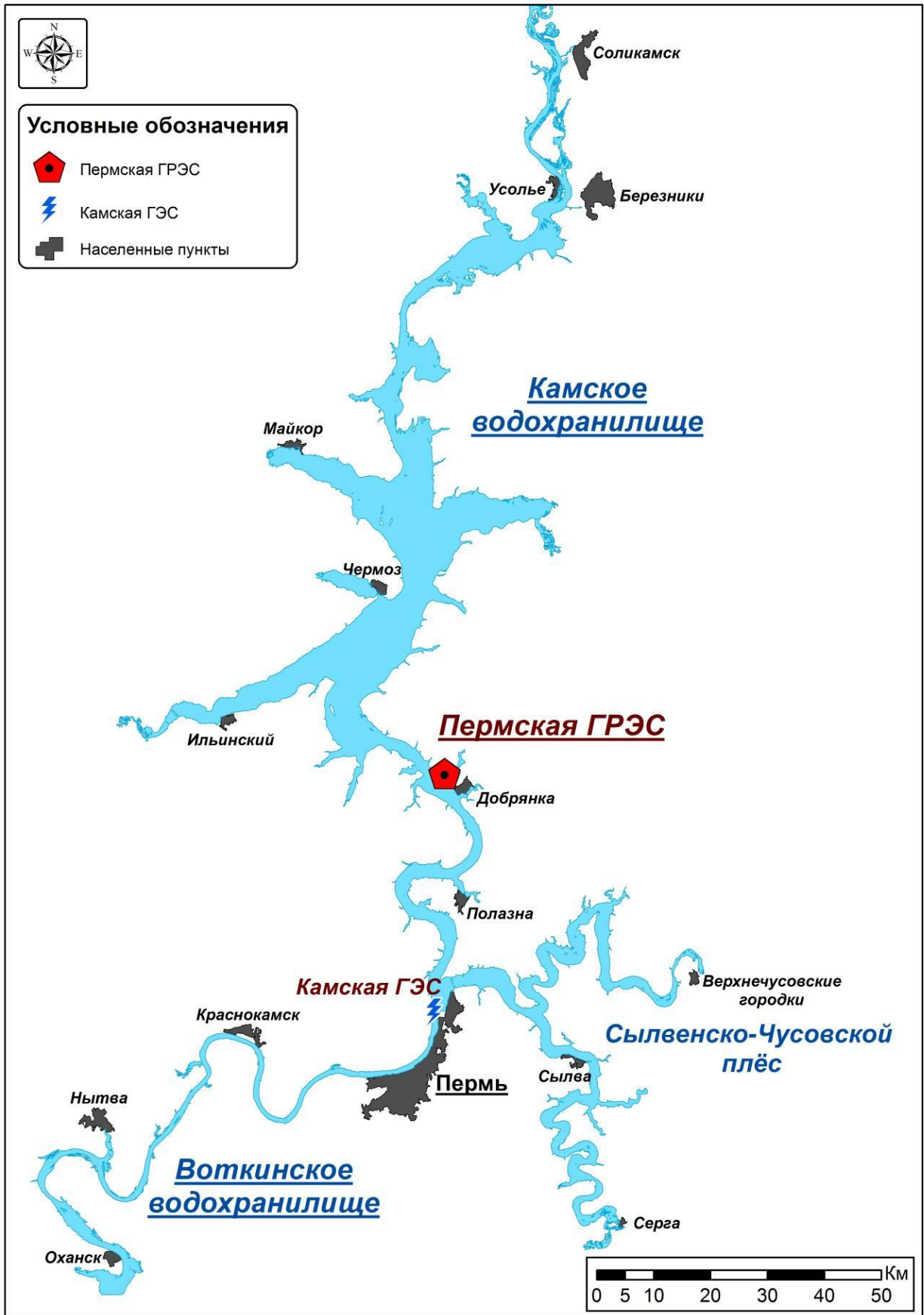


Рисунок 1.4.1. Общая схема Камского водохранилища и расположения Пермской ГРЭС

Гидрологическая весна на камских водохранилищах, начинается в апреле, после наступления минимума теплозапаса, с началом подледного прогрева воды и наполнения водохранилища, и заканчивается в мае с прекращением наполнения. Она характеризуется значительным подъемом уровня, увеличением площади и объема водохранилища, интенсивным прогревом вод и резко выраженной горизонтальной, а в конце сезона и вертикальной неоднородностью распределения температуры. Первоначальный нагрев происходит при обратной температурной стратификации. Затем происходит выравнивание температуры по глубине. Гомотермия хорошо выражена, но отмечаются существенные различия в температуре отдельных участков водохранилищ.

Гидрологическое лето начинается с окончанием весеннего наполнения водохранилища и интенсивного прогрева его вод и заканчивается моментом максимального теплозапаса и температуры. Уровни воды в течение лета более или менее стабильны или медленно понижаются, объем и площадь зеркала меняются незначительно. Для Камских водохранилищ характерна прямая стратификация в распределении температуры воды по глубине, которая сменяет весеннюю гомотермию в начальный период нагревания воды. Максимальных значений температура воды достигает в июле (26-28°C) в поверхностном слое. Слой температурного скачка четко выражен в штилевую погоду. Ветровое перемешивание способствует прогреву более глубоких слоев водной толщи. На мелководьях характерно прогревание всей толщи воды [Буторин, 1969].

Гидрологическая осень начинается с момента, когда тепловой баланс становится отрицательным. Для камских водохранилищ период интенсивного охлаждения водной массы начинается со второй половины августа и продолжается вплоть до образования ледостава. Ледообразовательным процессам предшествует постепенное охлаждение воды и явление осенней гомотермии. Более мелководные участки охлаждаются быстрее глубоководных, даже в случае, если общий объем водной массы мелководного участка больше.

Повышению температуры воды после ледостава способствуют отдача тепла ложем водохранилища, поступление грунтовых вод, имеющих более высокую температуру [Дубровин, 1958].

В течение гидрологической зимы происходит интенсивная сработка водохранилищ и увеличение водообмена. Для зимнего периода характерно понижение температуры воды на транзитных участках и повышение придонных температур в результате теплоотдачи дна на застойных зонах. В период ледостава на Камском водохранилище наблюдается сравнительно небольшая обратная стратификация (в пределах  $1^{\circ}\text{C}$ ) с наибольшими температурами у дна [Дубровин, 1958].

Регулирование стока Камской ГЭС определяется в соответствии с [Основные положения..., 1965]. Водные ресурсы Камского водохранилища используются для нужд энергетики, водного транспорта, лесосплава, рыбного хозяйства, сельского хозяйства, водоснабжения и рекреации, соблюдая приоритеты питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения населения, осуществляемого организациями, которые имеют лицензии на водопользование. Наиболее крупным водопользователем на Камском водохранилище является Пермская ГРЭС (АО «ИнтерРАО-Электрогенерация»).

Пермская ГРЭС расположена на левом берегу Камского водохранилища в 5 км выше г. Добрянки и в 58 км выше плотины Камской ГЭС. Забор воды осуществляется посредством подводящего канала из Камского водохранилища. Сброс производится через отводящий канал также в Камское водохранилище (рис. 1.4.2). Основным и резервным топливом служит природный газ Уренгойского и Ямбургского месторождений, поступающий на электростанцию по ответвлениям от магистральных газопроводов. Технический проект Пермской ГРЭС утверждён в 1978 г. (6 энергоблоков по 800 тыс. кВт каждый), после чего в период с 1986 по 1991 г. в эксплуатацию были введены три паросиловых энергоблока. В августе 2017 года в эксплуатацию введён энергоблок №4 на базе парогазовой установки ПГУ- 800.

Для охлаждения одного энергоблока максимально необходимо  $24 \text{ м}^3/\text{с}$  воды. Подача воды осуществляется соответствующим количеством насосов на насосной станции (рис. 1.4.2). Температура сбрасываемой воды по проектным данным не должна превышать фоновые значения на  $5-6 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В результате поверхностного сброса подогретых вод в объем более холодной воды происходит сложный гидротермический процесс двух разноплотностных жидкостей и, под действием целого ряда факторов, возникает плотностная стратификация, сопровождающаяся движением слоев воды с разной плотностью [Макаров, 1968].

Основные факторы, определяющие размеры зоны теплового влияния: температура и расход сбрасываемой воды, температура воздуха, скорость и направление ветра, регламент работы Камской ГЭС, обуславливающий режим скоростей течения на данном участке водохранилища, морфометрические особенности участка в районе сброса и забора воды и уровенный режим.

По морфометрическим особенностям участок, прилегающий к водозаборному и водосбросному каналам ГРЭС, представляет собой относительно мелководную зону со средними глубинами  $4-7 \text{ м}$ . Ширина водохранилища составляет  $\sim 4,0 \text{ км}$  (рис. 1.4.2). Старое русло Камы проходит у противоположного берега.

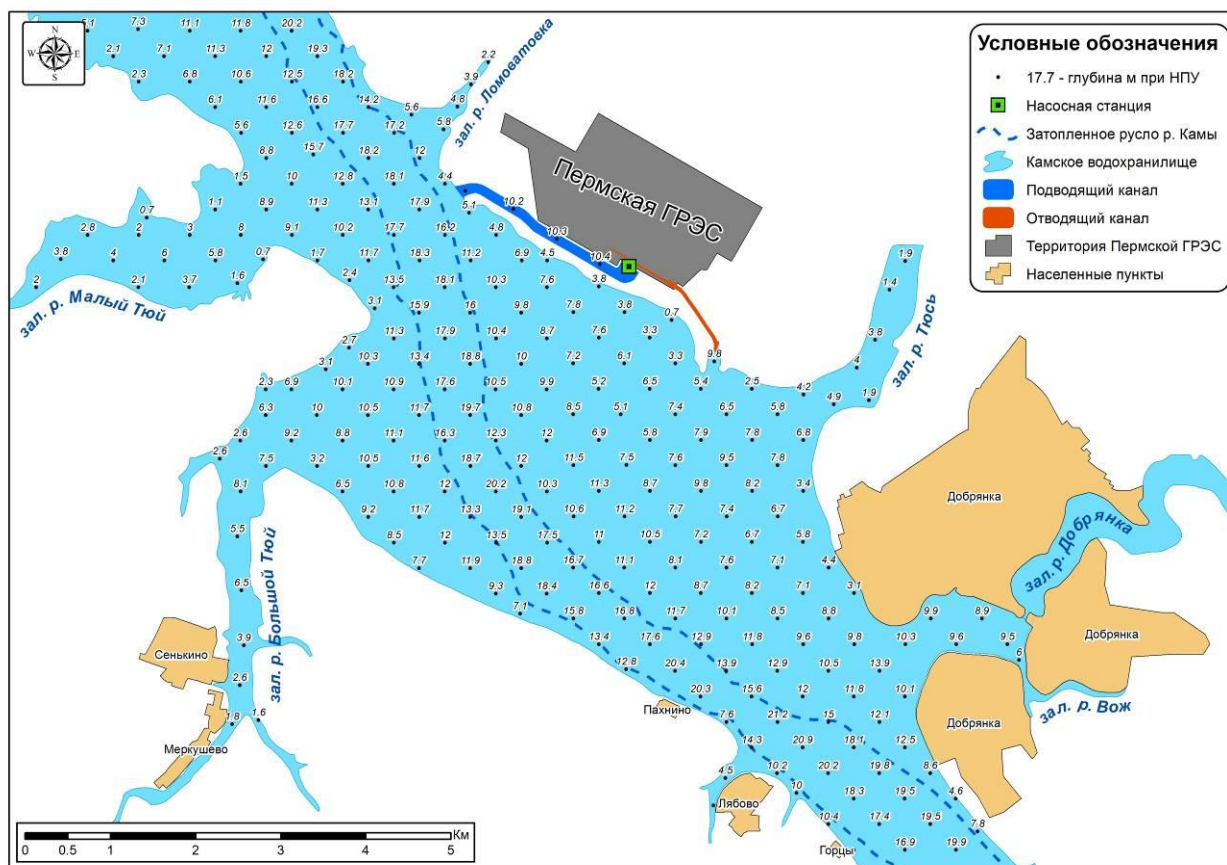


Рисунок 1.4.2. Схема участка Камского водохранилища в районе Пермской ГРЭС

Исходя из особенностей хозяйственного использования центральной части Камского водохранилища, где располагается Пермская ГРЭС (рис. 1.4.2) основными лимитирующими водопользователями, являются рыбное хозяйство и сама Пермская ГРЭС, которые и формируют, в первую очередь, требования к качеству воды.

Исходя из действующих рыбохозяйственных и санитарно-гигиенических нормативов, в данной работе необходимо было оценить максимальные зоны возможного повышения температуры воды в наиболее жаркий период. Проведенные расчеты должны позволить определить площадь повышения температуры воды (на 3 °С) по акватории Камского водохранилища с целью оценки изменения влияния при строительстве нового энергоблока ПГУ-800. На основе модельных оценок проводился расчет ущерба водно-биологическим ресурсам и определялась экономическая целесообразность реализации проекта



оборотной системы охлаждения 4-го энергоблока посредством строительства градирни.

Кроме этого, при оценке температурного воздействия сбросов Пермской ГРЭС важно было учесть влияние на значительные зоны рекреации, расположенные к югу от станции в г. Добрянка (рис. 1.4.2).

В то же время существенное значение представляет оценка возможности и масштабов попадания сбрасываемых термальных стоков в подводящий канал. Поэтому наряду с проведением модельных расчетов при северном направлении ветра также необходимо проведение таких расчетов при южном ветре, когда наиболее велика вероятность попадания сбрасываемых стоков в подводящий канал. Так как процессы формирования зон теплового загрязнения в водохранилище весьма инертны, расчеты должны проводиться при ветре, который характеризуется значительной повторяемостью и продолжительностью.

После проведения соответствующих верификационных расчетов и адаптации моделей необходимо было разработать соответствующие расчетные (модельные) сценарии. Данные сценарии должны учитывать как опыт и перспективы эксплуатации Пермской ГРЭС, так и изменчивость метеоэлементов за многолетний период, отражать результаты воздействия как при наиболее неблагоприятных условиях, так и при "штатном" режиме работы. В целом все сценарии были ориентированы на оценку максимальной зоны теплового воздействия.

Разработанные сценарии были согласованы Фондом "Энергия без границ" (письмо ФЭ/ВМ/509 от 06.10.2014).

Все расчеты были выполнены при отметке НПУ Камского водохранилища в 108,5 м абс., при характерных расходах сброса через плотину Камской ГЭС  $\sim 850 \text{ м}^3/\text{сек.}$ , с учетом притока воды по наиболее крупным притокам р. Сылве и р. Чусовой.

## **1.5. Проблематика температурного воздействия ПАО «ММК» на Магнитогорское водохранилище**

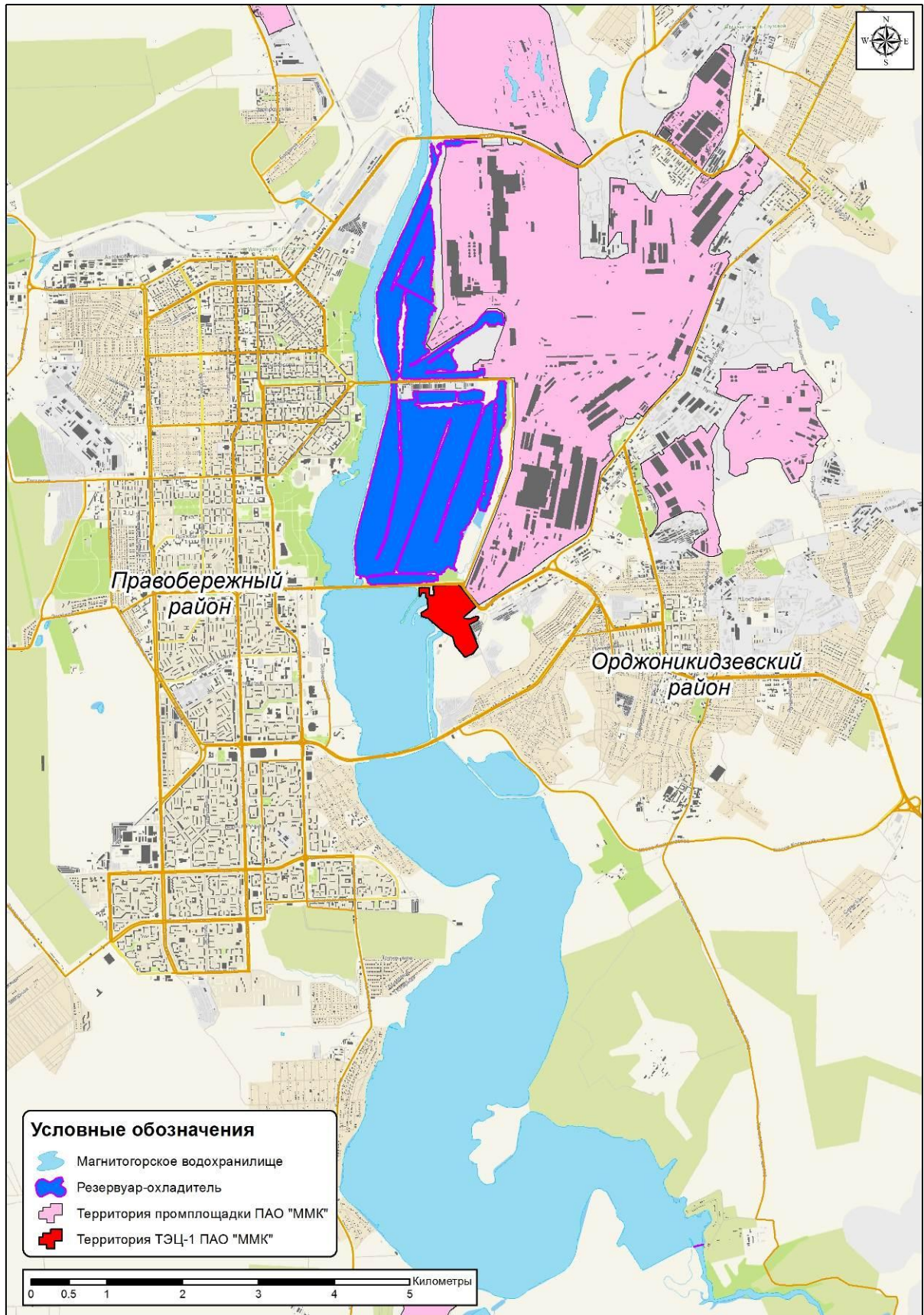
Магнитогорское водохранилище на реке Урал (пруд-охладитель) введено в эксплуатацию в 1939 г. по проекту института «Водоканалпроект», г. Москва. Водохранилище руслового типа, вид регулирования – сезонное. Площадь зеркала – 21,1 км<sup>2</sup>, объем при НПУ ~ 148 млн. м<sup>3</sup>, средняя глубина ~ 7 м [Отчет о НИР: Разработка и обоснование схем движения водных потоков..., 2013].

В связи со значительным ростом водопотребления для надежного обеспечения водой ПАО «ММК», предприятий г. Магнитогорска и орошения сельскохозяйственных земель в 1966 г. было построено Верхне-Уральское водохранилище на реке Урал. Верхне-Уральское водохранилище расположено на территориях Верхнеуральского района. Водохранилище руслового типа, осуществляет многолетнее регулирование стока [Отчет: ТЭО водоснабжения Свердловской, Челябинской..., 1983].

Верхне-Уральское и Магнитогорское водохранилища осуществляют регулирование стока р. Урал. Суммарная полезная водоотдача водохранилищ составляет 5,7 м<sup>3</sup>/с или 180 млн.м<sup>3</sup>/год [Проект правил использования водных ресурсов..., 2013].

В 1971-1972 годах на Магнитогорском водохранилище (пруд-охладитель) были построены разделительная и струенаправляющие дамбы, образовавшие оборотную часть Магнитогорского водохранилища (рисунок 1.5.1).

Производственное водоснабжение основной промышленной площадки ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» осуществляется по оборотной схеме через оборотную часть Магнитогорского водохранилища и локальные оборотные циклы, с повторно-последовательным использованием воды (рисунок 1.5.2).



*Рисунок 1.5.1. Общая схема Магнитогорского водохранилища и производственной площадки ПАО «ММК»*

Оборотная часть образована системой разделительных и струенаправляющих дамб с маслоулавливающими и барботажными установками. Схема оборотного водоснабжения через оборотную часть Магнитогорского водохранилища выполнена таким образом, что сточные воды после охлаждения оборудования и продувочные воды с локальных очистных сооружений поступают в общекомбинатские отстойники (левобережный отстойник промливневых стоков и отстойник в устье Северного канала), где проходят дополнительную очистку от взвешенных веществ и нефтепродуктов. После отстойников вода поступает в "отсеки" между струенаправляющими дамбами оборотной части, охлаждается, очищается в созданных "природных условиях" и вновь поступает на водозаборные сооружения. Общая длина пути прохождения воды от сброса в общекомбинатские отстойники до водозаборных сооружений составляет ~ 15-16 км.

Подпиткой оборотной системы водоснабжения через оборотную часть Магнитогорского водохранилища являются:

- сточные воды, поступающие в оборотную часть Магнитогорского водохранилища, после использования забираемой воды из Магнитогорского водохранилища насосными станциями I-го подъема №№ 16, 16а (сточные воды после охлаждения технологического оборудования кислородного цеха (кислородной станции № 4) и ТЭЦ (северный сброс в летний период);

- речная вода, поступающая в оборотную часть Магнитогорского водохранилища через северный регулирующей водомерный лоток в период паводка (в меженный период лоток закрыт).

Подпитка идет на покрытие безвозвратных потерь на промышленной площадке: потери в производстве, подпитка локальных оборотных циклов (испарение с поверхности очистных сооружений, капле- и ветроунос с градирен) [Отчет о НИР: Разработка и обоснование схем движения водных потоков..., 2013].

Дебалансовые сточные воды из оборотной части Магнитогорского водохранилища сбрасываются через южный водомерный лоток у Южного

перехода (моста) в Магнитогорское водохранилище (выпуск № 1) и подаются на повторно-последовательное использование ПАО «ММК» насосными станциями №№ 16, 16а (рисунок 1.5.2).

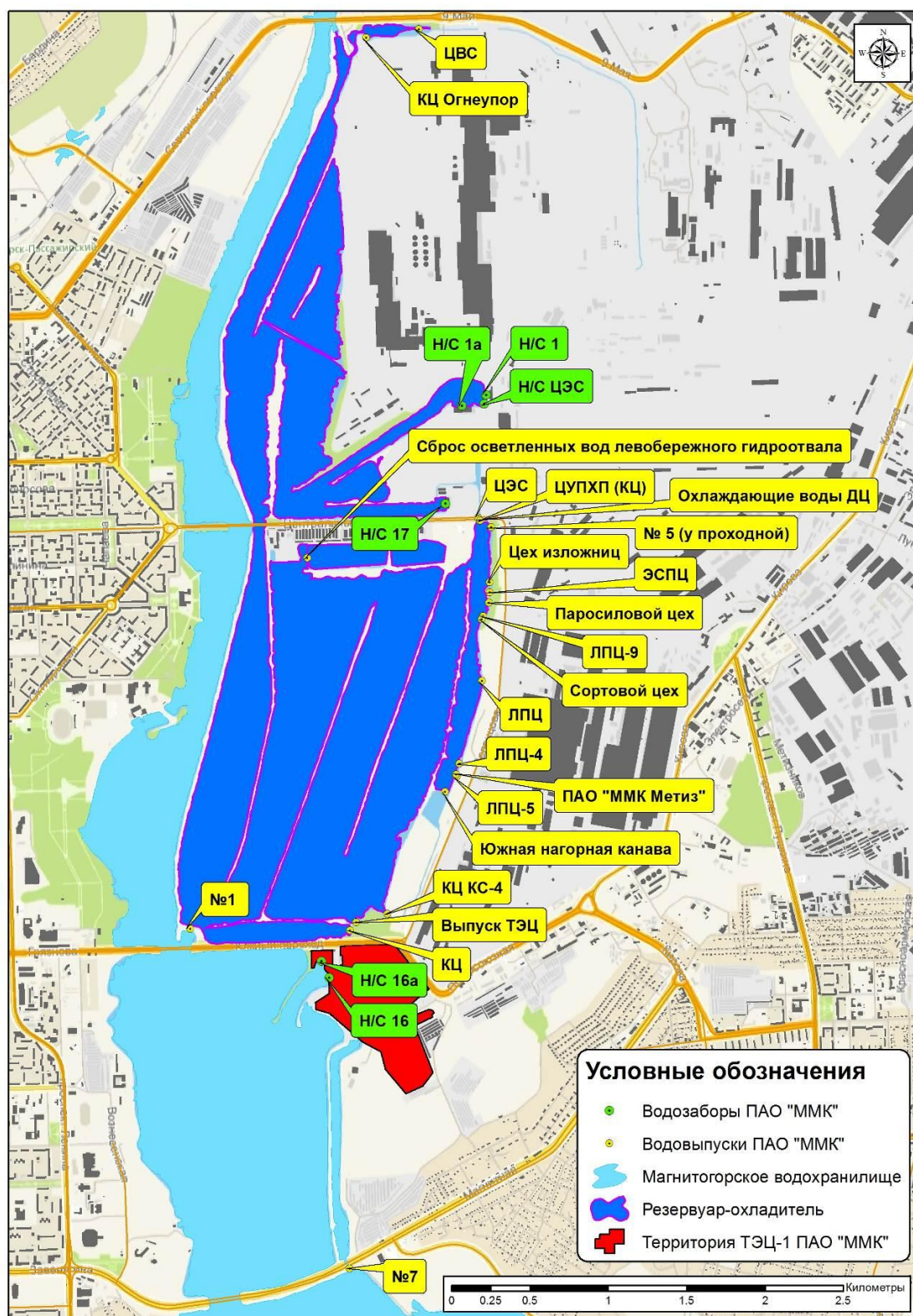


Рисунок 1.5.2. Общая схема существующей системы водопользования ПАО «ММК» и его структурных подразделений

В настоящее время перед ПАО «ММК» весьма остро стоит задача повышения эффективности технологических схем охлаждения сточных вод при их отведении в Магнитогорское водохранилище. Результаты проводимых модельных расчетов, по предлагаемой комбинированной схеме, легли в основу для оценки эффективности проектных решений по расширению существующего резервуара-охладителя и переходу на обратную систему использования воды. Реализация данного проекта подразумевает объединение в единую обратную систему 22-хвостовых выпусков и 6 водозаборов ПАО «ММК» и его структурных подразделений.

Одним из наиболее эффективных подходов к повышению эффективности работы крупных прудов-охладителей является оптимизация размещения струенаправляющих и струераспределительных сооружений. В то же время отработка эффективных схем размещения этих дамб возможна только на основе многовариантных модельных исследований, так как физическое моделирование с использованием модельных водоемов в ее корректной постановке весьма трудоемко [Отчет о НИР: Разработка и обоснование схем движения водных потоков..., 2013].

## **ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О СОСТОЯНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КРУПНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Адекватность оценок влияния промышленных комплексов на поверхностные водные объекты, посредством моделей этих явлений, в значительной мере зависит от полноты и достоверности задаваемой исходной информации. В особенности это относится к задачам, решаемым в 2D- и 3D-постановках.

Так, при объективной оценке влияния объектов теплоэнергетики на водоемы-охладители, а также разработке соответствующих моделей в качестве исходных данных принимаются, как правило, следующие характеристики:

### ***гидрометеорологические:***

- морфометрия и границы рассматриваемого водного объекта (участок) в виде цифровой модели рельефа (ЦМР);
- параметры и характеристики стока воды в водохранилище (расход сбросов в м<sup>3</sup>/сек, температура воды с внутригодовой и внутримесячной изменчивостью);
- климатические характеристики территории размещения ТЭС, включающие температуру воздуха, направления и скорость ветра;
- боковая приточность на участке.

### ***технологические:***

- морфометрические характеристики подводящего и отводящего каналов ТЭС;
- расход сброса и температурные характеристики отводимых стоков.

Наибольшие сложности при решении задач температурного воздействия связаны с корректным заданием исходной гидрологической и метеорологической информации. В последние годы наблюдается бурное развитие средств измерений, а, соответственно, меняются технология (методология) получения и обработки информации. Ниже будут рассмотрены

существующие непосредственно примененные при исследованиях методы и оборудование. Следует отметить, что в процессе натурных исследований для решения задач оценки температурного воздействия, необходимо искать оптимальное сочетание между точностью, скоростью и детальностью получаемых исходных характеристик.

Для разработки сценариев расчетов и учета боковой приточности проводилась необходимая статистическая обработка рядов гидрологических данных, использовались материалы [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1973; Многолетние данные о режиме.... 1988], а также проводились измерения расходов воды на боковых притоках в период полевых изысканий.

## **2.1. Получение морфометрических характеристик участков водохранилищ**

Данный вид натурных исследований является наиболее сложным и трудоемким. Необходимость данных исследований обусловлена рядом решаемых в последующем задач.

Изучение особенностей рельефа дна водных объектов и составление топографических планов происходит на основе выполнения комплекса инженерно-гидрографических (промерных) работ. Основным руководящим документом в этой области, в настоящее время, является свод правил «Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Часть III. Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства» [СП 11-104-97, 2004]. Настоящий свод правил, в том числе, устанавливает состав, объем, методы и технологию производства изыскательских работ для обоснования и проектной проработки строительства.

В гидроэнергетике, нефтегазовой и других отраслях экономики дополнительно существуют отдельные стандарты (СТО) и руководящие документы (РУ) при исследованиях соответствующих объектов. Как правило, они ориентированы на обследование уже существующих объектов и их безопасную эксплуатацию.



В современных условиях при исследовании рельефа дна водных объектов наиболее распространенным является использование комплекса на основе профессионального однолучевого эхолота и двухчастотной GPS-ГЛОНАСС системы позиционирования. Применение данного сочетания приборов, при соблюдении методики и использовании специализированного программного обеспечения, позволяет достаточно оперативно получать данные о распределении глубин с точностью в несколько сантиметров по глубине и несколько дециметров в плане. Такая точность, как показывает многолетний опыт, является достаточной для объективной оценки влияния крупных энергетических комплексов на водные объекты и построения соответствующих моделей.

Использование современных многолучевых эхолотов, безусловно, позволяет получать более детальные результаты и отображать микрорельеф водоемов и водотоков. Но применение данных приборов не только является на порядок более затратным во временном и в экономическом отношении, но и излишним в плане подробности. Современные гидродинамические (гидротермические) модели и точность их расчетов на данном этапе не позволяют учитывать микрорельеф водных объектов.

Натурное обследование и изыскания на Камском водохранилище проводились на участке протяженностью 16 км. Начало участка располагалось в 3 км выше подводящего канала, окончание участка - в 10 км ниже "устья" отводящего канала.

Для выполнения батиметрических съемок создавалось планово-высотное геодезическое обоснование. В пределах водохранилища на местности закреплялись временные опорные геодезические знаки. Расположение их выбиралось таким образом, чтобы при непосредственных изысканиях обеспечивалась уверенная связь между «базой» и «ровером» по радиоканалу. Кроме этого, с использованием данного обоснования определялось положение уреза в момент промеров, а также уклоны водной поверхности по всей длине участка исследования.

Промер глубин осуществлялся с помощью профессионального промерного комплекса, в состав которого входили: однолучевой эхолот S/C Hydrobox Echosounder, комплект GPS-ГЛОНАСС приемников Topcon GR-5, защищенный ноутбук Panasonic и ПО для гидрографических съемок AquaScanOffice GG+. В качестве плавсредства использовалась надувная лодка StingrayMA-420/OAL с жестким дном, грузоподъемностью 1200 кг. На транец устанавливался движитель Tohatsu MFS 30 (рисунок 2.1.1). Отметим, что данный вариант является наиболее оптимальным, ввиду особенностей рельефа и распределения глубин.



*Рисунок. 2.1.1. Используемое при гидрографической съемке оборудование*

Съемки были произведены на левобережной мелководной части, подводящем и отводящем канале Пермской ГРЭС, ковше водозабора, в заливах рр. Тюсь, Ломоватовка, Добрянка. Съемка была выполнена в июле 2014 года по требованиям для масштаба 1:10000. Погрешность определения глубины не

превышала 0,05 м. Среднее расстояние между промерными точками составило не более 3 м. Площадь съемки ~ 5,5 км<sup>2</sup>. Массив измерений – более 20 000 точек.

На русловую (центральную) часть водохранилища и заливы правобережных притоков у ФБУ «Камводпуть» были приобретены результаты промеров 2009-2010 годов.

Последующее совмещение съемок и обработка была проведена с помощью ГИС-пакета «ArcGIS 9.2» по отработанной технологии [Ляхин и др., 2009]. В качестве подложки использовались космические снимки высокого разрешения.

Полученная цифровая модель рельефа (ЦМР) дна водохранилища и его частей при НПУ (108,5 м абс.) на Камском гидроузле была использована в качестве основы при создании комплексных расчетных моделей (рисунок 2.1.2).

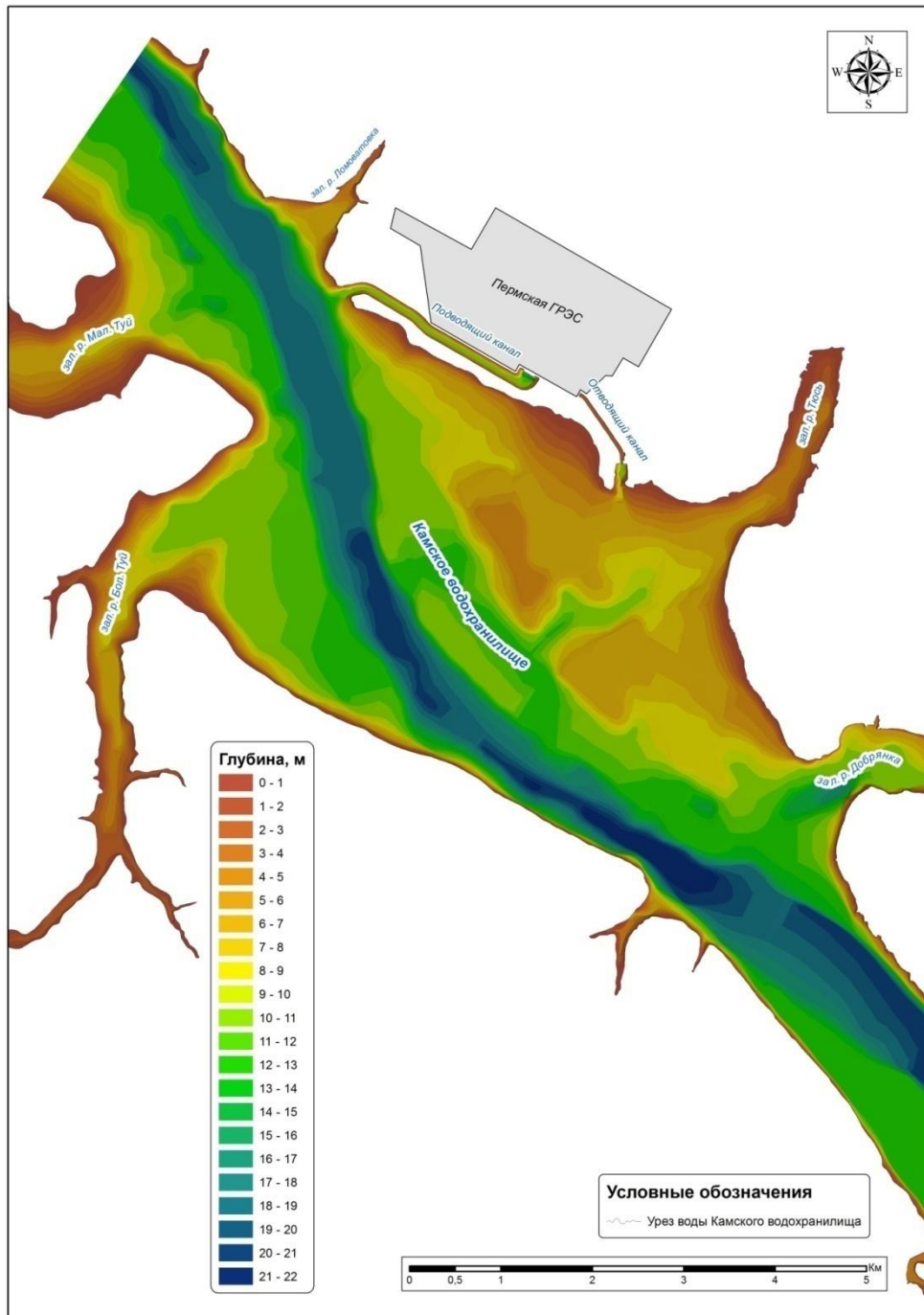
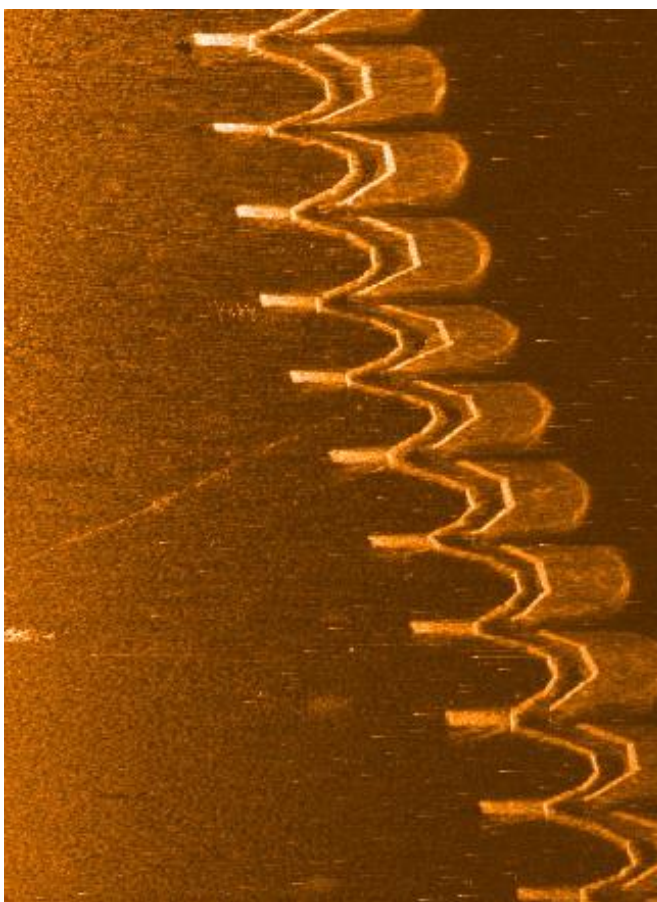


Рисунок. 2.1.2. Картограмма распределения глубин Камского водохранилища в районе Пермской ГРЭС при НПУ (108,5 м абс)

На Магнитогорском водохранилище промерные работы были выполнены аналогично приведенной выше методологии, в 2013 году по всей акватории Магнитогорского водохранилища (21,1 км<sup>2</sup>, более 100 000 измерений глубины) по требованиям для масштаба 1:10 000. На участке водопользования ПАО «ММК», на стадии инженерно-гидрометеорологических изысканий, в 2015 году проведено уточнение в масштабе 1:2000 и 1:1000.

В связи с тем, что дальнейшая реализация проекта подразумевала выполнение работ на акватории Магнитогорского водохранилища между «Южным переходом» и «Казачьей переправой», необходимо было выполнить гидроакустическую съемку с целью определения состояния дна (мусор, затопленные сооружения и др.). Использование гидролокатора бокового обзора (ГБО) «Гидра Н4М7-МSS» позволило обнаружить и оценить фактическое состояние затопленной плотины в 350-и м выше «Казачьей переправы» (рисунок. 2.1.3).



*Рисунок 2.1.3. Гидроакустическое изображение затопленной плотины*

Наличие данного объекта, впоследствии, имело принципиальное значение при формировании проектных решений.

В настоящее время, весьма перспективными современными средствами, в том числе при исследовании береговой зоны водного объекта, являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Общие подходы к оценке современных контуров водных объектов с использованием малых БПЛА были

подробно изложены в [Лучников и др., 2018]. В данном случае рассматривалась комплексная схема использования специализированных «полетных» программ, современных ГИС-пакетов, прогрессивных двухчастотных GPS-ГЛОНАСС приемников и непосредственно самого комплекса БПЛА. Результатом полевых исследований и дальнейшей их обработки могут являться качественные и актуальные ортофотопланы «сантиметрового» разрешения, цифровые модели рельефа (ЦМР) или цифровые модели местности (ЦММ). Совмещение двух ЦМР (дна водного объекта и береговой зоны) позволяет получать основу, при необходимости, для оперативного проведения модельных расчетов, при существенно изменяющемся уровне в водоеме-охладителе.

## **2.2. Исследование температурных полей водохранилищ**

Основным экологическим параметром, регламентирующим работу тепловых станций, является температура воды в используемых водоемах-охладителях. При этом, для адекватной оценки воздействия и выполнения необходимых модельных расчетов, необходима детальная информация о распределении температуры не только по акватории, но и по глубине водоема. Учитывая тот факт, что в данной работе рассматриваются достаточно крупные ТЭС, которые имеют площадь температурного воздействия в несколько квадратных километров, то исследования температурных полей водохранилища должны были проводиться на достаточно большой акватории. Кроме этого, необходимо было учитывать инерционность процесса отведения подогретых стоков, изменение гидрологических и метеорологических параметров, а также технологические особенности работы станций. Отмеченные особенности определяли необходимость выполнения измерений в сжатые сроки с использованием современных термометров с погружаемым датчиком и высокой дискретностью определения температуры воды.

Существующие методические указания по наблюдению за термическим режимом на гидрометеорологической сети рек, водохранилищ, береговых морских станций [Методические указания..., 1993; Наставления

гидрометеорологическим станциям и постам, 1978, 2017 и др.] рекомендуют использовать термометры ТМ-10 в оправе ОТ-51 с занесением результатов в книжку КГМ-1. Различные аспекты и методы подобных измерений были затронуты в работах Базинской Е.Г. (1967), Коколии Т.Г. (1971), Лапшина Г.Н. (1967). Использование такой технологии не позволяет произвести комплекс необходимых измерений температуры воды в сжатые сроки. Поэтому, измерение температуры осуществлялось нами по заранее разработанной программе, с помощью специализированного полевого кондуктометра с датчиком температуры WTW ProfiLineCond 1970i с кабелем 25 м. Точность измерения температуры – 0,1 °С, дискретность – 1 сек.

Программа производства работ на Камском водохранилище предусматривала проведение соответствующих измерений в 16 створах, более чем на 100 вертикалях с сечением по глубине через 1 м (рисунок 2.2.1.).

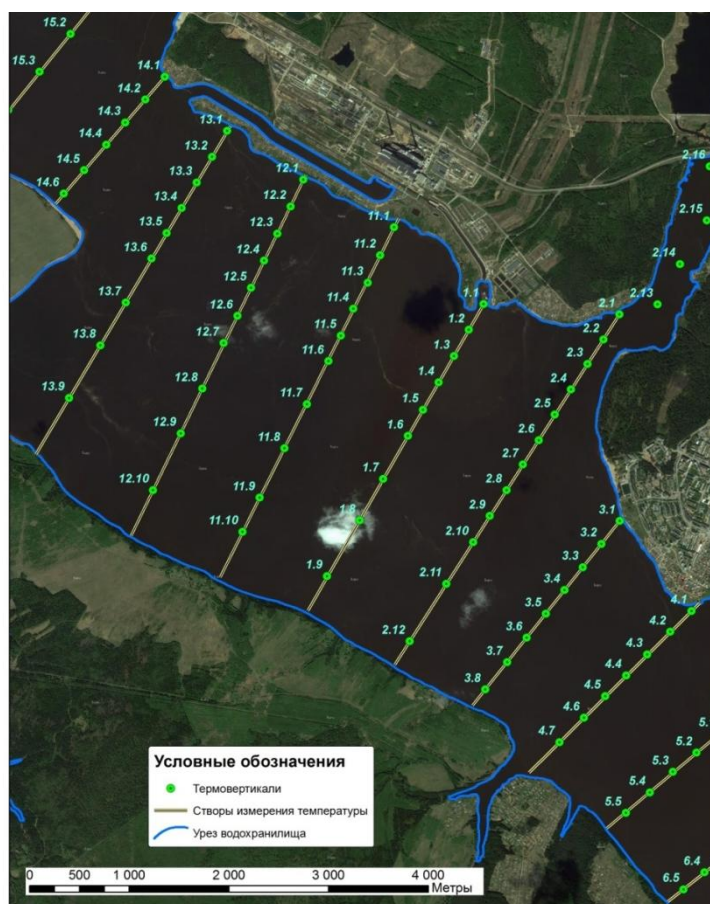


Рисунок 2.2.1. Схема расположения створов и вертикалей на Камском водохранилище для измерения температуры воды

Данный вид работ проводился в период с 17 по 23 июля 2014 года. За этот период было измерено более 5500 значений температуры. После обработки достаточно большого массива данных за каждый из дней было получено распределение температуры по акватории и по глубине водохранилища в районе водопользования Пермской ГРЭС при конкретных метеоусловиях (рисунок 2.2.2-2.2.3). Работа проводилась с 2-х плавсредств для максимально быстрой "срезки" ситуации на всем участке.

Полученные в результате натурного обследования данные по распределению температуры, впоследствии, легли в основу верификационных расчетов гидротермических моделей в 3D-постановке.



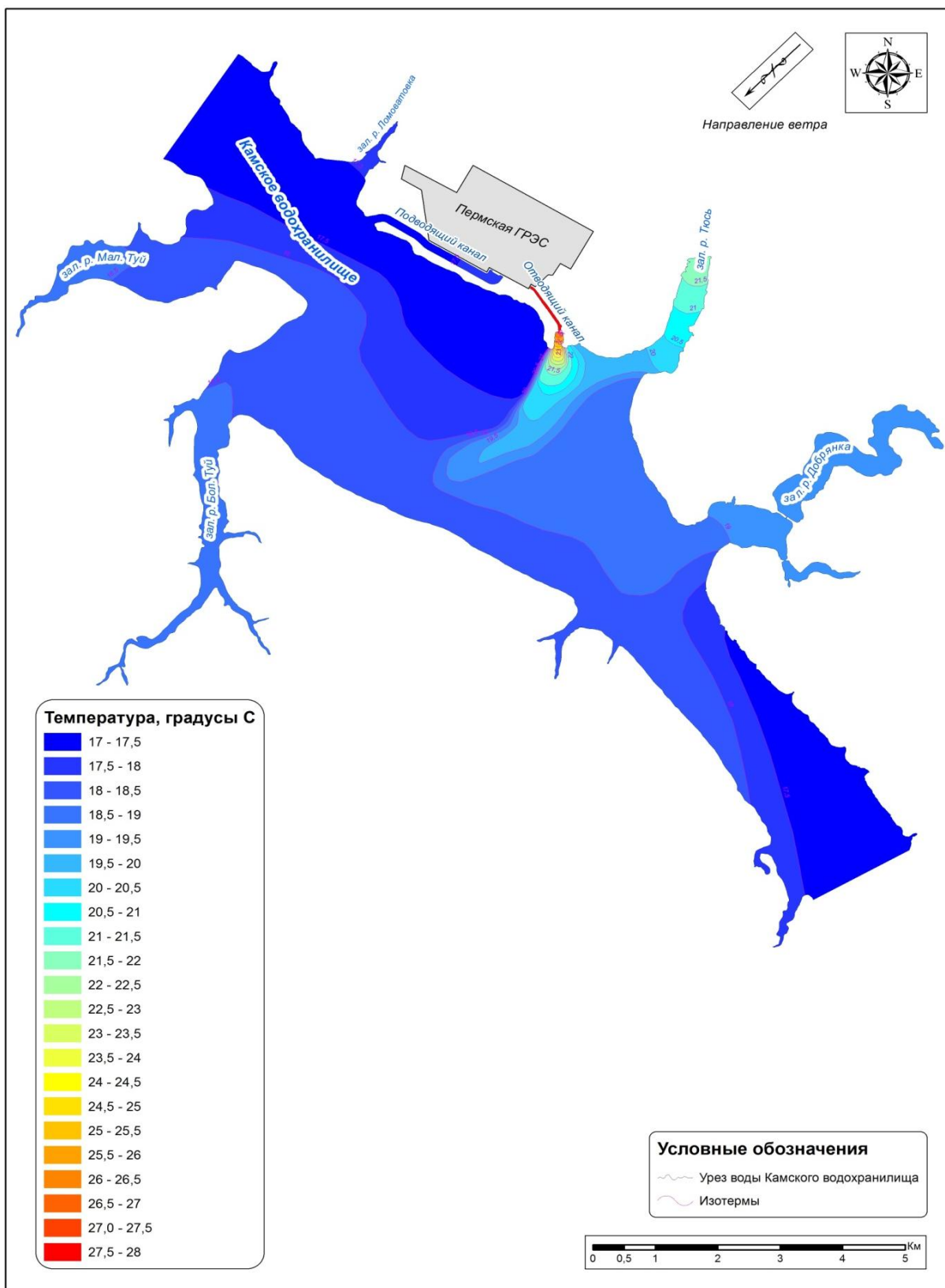


Рисунок 2.2.2. Распределение температуры воды по поверхности Камского водохранилища 17 июля 2014 года (ветер СВ, 4,2 м/сек, работало 2 энергоблока, сброс 40,5 м куб/сек,  $T$  сбрасываемой воды — 27,8 град С)

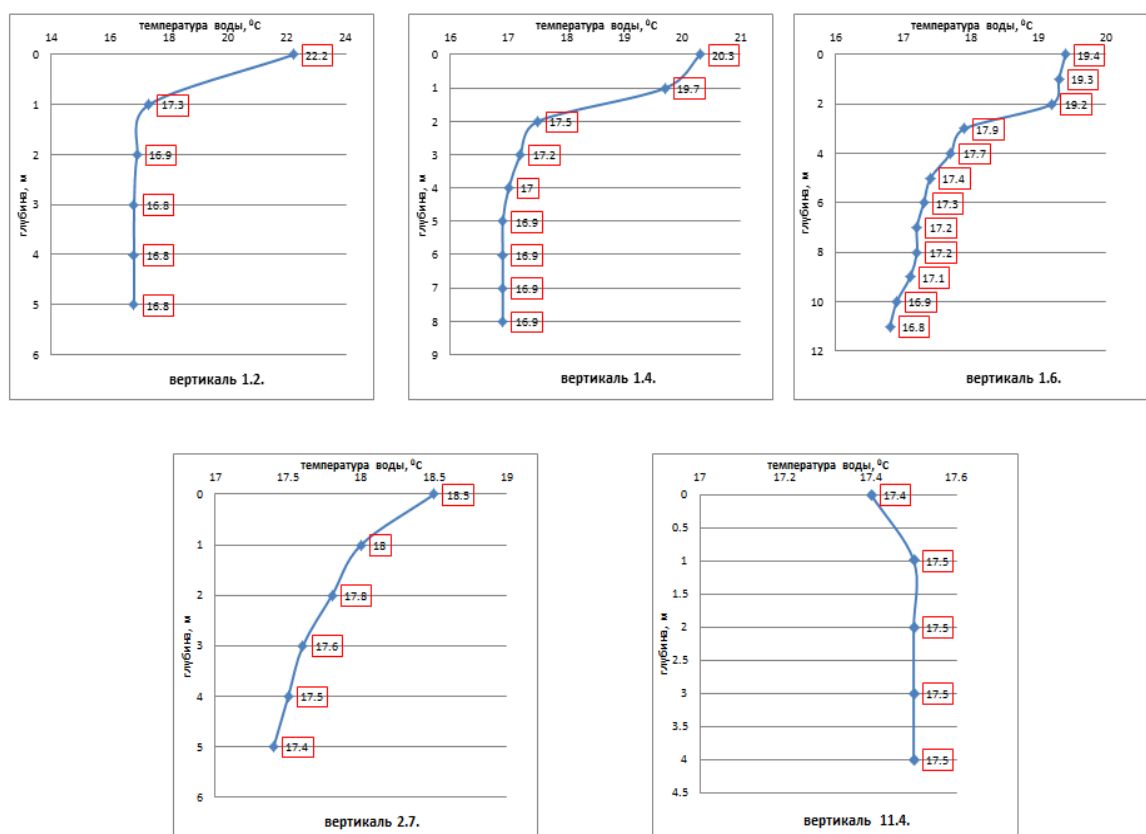


Рисунок 2.2.3. Распределение температуры воды по глубине на некоторых вертикалях в районе отводящего канала Пермской ГРЭС 17 июля 2014 года (местоположение вертикали определять по рис. 2.2.1)

Все необходимые данные о режиме забора и сброса воды, ее температуре за весь период изысканий были получены, на основе соответствующих запросов, в структурных подразделениях Пермской ГРЭС (таблица 2.2.1).

Таблица 2.2.1

Данные о режиме эксплуатации (водопользования) Пермской ГРЭС в период изысканий 17-23 июля 2014 года (2 работающих энергоблока)

Дата	Уровень воды в водозаборном ковше ЦНС, м абс.	Объем забранной и сброшенной воды		Температура забранной воды, °C	Температура сброшенной воды, °C
		м <sup>3</sup> /сут	м <sup>3</sup> /сек		
17.07	108.40	3 520 173,41	40,7	17,5	27,8
18.07	108.33	3 503 729,54	40,5	17,4	27,8
19.07	-	3 512 469,40	40,6	17,2	28,2
20.07	108.30	3 511 162,66	40,6	17,0	27,4
21.07	108.30	3 521 343,91	40,7	16,9	27,4
22.07	108.30	3 516 510,01	40,7	16,6	27,1
23.07	108.30	3 512 802,81	40,6	16,7	27,5

Исследования особенностей распределения температуры воды в Магнитогорском водохранилище проводились на всей его акватории в июле 2013 года. Но наиболее детальные измерения были выполнены в рамках предпроектных изысканий [Проект: Реконструкция системы оборотного водоснабжения..., 2015] в мае 2015 года и в рамках научно-исследовательской работы [Проведение гидрохимических и гидродинамических изысканий..., 2017] в мае 2017 года на участке проектируемых сооружений (рисунок 2.2.4). За все время исследований данного объекта было измерено около 1400 значений температуры.

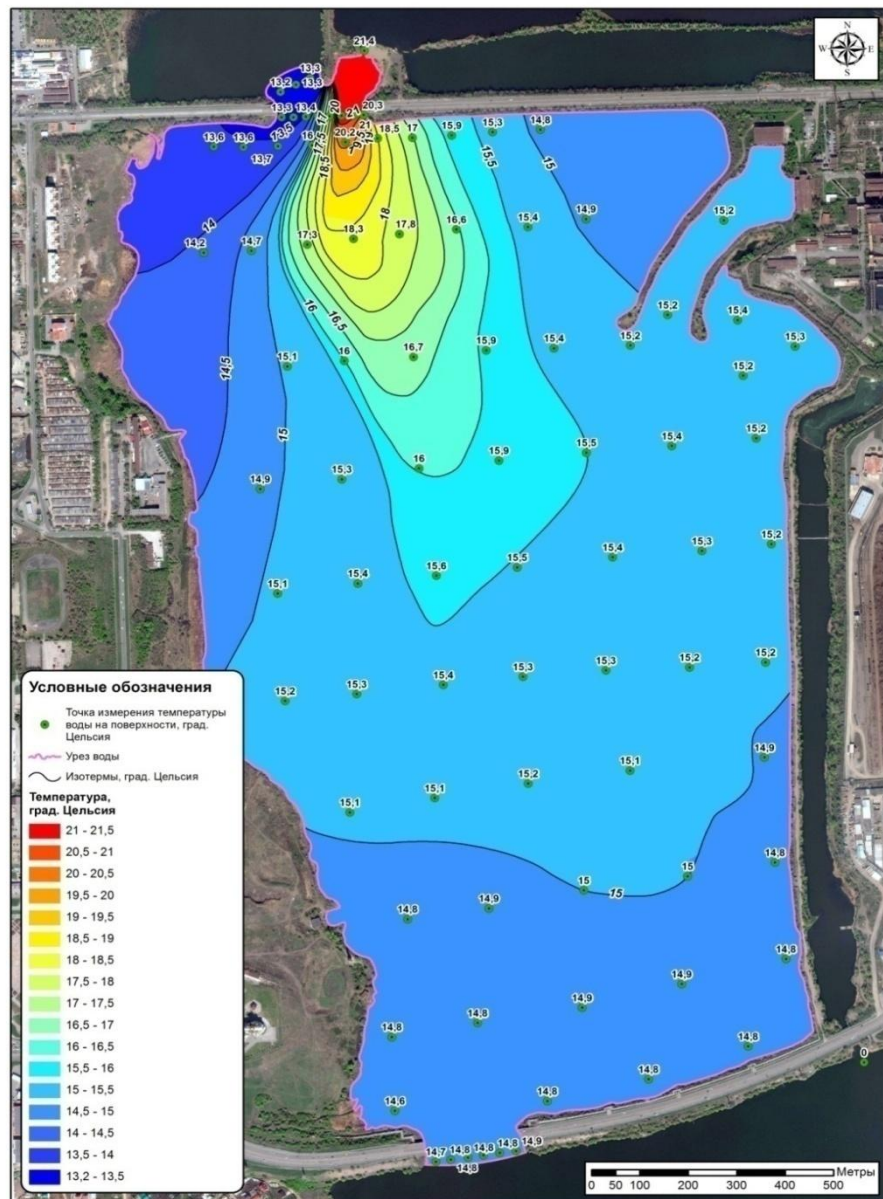


Рисунок 2.2.4. Распределение температуры воды по поверхности Магнитогорского водохранилища на участке между «Южным переходом» и «Казачьей переправой» 23 мая 2017 г.

В области изучения теплового воздействия на водные объекты, достаточно перспективным видится использование тепловизоров, в том числе, размещаемых на БПЛА. Однако, их использование в данной области ограничивается особенностями учета коэффициента инфракрасного (ИК) излучения водной поверхностью, возможностью получать данные о температуре воды только в поверхностном слое, существенным влиянием на результаты измерения параметров окружающей среды (пыль, ветер, влажность и др). Даже при соблюдении всех требований и определенном опыте эксплуатации тепловизоров, в настоящее время, представляется возможным определение поверхностной температуры водного объекта с точностью в несколько градусов, что является неприемлемым при детальном обосновании и оценке температурного воздействия на водные объекты.

Более детальное изучение температурных полей и их динамики в водоемах-охладителях, формируемых под воздействием теплых стоков энергетических станций, возможно при использовании современных многопараметрических измерительных комплексов. Одним из таких приборов можно назвать универсальный точечный измеритель Valeport Midas ECM, хорошо себя зарекомендовавший при натурных исследованиях стратификационных эффектов в водоемах. Данный прибор, кроме температуры, позволяет также измерять направление и скорость течений воды (разрешение 1 мм/сек), электропроводность, мутность и др. Использование таких комплексов позволяет проводить исследования, в том числе в зоне теплового воздействия энергетических комплексов, на принципиально ином уровне.

### **2.3. Наблюдение за метеопараметрами в районе размещения энергетических комплексов**

Ранее, в разделе 1.3. было дано подробное описание климатических условий территории размещения энергетических комплексов Пермской ГРЭС, и для промплощадки ПАО «ММК». Для этого использовались данные из климатических справочников и специализированных сайтов (открытый доступ) по метеостанциям в г. Добрянка (отметка - 144 м БС, расстояние до водовыпуска Пермской ГРЭС ~ 2,9 км) и г. Магнитогорск (отметка - 382 м БС, расстояние до насосных станций ТЭЦ-1 ПАО «ММК» ~ 3,4 км. В частности, были подробно проанализированы температурный и ветровой режимы в лимитирующий период (наиболее теплые месяцы - июнь, июль, август) для разработки сценариев дальнейших модельных расчетов.

Непосредственно при проведении изысканий, наблюдения за метеоэлементами проводились в автоматическом режиме с помощью портативной полевой метеостанции Kestrel 4500. Станция устанавливалась на высоте 2 м над водной поверхностью и фиксировала значения температуры воздуха, направления и скорости ветра (максимальную, минимальную, среднюю), влажности воздуха и давления с заданным интервалом в 1 минуту (рисунок 2.3.1).

Необходимость наблюдения и фиксации климатических характеристик, в данном случае, обусловлена расхождением в наблюдаемых на соответствующей метеостанции параметрах и условиях, непосредственно у водной поверхности (таблица 2.3.1).



Рисунок 2.3.1. Наблюдения за метеопараметрами в период изысканий на акватории Камского водохранилища в районе расположения Пермской ГРЭС

Таблица 2.3.1

Сравнение наблюдаемых метеопараметров в приузовской части Камского водохранилища в районе Пермской ГРЭС и данных с метеостанции в г. Добрянка (17 июля 2014 года)

Время	Метеостанция г. Добрянка			Наблюдённые данные		
	Температура, °С	Скорость ветра, м/с	Направление ветра	Температура, °С	Скорость ветра, м/с	Направление ветра (град)
8:00	8,9	2	северо-северо-восток			
<b>11:00</b>	16,6	2	северо-северо-восток	14,3	3,6	северо-северо-восток
<b>14:00</b>	16,4	2	северо-восток	14,6	2,8	северо-северо-запад
<b>17:00</b>	16,3	1	север	15,2	5,2	северо-северо-восток
20:00	14,3	2	север			

Сопоставление приведенных в таблице данных доказывает необходимость натуральных метеорологических наблюдений непосредственно у водной поверхности с целью проведения дальнейших корректных верификационных расчетов.

### **ГЛАВА 3. МОДЕЛИ АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ**

Характерной особенностью крупных энергетических комплексов является обеспечение стабильности их работы в условиях существенно изменяющихся гидрологических и метеорологических параметров. Этот вопрос становится весьма актуальным при использовании в их технологических схемах водоемов-охладителей.

При этом принципиальное значение имеет анализ возможных экстремальных ситуаций с достаточно малой повторяемостью, которые могут лимитировать устойчивость работы рассматриваемых комплексов по технологическим или экологическим ограничениям. Если проведение таких оценок для гидрологических и метеорологических параметров с высокой повторяемостью достаточно простая задача, то оценки для экстремальных значений, являясь весьма актуальными, встречают значительные трудности. Для этого, в первую очередь, необходимо разработать или выбрать инструмент, позволяющий оценивать температурные поля в рассматриваемых водных объектах при различных модельных значениях их гидрологических и метеорологических параметров.

Как правило, в настоящее время такие инструменты строятся на основе гидродинамических моделей в соответствующей постановке.

Так как данные модели включают в себя определенное количество параметров, определяющих особенности конкретного водного объекта, их калибровка, верификация должна проводиться на основе анализа материалов натуральных наблюдений. При этом, чем более высокого порядка применяются модели, тем более детальное проведение натуральных исследований требуется для их верификации.

Также принципиальное значение имеет вычленение определяющих гидрологических, метеорологических параметров, установление возможных диапазонов их изменения, оценка вероятностей наблюдений неблагоприятных значений рассматриваемых параметров, оценка возможных значений

технологических параметров, составление модельных сценариев наиболее неблагоприятных ситуаций по технологическим и экологическим показателям.

Сценарные подходы также весьма эффективны при решении задач выбора наиболее эффективных схем реконструкции системы водоотведения при наличии весьма жестких ограничений.

Необходимость применения сценарного подхода при решении рассматриваемых задач обуславливается, в первую очередь, сложностью и многофакторностью процессов формирования теплового режима водоема-охладителя, громоздкостью проведения соответствующих расчетов, тем более в 3D-постановке. Так как характерное время проведения только одного расчета зоны теплового загрязнения энергетического комплекса с характерными линейными размерами акватории ( $L, B$ )  $\sim 10^3$  м, а глубиной ( $H$ )  $\sim 10$  м на срок 10 суток составляет, даже при использовании высокопроизводительных кластеров, несколько суток.

В тоже время при использовании физических моделей возникает очень серьезная задача соблюдения геометрического и физического подобия модели и рассматриваемого объекта. Даже при использовании физических моделей в масштабе 1:100 очень сложно воспроизвести плотностные эффекты, связанные с существенной неоднородностью распределения температуры по глубине. Физические модели могут давать только распределение осреднённых по глубине и акватории температур. Для решения задач, связанных с эффектами плотностной неоднородности по глубине водного объекта, данные модели не могут быть достаточно эффективны, и поэтому необходимо переходить на вычислительные модели.

Сценарий, в общем случае, представляет собой перечень метеорологических, гидрологических, технологических и морфометрических параметров, характеризующих их характерные или экстремальные значения.

Принципиальное значение имеет объективность выбора данных характеристик, вероятность наблюдения отдельных параметров, составляющих сценарий, обеспеченность реализации отдельных сценариев.



Наиболее сложная задача формирования сценария возникает тогда, когда поставленная задача допускает или даже предполагает изменение геометрии водоема, создание разделительных дамб и др. В этом случае при формировании сценариев определенное значение приобретает непосредственно и геометрия самих дамб. При этом задачу целесообразно решать в два этапа. На первом этапе в 2D-постановке обрабатывается общая геометрия объекта, а на втором, в 3D-постановке решаются вопросы вертикальной стратификации водных масс.

### **3.1. Общий анализ моделей**

В настоящее время гидродинамические модели являются одним из наиболее распространённых инструментов, используемых при решении широкого круга задач, связанных с охраной и рациональным использованием поверхностных водных объектов.

В зависимости от количества используемых независимых пространственных переменных используемые модели разделяются на нуль мерные «0D», одномерные «1D», двухмерные «2D», трехмерные «3D». Наиболее простые модели являются «0D», они не включают в себя пространственные переменные.

Однако при решении рассматриваемых задач исследования теплового режима водных объектов такие модели могут быть весьма полезными при оценке устойчивости водных масс, возможности организации селективных заборов воды.

Одномерные модели речной гидравлики, как правило, строятся на основе решения системы уравнения Сен-Венана. Основной недостаток данных моделей: они позволяют получать только осреднённые по сечению потока, требуемые динамические, физические или химические характеристики потока. Характерная особенность данной системы уравнения: она не имеет в общем случае аналитических решений. Аналитические решения построены только для отдельных частных случаев [Прандтль, 2000].

Основным инструментом решения являются численные методы. Широкое распространение численных методов решения данной системы уравнений в нашей стране получило в начале 60 годов XX века. Сейчас для численного решения системы уравнений Сен-Венана имеется достаточно большое количество пакетов программ, таких как River, Mike 1.1, Hec-Ras и др.

В решении рассмотренных в данной работе задач одномерные модели использовались для оценки граничных условий 2D-моделей.

В зависимости от характера принимаемых осреднений 2D-модели могут быть как в постановке «мелкой воды» (осреднение по глубине потока), так и при осреднении по ширине потока.

Модели в постановке «мелкой воды» достаточно корректны для неглубоких, но широких водных объектов, когда при значительной изменчивости рассчитываемых параметров по их акватории они характеризуются достаточной однородностью по глубине.

Модели с осреднением по ширине потока наоборот достаточно корректны при его относительно небольшой ширине и расчетные параметры характеризуются значительной изменчивостью по глубине.

К сожалению, в решении рассматриваемых задач расчетные параметры характеризуются значительной изменчивостью как по акватории водного объекта, так и по его глубине. Поэтому для получения корректных результатов пришлось использовать значительно более сложные «тяжелые» гидродинамические модели в 3D-постановке с учетом влияния температуры на плотность воды.

При построении моделей воздействия энергетических комплексов на водоемы-охладители, как правило, для существенного упрощения расчетных моделей не учитываются « типовые » потоки, связанные с диссипацией турбулентной энергии и через дно водоема. Как правило, такие условия вводятся априорно, декларировано [Одрова, 1979; Методические указания по технологическим расчетам..., 2004].

Однако значительно больший интерес представляет анализ таких допущений на основе конкретных оценок. Учитывая, что оценки конкретных гидрологических, метеорологических, технологических параметров, как правило, проводятся с погрешностью 10%, то вряд ли целесообразно включать в модели компоненты, вклад которых менее 10%.

Рассмотрим плотность отдельных тепловых потоков. Определяющими для водоема-охладителя являются тепловые потоки, связанные со сбросом термальных стоков. Их плотность оценивается как:

$$j_{сб} = (C_p \cdot \rho \cdot q \cdot \Delta T) / F \quad [\text{Вт} / \text{м}^2], \quad (3.1.1)$$

где  $F$  – площадь водоема охладителя, часто активная, охраняемая зона проточного водотока.

Плотность теплового потока, обусловленного диссипацией турбулентной энергии, составляет:

$$j_{дис} = \xi \cdot \rho \cdot H, \quad (3.1.2)$$

где  $\xi$  – скорость диссипации турбулентной энергии [ $\text{м}^2 / \text{сек}^3$ ];

$H$  – характерная глубина водного объекта.

Согласно Гринвальду Д.И. (1988):

$$\xi \sim g i V_{ср} \quad (3.1.3)$$

или учитывая, что:

$$V_* = (g i H)^{1/2}, \quad (3.1.4)$$

$$V_* = V_{ср} \sqrt{g} / C, \quad (3.1.5)$$

где  $V_*$  – динамическая скорость,  $C$  – коэффициент Шези,

имеем:

$$j_{дис} = V_{ср}^2 \cdot (g / C^2) \rho \quad [\text{Вт} / \text{сек}]. \quad (3.1.6)$$

Как правило, оценка плотности потока тепла через дно строится на основе соотношения:

$$j_{дно} \sim C_p \cdot \rho \cdot v_{эф} \tau \left. \frac{\partial T}{\partial Z} \right|_{Z=0} \quad (3.1.7)$$

где  $v_{эф}$  – эффективный коэффициент теплопроводности.

При этом, принимая, что скорость течения в придонной области очень мала, считается [Гринвальд, 1988], что:

$$V_{\text{эф т}} \sim V_{\text{мол т}}, \quad (3.1.8)$$

где  $v_{\text{мол т}}$  - коэффициент молекулярной теплопроводности.

Для воды данные коэффициенты весьма малы и составляют при  $T=0^{\circ}\text{C}$ ,  $v_{\text{мол т}} \sim 0,57$  Вт/м град, а при  $T \sim 30^{\circ}\text{C}$   $v_{\text{мол т}} \sim 0,62$  Вт/м град [Беховых и др., 2008].

Однако в строгой постановке данное соотношение корректно, если в системе теплообмена <вода> – <донные отложения> лимитирующим является перенос тепла в водной массе. Нетрудно видеть, что данная ситуация может быть, если

$$\frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{д}}} = \frac{H^2/v_{\text{эф}}}{H_{\text{дн}}^2/v_{\text{пор х}}} \gg 1, \quad (3.1.9)$$

где  $T_{\text{н}}$  – характерное время выравнивания температуры по глубине в водоеме за счет диффузионных процессов;

$T_{\text{д}}$  – характерное время выравнивания температуры в активном слое донных отложений.

В зависимости от соотношения температуры воды в придонной области и донных отложений потоки тепла могут быть направлены как из донных отложений в водоем, так и из водоема в донные отложения.

Использование соотношения (3.1.9) существенно упрощает обработку исходных данных и выполнение требуемых оценок на основе поставленных натуральных экспериментов. Согласно оценкам Bengtsson et al (1996), характерная плотность данных тепловых потоков в водоемах зимнего сезона составляет  $0,5 \div 1$  Вт/м<sup>2</sup>. Однако, как отмечалось в работах [Zdorovenova, 2009], интенсивность этих потоков очень существенно изменяется как по времени, так и в пространстве.

В частности, в работе Г.Г. Гавриленко [Гавриленко и др., 2015] отмечает, что на основе экспериментальных оценок на небольших озерах Карелии в течении нескольких дней перед ледоставом интенсивность данных потоков

достигала  $j_{\text{дон}} \sim 10 \div 15 \text{ Вт/м}^2$ , а в летний период интенсивность тепловых потоков из воды в донные отложения может превысить  $20 \text{ Вт/м}^2$ .

В рамках диффузионных моделей с лимитирующим параметром – коэффициентом молекулярной теплопроводности, очень сложно объяснить данный факт. Вероятно, определяющим фактором, объясняющим подобную плотность теплового потока, является перестройка структуры вертикальной циркуляции в водоеме.

Так как модельные расчеты тепловых полей ориентированы на оценку их экстремальных значений, то с этой позиции целесообразно пренебречь данными тепловыми потоками, направленными на отвод тепла из водоемов жаркий период.

В то же время они представляют существенный интерес для повышения эффективного использования водоемов-охладителей. Оценим соотношение плотностей рассматриваемых потоков при характерных значениях гидрологических и технологических параметров. Если принять следующие конкретные значения исходных параметров, входящих в соотношения (3.1.6) и (3.1.7),  $C_p = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг град}$ ,  $\rho \sim 1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $g = 10 \text{ м/сек}^2$ ,  $F = 10 \text{ км}^2$ ,  $q = 10 \text{ м}^3/\text{сек}$ ,  $\Delta T \sim 10^0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $H = 10 \text{ м}$ ,  $V \sim 0,1 \text{ м/сек}$ ,  $C = 40 \text{ м}^{1/2}/\text{сек}$ , имеем  $j_{\text{сб}} = 42 \text{ Вт/м}^2$ . В то же время  $j_{\text{дис}} = 0,0062 \text{ Вт/м}^2$  при  $V = 0,1 \text{ м/сек}$ . Однако при  $V = 1 \text{ м/сек}$  плотность потока возрастает в  $10^3$  раз. При  $j_{\text{дон}} \sim 0 \div 0,5 \text{ Вт/м}^2$ , что следует из оценок в зимний период [Гавриленко и др., 2015] данная величина весьма мала. Однако максимальные тепловые потоки наблюдаются в предледоставный период,  $j_{\text{дон}} \sim 10 \div 15 \text{ Вт/м}^2$ , поэтому они представляют существенный интерес для повышения эффективного использования водоемов-охладителей.

В целом значимое влияние на тепловой режим водоемов даже в течение кратковременного периода донные отложения могут оказывать, если их активный объем будет весьма значителен и сопоставим с объемами рассматриваемого водоема.

Вследствие весьма малого значения  $v_{\text{мол т}}$  данные процессы должны быть весьма инерционны. Однако, в определенных случаях в водоеме могут

формироваться условия, обуславливающие резкий, очень мощный вынос поровых растворов. Такие процессы обуславливают «залповые» выносы гетерофазноконсервативных поллютантов из донных отложений, описанные в [Веницианов и др., 2002].

В целом процессы теплового взаимодействия в системе <вода>—<донные отложения> изучены очень слабо. Поэтому вполне приемлемо в первом приближении пренебречь этими потоками тепла.

### **3.2. Оценка устойчивости водных масс при организации селективного забора воды**

Как уже отмечалось, характерной особенностью многих достаточно глубоких водных объектов является существенная неоднородность водных масс по глубине. При активном хозяйственном их использовании неизбежно возникает потребность забора воды с наилучшими потребительскими свойствами. Ставится задача организации селективного забора воды. В качестве примера весьма успешной организации селективного водозабора воды, с целью снижения жесткости забираемой воды, следует указать Чусовской водозабор г. Перми [Отчет о НИР: Изучение качества воды..., 1983]. Достаточно часто такая задача возникает при обеспечении устойчивого охлаждения конденсаторов турбин тепловых и атомных электростанций в летнее время, когда крайне желательно отбирать воду из глубинных, более холодных слоёв.

Впервые в нашей стране глубинный селективный водозабор для водоснабжения тепловой электростанции рассмотрен В.И. Рылеевым ещё в 1938 г. [Макаров, 1968].

В настоящее время известно достаточно большое количество работ, рассматривающих с той или иной степенью детальности исследуемую проблему в рамках 0D-приближения, при этом подавляющая часть работ посвящена глубинным водозаборам. Достаточно подробный обзор работ по данной тематике, выполненных до 1967 г. дан в [Макаров, 1968]. Анализ работ, выполненных с 1968 г. до 1974г. представлен в обзоре [Васильев, 1975].

Основным механизмом, обеспечивающим возможность организации селективного отбора воды, является вертикальная плотностная стратификация. В общем случае она обуславливается неоднородностью температурных полей, минерализации, содержания взвешенных наносов. Однако в рассматриваемых нами задачах определяющим является неоднородность распределения температуры воды.

Вопросы устойчивости стратифицированного потока рассматриваются как в отечественной, так и в зарубежной литературе при решении многих практических задач [Макаров, 1968]. Наибольшее количество работ посвящено вопросам устойчивости потоков смешивающихся жидкостей. При сравнительно небольшой разности скоростей течения верхнего и нижнего слоя и большой разности плотностей слои перемешиваются, и между ними образуется чётко выраженная поверхность раздела или слой небольшой толщины. С увеличением разности скоростей течения слоев или уменьшения разности плотностей на поверхности раздела образуются волны, которые при определённых значениях начинают разрушаться. Согласно экспериментальным исследованиям Келлагана [Васильев, 1975] критерий устойчивости поверхности раздела между слоями определяется в следующем виде:

$$\theta = \left( \frac{1}{(Fr)^2 (Re)^2} \right)^{1/3} \quad (3.2.1)$$

$$Fr = \frac{V_n}{\sqrt{g \Delta \frac{\Delta \rho}{\rho} h_2}}, \quad Re = \frac{V^* h_2}{\nu}, \quad \theta_{кр} = 0,18$$

где  $V_n$  - средняя скорость нижнего слоя

$h_2$  - толщина нижнего слоя.

В том случае, когда  $\theta > \theta_{кр}$  поверхность раздела будет устойчивой.

Если влияние дна и свободной поверхности на движение слоев мало, то определяющим является критерий 3.2.2, близкий к  $\theta$ :

$$C = \left( \frac{U^3}{g V \frac{\Delta \rho}{\rho}} \right) \quad (3.2.2)$$

Критерий «С» определяет форму поверхности раздела. Размытая граница образуется при  $C \sim 1650$ , четкая граница при  $C \leq 150$ . Проведённые расчёты

показали, что в исследуемом районе при  $V \sim 0,01$  м/сек. устанавливается чёткая граница. При  $V \sim 0,1$  м/сек. – размытая граница между более плотной придонной водой и менее минерализованной водой поверхностного слоя.

Размытость границы не означает отсутствие стратификации. В этом отношении интересен критерий предложенный К.Я. Киндом [Айтсам и др., 1968]:

$$\frac{U^2}{gH_1} \leq 0.12 \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right)^{0.7} \quad (3.3.3)$$

При исследовании разноплотностных потоков, с непрерывным по глубине изменением плотности, основными критериями являются: число Ричардсона ( $R_i$ ) и плотностное число Фруда ( $Fr$ ).

При этом число Ричардсона ( $R_i$ ):

$$R_i = \frac{g \frac{\partial \rho}{\partial y}}{\rho \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2} \quad (3.3.4)$$

– характеризует отношение работы против сил плавучести к полной энергии турбулентности, число Фруда:

$$Fr^2 = \frac{\rho V^2}{g \frac{\partial \rho}{\partial y}} \quad (3.3.5)$$

– отношение кинетической энергии потока к работе против сил всплытия.

Согласно данным В.М. Лятхера [Лятхер, 1964] достаточным условием отсутствия стратификации является критерий  $R_i < 0,1$ .

Число  $R_i$  определяет интенсивность вертикального турбулентного перемешивания в зависимости от степени плотностного расслоения.

Согласно [Монин и др, 1965]:

$$K_{yy} \sim K_{yy0} (1 - \alpha R_i)^{1/4} \quad (3.3.6)$$

где  $K_{yy}$  – коэффициент вертикального обмена в стратифицированной среде,  $K_{yy0}$  – соответствующий коэффициент для нестратифицированного потока,  $\alpha \sim 1$ .

При  $\alpha R_i \sim 1$  происходит "запирание" нижнего более плотного подслоя вследствие затухания вертикального турбулентного обмена.

Таким образом, в зимний период в районе Чусовского водозабора, как следует из вышеотмеченных критериев, а также проведённых полевых



исследований, устанавливается устойчивая стратификация с практически полным прекращением вертикального обмена. Поэтому возникают условия, благоприятствующие организации селективного водозабора из поверхностного слоя.

Основной прикладной целью исследования устойчивости водных масс водоемов является оценка возможности организации из него селективного отбора воды. Основная задача при расчёте селективного водозабора состоит в установлении гидравлических параметров и определении гидродинамического режима, при котором забор воды проводится только из определённого слоя, так при глубинном водозаборе – из придонных слоёв, а при поверхностном – из верхних слоёв. Для поверхностного водозабора рассчитывается положение нижней критической поверхности раздела.

При рассмотрении подобных задач, как отмечает [Васильев, 1975], хорошие результаты часто дают решения, основанные на теории идеальной жидкости (без учёта вязкости и турбулентности среды). Глубокий обзор данных работ в этой области был дан в [Yih et al, 1965].

Для данных работ характерен анализ "двухслойных" систем. Craua [Craua, 1964] на основе теории размерностей и теории потенциального течения получил безразмерные комплексы для определения критического положения поверхности раздела:

а) плоской задачи:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} g \frac{h^3}{g^3} = 0.438 \quad (3.3.7)$$

б) для пространственной задачи:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} g \frac{h^5}{Q^2} = 0.154 \quad (3.3.8)$$

$q$  - удельный расход,  $q=Q/L$ ,

$Q$  - полный расход.

При решении пространственной задачи принималось, что глубина потока много больше размеров отверстия водозабора. Проведённые экспериментальные оценки [Макаров, 1968] подтвердили правильность формул

(3.3.7-3.3.8). Однако необходимо отметить, что эти формулы получены при существенном упрощении процесса селективного водозабора (ламинарный режим течения, очень малые отверстия, истечение происходит в атмосферу) поэтому эти соотношения, как отмечается в [Аверкиев и др., 1965; Васильев, 1975], дают сугубо ориентировочные значения.

В работе [Davidian, 1956] рассмотрена полученная на основе анализа экспериментальных материалов формула для расчёта критического положения поверхности раздела. При водозаборе из верхнего слоя трубой (3.3.9):

$$\frac{h_{кр}}{D} = 0.42 \left( \frac{V_{ex}}{D \frac{\Delta \gamma}{\rho}} \right)^{1/2} \quad (3.3.9)$$

Smytek [Smytek, 1955] на основе экспериментальных исследований получил следующее соотношение для оценки  $h_{кр}$ :

$$h_{кр} = \frac{0.61 g^{3/5} V_{ex}^{1/5}}{g^{2/5}} \left( \frac{\rho}{\Delta \rho} \right)^{2/5} \quad (3.3.10)$$

Как показали расчеты, соотношения 3.3.9-3.3.10 дают достаточно близкие значения, что объясняется, по-видимому, тем, что данные формулы получены при достаточно близких исходных допущениях. Из более поздних работ в этом направлении следует отметить исследование, выполненное Lai [Wood et al, 1977]. Им теоретически и экспериментально изучено двухслойное течение через водослив с широким порогом. Решение было проведено методами одномерной гидравлики с применением уравнения Бернулли для каждого слоя движущейся жидкости. Проведённые эксперименты показали хорошее согласование теоретических и натурных данных.

Представление водоёма в виде двухслойной системы является в определённых случаях достаточно грубым приближением. Значительно больший интерес представляют модели, учитывающие непрерывное изменение плотности по глубине. Однако этот вопрос проработан ещё недостаточно полно.

### **3.3. Методическое обеспечение проведения вычислительных экспериментов**

В настоящее время компьютерное моделирование является одним из основных методов в научных и практических исследованиях. Компьютерная модель - это модель реального процесса или явления, реализованная компьютерными средствами. Результатом разработки компьютерной модели является вычислительный (компьютерный) эксперимент, позволяющий получать и анализировать результаты моделирования при различной вариации параметров модели. В связи с интенсивным увеличением производительности современных вычислительных средств математические модели приобретают определенное преимущество перед широко используемыми ранее физическими.

Процессы в исследуемой системе могут протекать по-разному в зависимости от условий, в которых находится система. Следить за поведением реальной системы при различных условиях, и проводить эксперименты часто бывает очень трудно, дорого, а иногда и невозможно. В таких случаях используются компьютерные программы, основанные на математических моделях. Построив модель, можно проигрывать различные сценарии и наблюдать за поведением системы.

Такой метод исследования систем называется имитационным моделированием. Имитационное моделирование применяют в тех случаях, когда нужно учесть большее разнообразие исходных данных, изучить протекание исследуемых процессов в различных условиях.

Компьютерные демонстрации различных явлений и процессов, имитация проведения экспериментов, которые невозможно осуществить в реальных лабораторных и натуральных условиях, предоставляют широкие возможности для исследователя. Ценность в изучении подобных процессов с использованием компьютера состоит в возможности создания компьютерных демонстраций (имитации) на экране дисплея, в которых, используя анимационные возможности компьютера, можно "увидеть" моделируемый процесс на экране,

качественно и количественно осознать результаты моделирования. Чрезвычайно эффективным является процесс наблюдения за динамикой процесса в графическом виде.

Описание и управление температурой воды водоемов-охладителей водных объектов в настоящее время невозможно без привлечения методов компьютерного имитационного моделирования.

Построение и реализация (с учетом ограниченной мощности имеющихся вычислительных средств и современной системы сбора и анализа исходной информации) единой унифицированной модели представляется в настоящее время нереальным. Более реалистичным представляется пакетный принцип, включающий достаточно большое количество моделей, при этом в каждом конкретном случае выбирается наиболее оптимальная модель для конкретных условий.

В целом, при создании моделей расчета тепловых загрязнений (ТЗ) в системах охлаждения ГРЭС необходимо соблюдение следующих требований:

1. Модель переноса должна отражать основные закономерности распространения теплового загрязнения в водных объектах;
2. Используемые вычислительные средства должны обеспечивать получение практически важных результатов за приемлемое время и при экономичном использовании требуемых ресурсов;
3. Должны быть указаны методы идентификации параметров модели;
4. Точность результатов расчета должна соизмеряться с точностью исходных данных. При проведении прогнозных расчетов основные морфометрические характеристики водного объекта могут быть заданы только с некоторой пространственной разрешимостью и погрешностью. Кроме этого, с определенной погрешностью задаются характеристики источников загрязнения, а также с возможной точностью контроля процесса рассеивания загрязняющих веществ в природных условиях.

Решение практических задач при попытках учесть реальную морфометрию в рамках трехмерной модели до сих пор наталкивается на

большие вычислительные трудности. Анализ реального трехмерного турбулентного потока показывает, что его можно рассматривать в рамках двухмерной задачи, если размеры его малы по сравнению с главными радиусами свободной поверхности дна, а также в рамках одномерной задачи при значительном превышении продольных размеров над поперечными. Кроме того, в большинстве практических задач прогноза диффузия тепла, как правило, в вертикальном направлении происходит значительно быстрее, чем в поперечном и продольном направлении, поэтому есть возможность рассматривать равномерное распределение примеси по вертикали. При этом следует отметить, что пренебрежение вертикальной проекцией градиента температур не упрощает, существенно, решение самой задачи, поскольку граничные условия всегда зависят от морфологических особенностей водоемов и водотоков.

### **3.3.1. Одномерные (1D) гидродинамические (гидротермические) модели**

Одномерные модели являются результатом пространственного осреднения по всему поперечному сечению реки. Полученное таким образом одномерное уравнение адвекции-диффузии широко распространено при решении задач, связанных с описанием загрязнения водных объектов. Для его использования требуется, чтобы ЗВ в реке было хорошо перемешано в поперечном направлении. Кроме этого, использование этого уравнения требует знания коэффициента продольной дисперсии, который является достаточно трудно определяемым параметром.

Основное применение одномерных моделей: описание, предсказание температуры воды в канале, где пространственное осреднение остается адекватным.

### **3.3.2. Двумерные (2D) гидродинамические (гидротермические) модели и принципы их построения**

При решении большинства практических задач, связанных с расчетом поля скорости в естественных водных объектах, используется система уравнений «мелкой воды». Выбор данной модели связан как со значительной сложностью описания пространственных движений в естественных водных объектах и надежного практического их расчета, так и с низкой точностью задания исходных данных, при которой детальные представления кинематики течения могут оказаться невостребованными.

Обычно, как для естественных водных объектов, так и для крупных прудов-охладителей характерно превышение горизонтальных размеров над вертикальными. Это приводит к быстрому перемешиванию ЗВ по глубине потока. Однако поперечное перемешивание может занимать значительное время и происходить на больших расстояниях от места выпуска.

Для такого рода задач, когда требуется описание планового распределения ЗВ, широкое применение находят двухмерные модели, позволяющие описывать более сложные процессы и рассматривать более широкий класс прикладных задач, по сравнению с одномерными моделями.

Двухмерные плановые модели позволяют рассчитывать сложные течения в водоемах на доступных в настоящее время вычислительных средствах. По этой причине они оказываются наиболее предпочтительными моделями для анализа аварийных ситуаций в поверхностных водных объектах.

В настоящее время, как в нашей стране, так и за рубежом разработан ряд программных комплексов, позволяющих численно моделировать нестационарные гидродинамические процессы в русловых потоках в рамках двумерной постановки. Наиболее известными из разработанных в нашей стране являются:

- программный продукт River, созданный АО «НИИЭС»;
- программный продукт «Волна прорыва», разработанные в ОАО «ВНИИГ» им. Б.Е.Веденеева;

– программный продукт Cardinal, разработанный Клеванным К.А., Вольцингером Н.Е. (г. Санкт-Петербург).

Из зарубежных:

– программный комплекс MIKE 21, разработанный Датским гидравлическим институтом (DHI), официальным Российским дилером DHISoftware является НКФ «Волга»;

– SMS v.11.1, специализированный гидрологический пакет американской компании AQUAVEO LLC, разработанный по заказу и при участии Центра гидравлических исследований США (HEC), Инженерного корпуса армии США (USACE) и Федерального управления по автомобильным дорогам США (FNWA).

В настоящее время вычислительные гидродинамические эксперименты становится необходимым и обязательным компонентом решения широкого круга как водохозяйственных, так и гидроэкологических задач. Данное обстоятельство связано в первую очередь с очень быстрым развитием эффективных вычислительных средств.

Поэтому наряду с широким использованием гидродинамической модели в 2D-приближении все шире стали использоваться модели в 3D-приближении, позволяющие учитывать вертикальные стратификационные эффекты. Однако, они требуют значительно больше вычислительных ресурсов.

Коллектив лаборатории ПГС Ги УрО РАН Пермского ФИЦ последние годы активно занимается использованием современных гидродинамических моделей для решения широкого круга задач. Успешно применены гидродинамические модели прогноза качества воды р. Амур. Построены модели обоснования отведения избыточных рассолов в р. Каму [Лепихин и др., 2010]. Решены задачи качества забираемой воды на Чусовском водозаборе г. Перми. Проведена оценка последствий промывания пойменных озер в долине р. Вятки [Лепихин и др., 2011] во время прохождения паводка на качество забираемой воды на водозаборе г. Киров. Строились и успешно использовались модели не

только Камских водохранилищ, но и подмосковных водохранилищ совместно с ИВП РАН (г. Москва).

Компьютерная гидродинамическая модель участка Камского водохранилища в районе г. Добрянка и участка Магнитогорского водохранилища в двумерном приближении построена на основе лицензированного, специализированного, гидрологического программного пакета SMS v.11.1 (Surface-Water Modeling System) американской компании AQUAVEO LLC, предназначенного для моделирования в двухмерном приближении гидродинамики, распространения загрязнений (в том числе и температурного) и транспорта наносов в водном объекте.

Специализированный гидродинамический пакет SMS v.11.1 американской компании AQUAVEO LLC, содержит несколько модулей (RMA2, RMA4, ADH, FESWMS, TUFLOW и другие), которые позволяют решать различные задачи. Ниже приведена характеристика модуля RMA2, используемого нами для моделирования двумерного течения и модуля RMA4, используемого нами для моделирования двумерного распространения теплового загрязнения.

#### ***Описание модуля RMA2 в программном комплексе SMS v11.1.***

Модуль RMA2 - это двумерная усредненная по глубине конечно-элементная гидродинамическая численная модель. Она вычисляет возвышения водной поверхности и горизонтальные компоненты скорости в двумерных областях.

Модуль RMA2 решает методом конечных элементов уравнение Рейнолдса для турбулентных течений, полученных из уравнений Навье-Стокса. Трение вычисляется по формуле Маннинга, а коэффициенты турбулентной вязкости задаются в виде аналитических зависимостей. Данный модуль может использоваться для решения как стационарных, так и нестационарных задач.



*Определяющие уравнения.*

Универсальная компьютерная программа модуля RMA2 решает уравнения движения и сохранения количества движения в двух направлениях горизонтальной плоскости. Решаемые уравнения имеют вид:

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[ E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + gh \left[ \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{g u n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2) - \zeta V a^2 \cos \psi - 2 h v \omega \sin \Phi = 0 \quad (3.3.2.1)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[ E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + gh \left[ \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{g v n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2) - \zeta V a^2 \sin \psi + 2 h u \omega \sin \Phi = 0 \quad (3.3.2.2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (3.3.2.3)$$

где  $h$  – глубина потока,  $x, y, t$ – координаты и время,  $u, v$  – скорости по координатам  $x$  и  $y$  соответственно,  $\rho$  – плотность воды,  $E$  – коэффициент вязкости при турбулентном течении,  $g$  – ускорение свободного падения,  $a$  – возвышение основания (дна),  $n$  – шероховатость по Маннингу,  $\zeta$  – эмпирический коэффициент горизонтального отклонения ветра,  $V_a$  – скорость ветра,  $\psi$  – направление ветра,  $\omega$ – коэффициент угла вращения Земли,  $\Phi$  – широта.

Уравнения 3.3.2.1–3.3.2.3 решаются методом конечных элементов, используя метод Галеркина взвешенных невязок. Элементы на участках русла могут быть линейные (одномерные) или квадратные (двухмерные), четырехугольные либо треугольные и могут иметь изогнутые (параболические) стороны. Форма базисных функций квадратичная для скорости и линейная для глубины. Пространственное интегрирование выполнено по Гауссу. Вторые по времени производные заменены нелинейной аппроксимацией конечной разности. Предполагается что переменные, которые дифференцируются относительно времени и заменены в форме конечной разности, изменяются по каждому временному интервалу по формуле:

$$f(t) = f(t_0) + at + bt^c \quad t_0 \leq t < t_0 + \Delta t \quad (3.3.2.4)$$

где  $a, b$  и  $c$ – константы.

Заметим, что, основываясь на экспериментах, лучшее значение для константы  $c = 1,5$ .

### ***Описание модуля RMA4 в программном комплексе SMS v11.1.***

Модуль RMA4 – это конечно-элементная численная модель переноса загрязняющих субстанций в предположении, что её распределение по глубине одинаково. Он вычисляет концентрации для 6 элементов, либо консервативных, либо неконсервативных, в пределах одномерной и/или двумерной расчетной области сетки.

#### *Применение модуля RMA4.*

Модель качества воды RMA4 описывает осредненный по глубине адвективно-диффузионный процесс в водной среде. Модель может использоваться для оценки любого консервативного вещества, которое растворено в воде, или которое, как может предполагаться, является нейтрально плавучим в водной толще. Модель также используется для исследования физических процессов перемещения и перемешивания неконсервативного вещества в водоёмах, реках, заливах, устьях и прибрежных зонах. Для большинства случаев, модель использует осредненную по глубине гидродинамику из модуля RMA2.

К моделям качества воды относятся:

- определение горизонтального распределения солёности;
- прослеживание температурных эффектов от электростанций;
- вычисление продолжительности пребывания в гаванях или водоёмах;
- оптимизация размещения устьев (водоотводов, канав, сбросов);
- идентифицирование потенциальных областей для распространяющихся нефтяных пятен или других загрязняющих веществ;
- оценка степени мутности воды;
- описание зоны перемешивания;
- анализ размывания.

#### *Определяющие уравнения.*

Версия CEWES RMA4 – пересмотренный вариант RMA4, которая разработана Кингом (1989). Универсальная компьютерная

программа, решающая уравнения процессов переноса и перемешивания.

Осредненное по глубине уравнение переноса имеет вид:

$$h \left( \frac{\partial T}{\partial x} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial T}{\partial y} + k(T_{атм} - T) \right)^* = 0, \quad (3.3.2.5)$$

где  $h$  – глубина потока,  $T$  – температура воды;  $x, y, t$  – координаты и время,  $u, v$  – скорости по координатам  $x$  и  $y$  соответственно,  $D_x, D_y$  – коэффициенты турбулентного перемешивания,  $k$  – коэффициент, характеризующий интенсивность теплового взаимодействия в системе <атмосфера> – <водная поверхность>.

Уравнение решается методом конечных элементов, используя метод Галеркина взвешенных невязок. Как в случае с гидродинамической моделью RMA2, модель переноса RMA4 использует линейные или квадратные, четырехугольные или треугольные сегменты. Пространственное интегрирование уравнений выполнено методом Гаусса.

Фронтальный метод решения, обеспечивающий эффективный алгоритм, также используется в RMA4, как и в других программах в системе TABS-MD.

Несмотря на значительное удобство и «отработанность» таких моделей, они имеют очень существенный недостаток – расчетное температурное поле в рассматриваемом водном объекте принимается однородным по глубине. Если на неглубоких водоемах данное приближение может рассматривать как вполне приемлемое допущение, то на глубоких водных объектах неоднородность рассматриваемых полей по глубине может вносить существенные погрешности. В настоящее время, в связи очень быстрым развитием расчетных средств, становятся доступными гидродинамические модели в 3D-приближении для получения более полных и надежных оценок. Как уже отмечалось, расчеты выполнялись как в 2D, так и в 3D-приближении.

### **3.3.3. Трехмерные (3D) гидродинамические (гидротермические) модели и принципы их построения**

Численное моделирование распространения теплового загрязнения на Камском водохранилище при сбросе воды Пермской ГРЭС в рамках трехмерного подхода проводилось для участка протяженностью более 10 км,

содержащего источник забора воды и источник сброса использованной воды. Вычисления проводились при помощи пакета вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent с использованием  $k-\varepsilon$  модели для описания турбулентных пульсаций. Задача решалась в рамках нестационарного изотермического подхода.

Уравнения движения в тензорной форме записи имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \right], \end{aligned} \quad (3.3.3.1)$$

где  $\rho$  – плотность,  $u_i$  – компоненты вектора скорости ( $i=1, 2, 3$ ),  $\mu$  – кинематическая вязкость.

Турбулентная вязкость  $\mu_t$  является функцией кинетической турбулентной энергии  $k$  и скорость диссипации этой энергии  $\varepsilon$ :  $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ ,  $C_\mu$  – константа.

Для описания турбулентных течений использовалась  $k-\varepsilon$  модель. Уравнения для турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon v_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3.3.3.2)$$

где  $G_k$  - генерации турбулентной кинетической энергии за счет среднего градиента скорости,  $G_b$  - генерация турбулентной кинетической энергии за счет плавучести,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  - константы,  $\sigma_k$  и  $\sigma_\varepsilon$  - турбулентные числа Прандтля  $k$  и  $\varepsilon$ , соответственно.

Стратификация за счет изменения температуры воды учитывалась следующим образом:

$$G_b = g_i \left( \beta \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \quad (3.3.3.3)$$

где  $\mu_t$  - турбулентная вязкость, которая определяется следующим образом:  
 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ , где  $C_\mu$  - константа.

Турбулентный перенос тепла моделируется с использованием модели Рейнольдса аналогично турбулентному переносу импульса. Уравнение для энергии имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right), \quad (3.3.3.4)$$

где  $E = ch + \frac{p}{\rho}$  - полная энергия,  $h = C_p T$  - энтальпия системы,  $k_{eff}$  - эффективная теплопроводность и  $(\tau_{ij})_{eff}$  - девиатор тензора напряжений, определенный, как

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}. \quad (3.3.3.5)$$

где  $\mu_{eff} = k_{eff} Pr / C_p$  - эффективная вязкость, эффективная теплопроводность определяется как  $k_{eff} = \kappa + C_p \mu_t / Pr_t$ ,  $\kappa$  - коэффициент теплопроводности.

Для оценки эффективности применения  $k-\varepsilon$  модели турбулентности, были проведены тестовые расчеты с использованием модели более высокого порядка – модели напряжений Рейнольдса, в которой решаются семь дополнительных уравнений. Было установлено, что отличие в полученных данных составляет не более 5%, в связи с чем для дальнейшего исследования использовалась  $k-\varepsilon$  модель.

Течение рассматривалось как неизотермическое, при этом зависимость плотности от температуры считалась линейной, применялось приближение Буссинеска. Начальные условия соответствовали однородной по глубине температуре и скорости течения.

На входе расчетной области задавались постоянная скорость течения и температура воды (VELOCITY-INLET). На выходе расчетной области вблизи водозабора ставились «мягкие» граничные условия (OUTFLOW). На свободной поверхности жидкости ставились граничные условия отсутствия касательных напряжений (WALL).

Значения параметров  $Pr_t, Sc_t, G_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$  брались следующими:  $Pr_t = 0.85, Sc_t = 0.7, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ . Кинематическая вязкость принималась равной  $\mu = 9.34 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , коэффициент молекулярной диффузии  $D = 1.0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Для пространственной дискретизации уравнений использовалась схема второго порядка точности. Временная эволюция моделировалась по явной схеме второго порядка.

На границах расчетной области задавались следующие граничные условия:

- на дне водохранилища и на ее берегах ставились условия прилипания и постоянства температуры.

$$u_1 = u_2 = u_3 = 0, \quad T = T_0,$$

- на входе расчетной области задавалась постоянная скорость основного потока, имеющая одну ненулевую компоненту. Температура задавалась равной фоновой температуре:

$$u_i = V_i, \quad T = T_0,$$

- в местах забора и сброса воды задавались постоянная скорость воды и постоянная температура

$$\text{на входе рабочего канала } u_i = V_{\text{забора}_i}, \quad T = T_0,$$

$$\text{на выходе рабочего канала } u_i = V_{\text{сброса}_i}, \quad T = T_{\text{сброса}},$$

- верхняя граница жидкости считалась свободной, на ней учитывалось воздействие ветра, задавались касательные напряжения в соответствии с формулой Экмана и задавался линейный закон теплоотдачи, учитывающий нагрев поверхности от окружающего воздуха, коэффициент теплоотдачи выбирался на основании данных полевых измерений.

Для решения проблемы адаптации существующих морфометрических данных в формате «координата – глубина» к возможностям сеткопостроителя Gambit, была применена процедура «разбиения» морфометрии дна на простые геометрические объекты с некоторым заданным разрешением и описанием их

затем в командном файле задания. Была написана программа, позволяющая по массиву данных, описывающих морфометрию дна водного объекта, выводить командный файл задания для генератора сеток Gambit, входящий в вычислительный пакет ANSYS Fluent. Таким образом, была реализована сложная геометрия вычислительной области. Созданная программа имеет общий характер и применима к построению подобных геометрий и в других задачах.

Предварительно была отработана методика получения приемлемого численного решения с использованием пакета Fluent применительно к данной задаче. Сначала находилось стационарное решение задачи при наличии тяжести без учета воздействия ветра. Решение быстро сходилось за несколько сотен итераций. Затем решение получалось в рамках нестационарного подхода при наличии ветра с шагом по времени две секунды.

К проведению данных расчетов, в рамках выполнения совместных проектов, были привлечены сотрудники лаборатории вычислительной гидродинамики ИМСС ПФИЦ УрО РАН.

## **ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ СТОКОВ ПЕРМСКОЙ ГРЭС**

### **4.1. Постановка задачи и анализ принятых сценариев**

Исходя из особенностей хозяйственного использования центральной части Камского водохранилища, где располагается Пермская ГРЭС, основными лимитирующими водопользователями, являются рыбное хозяйство, рекреация, а также сама Пермская ГРЭС, которая формируют требования не только по количеству, но и качеству забираемой воды. Рекреационные требования формируются активным использованием водохранилища ниже ГРЭС для целей отдыха в г. Добрянка.

В связи с этим модельные гидродинамические расчеты необходимо было провести с оценкой наиболее критических ситуаций для отдельных видов водопользования. Определение допустимых нагрузок, как на рыбохозяйственные объекты, так и на Камское водохранилище, не используемое для производства лососевых, сиговых видов рыб, согласно действующим нормативно-методическим документам не допускается повышение температуры более чем 28 °С в летний период [Приказ Минсельхоза России №552, 2017].

В то же время, согласно СанПиН 2.1.5.980-00, устанавливаются требования к качеству воды для целей рекреации: «летняя температура воды в результате сброса сточных вод не должна повышаться более, чем на 3 °С по сравнению со среднемесячной температурой воды самого жаркого месяца года за последние 10 лет». Таким образом, в зоне рекреации допускается повышение температуры воды над фоновым значением самого жаркого месяца не более, чем на 3 °С.

Исходя из действующих рыбохозяйственных и санитарно-гигиенических нормативов, необходимо было оценить максимальные зоны возможного повышения температуры воды в наиболее жаркий период.



Кроме этого, в связи с тем, что наиболее значительные зоны рекреации (г. Добрянка) расположены к югу от ГРЭС, необходимо было оценить размеры зон теплового загрязнения при различном режиме ГРЭС при северо-западном ветре, так как при этих условиях наиболее вероятно тепловое воздействие на эти зоны.

В то же время существенное значение представляет оценка возможности и масштабов попадания сбрасываемых термальных стоков в подводный канал. Поэтому наряду с проведением модельных расчетов при северо-западном направлении ветра также были проведены расчеты при юго-восточном ветре, когда наиболее велика вероятность попадания сбрасываемых стоков в подводный канал. Процессы формирования зон теплового загрязнения в водохранилище весьма инертны, поэтому расчеты должны будут проводиться при ветре, характеризующемся значительной повторяемостью и продолжительностью.

После проведения соответствующих верификационных расчетов и адаптации моделей, необходимо было разработать соответствующие расчетные (модельные) сценарии. Данные сценарии должны учитывать, как опыт и перспективы эксплуатации Пермской ГРЭС, так и изменчивость метеоэлементов за многолетний период, отражать результаты воздействия, как при наиболее неблагоприятных условиях, так и при «штатном» режиме работы. В целом, все сценарии были ориентированы на оценку максимальной зоны теплового воздействия.

Разработанные сценарии были согласованы Фондом "Энергия без границ" (письмо ФЭ/ВМ/509 от 06.10.2014). В результате доработки и согласований они были приняты в следующем виде:

**1 сценарий.** Цель – оценка максимальной зоны теплового воздействия, для наиболее неблагоприятных условий и при экстремальных метеопараметрах.

*Технологические характеристики:*

- 4 работающих энергоблока (3 паросиловых и 1 строящийся парогазовый).

- Расход сброса – 63,0 м<sup>3</sup>/сек, температура сбрасываемой воды 32,4 °С.

***Гидрологические и метеорологические параметры:***

- Уровень воды – НПУ в створе КамГЭС 108,5 м абс.;
- Расход воды в створе в 10 км выше г. Добрянка 850 м<sup>3</sup>/сек. Температура забираемой воды - 21,8 °С. Ветер - СЗ 8 м/сек.
- Период расчета (воздействие условий) - 3 суток.

**2 сценарий.** Цель – оценка вероятности (времени) поступления сбрасываемых подогретых вод в подводный канал Пермской ГРЭС при экстремальных метеопараметрах.

***Технологические параметры:***

- Аналогично сценарию №1.

***Гидрологические и метеорологические параметры:***

- Аналогично сценарию №1, за исключением направления ветра. Ветер принимается ЮВ - 8 м/сек

**3 сценарий.** Цель – оценка зоны теплового загрязнения при "штатном" режиме работы Пермской ГРЭС и при наиболее вероятных метеорологических и гидрологических условиях.

***Технологические параметры:***

- Три работающих энергоблока (2 паросиловых и 1 парогазовый);
- Расход сброса - 42,5 м<sup>3</sup>/сек (максимальный зафиксированный расход сброса за время эксплуатации Пермской ГРЭС);
- Температура сбрасываемой воды - 32,4 °С.

***Гидрологические и метеорологические параметры:***

- Уровень воды – НПУ в створе КамГЭС 108,5 м абс.;
- Расход воды в створе в 10 км выше г. Добрянка – 850 м<sup>3</sup>/сек;
- Температура забираемой воды - 21,8 °С. Ветер - СЗ 3 м/сек;
- Период расчета (воздействие условий) - 3 суток.

**4 сценарий.** Цель – определить зону теплового воздействия при южных ветрах при наиболее вероятных метеорологических и технологических параметрах.

***Технологические параметры:***

- аналогично сценарию №3.

***Гидрологические и метеорологические параметры:***

- аналогично 3 сценарию, за исключением направления ветра - ветер ЮВ 3 м/сек.

**5 сценарий.** Цель – анализ и оценка редкого, маловероятного сценария.

***Технологические параметры:***

- Два работающих энергоблока (1 паросиловой и 1 парогазовый);
- Расход сброса – 21,8 м<sup>3</sup>/сек, температура сбрасываемой воды 32,4 °С;
- Температура забираемой воды - 21,8 °С.

***Гидрологические и метеорологические параметры:***

- Ветер - СЗ 3 м/сек. Период расчета - 2 суток.

Все расчеты производились для лимитирующего (наиболее теплого в данном случае) месяца - июль.

Все расчеты выполнены также с учетом боковой приточности на рассматриваемом участке (р. Тюсь - 2,4 м<sup>3</sup>/с, р. Добрянка - 12 м<sup>3</sup>/с) (рисунок 1.4.2).

#### **4.2. Результаты гидродинамических расчетов в рамках 2D-модели**

Разработанная и верифицированная по результатам серии натурных измерений модель была использованы для анализа и уточнения границ распространения тепловых полей в Камском водохранилище для различных «модельных-сценарных» метеорологических и гидрологических условий с учетом различных режимов работы Пермской ГРЭС.

В данном случае, двухмерная гидродинамическая (гидротермическая) модель позволяет оценить общую структуру течений (направление и скорость)

и соответствующие им температурные поля. Кроме этого, она служит инструментом для получения начальных и граничных условий для 3D-моделей.

При расчетах пренебрегали технологическими потерями воды, принимая, что сброс воды в отводящий канал Пермской ГРЭС равен забору воды. Тепловые нагрузки на водоем в течение расчетного периода принимались также достаточно равномерными и постоянными.

Гидродинамический расчет и расчет на распространение теплового загрязнения проводим с шагом по времени 30 минут.

**Сценарий 1.** На рисунке 4.2.1 показано векторное поле скоростей в Камском водохранилище, полученное при 1-м сценарном расчете.

**Сценарий 2.** На рисунке 4.2.2 показано векторное поле скоростей в Камском водохранилище, полученное при 2-м сценарном расчете.

Подогретая вода начнет затекать в подводящий канал через 11-12 часов. Период добегаания непосредственно до водозаборных устройств (насосная станция) ~ 19 часов. В свою очередь, в районе г. Добрянка температура воды не изменяется.

**Сценарий 3.** На рисунке 4.2.3 показано векторное поле скоростей в Камском водохранилище, полученное при 3-м сценарном расчете.

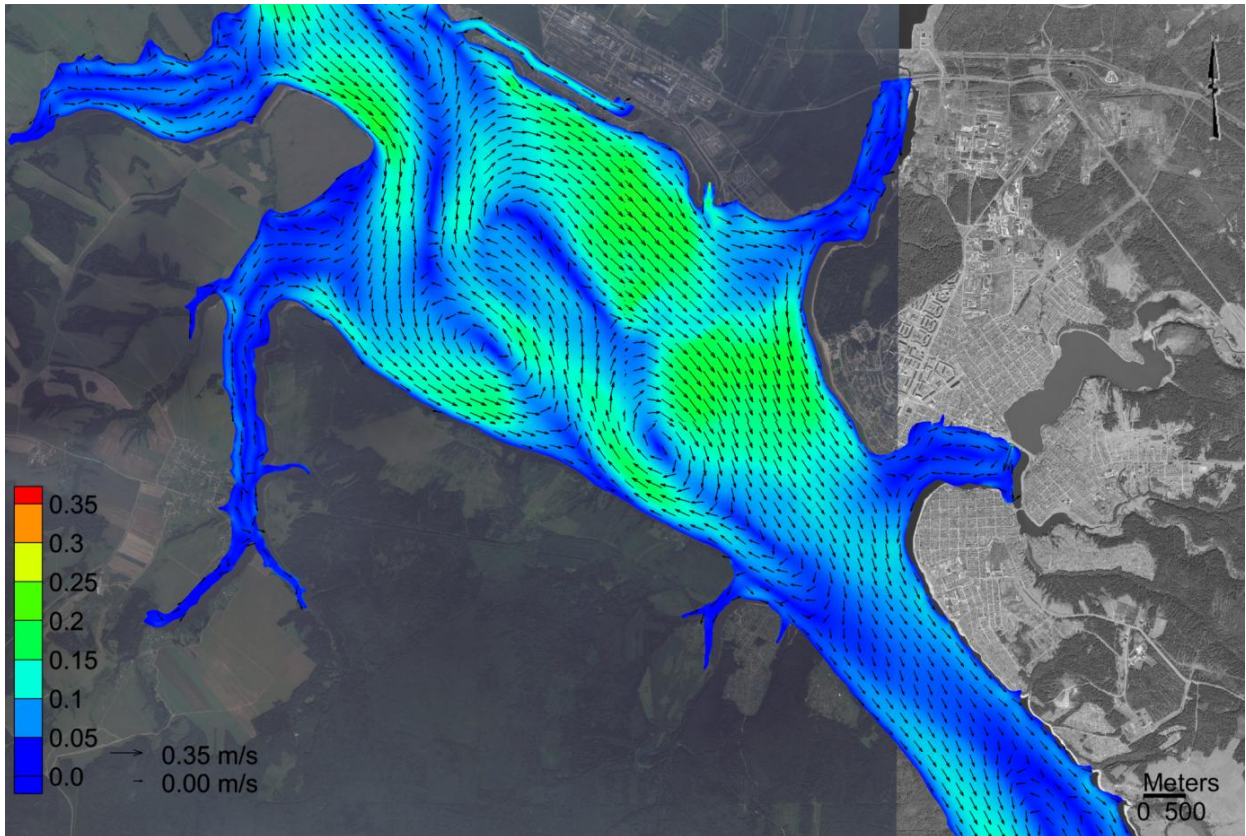
**Сценарий 4.** На рисунке 4.2.4 показано векторное поле скоростей в Камском водохранилище, полученное при 4-м сценарном расчете.

Аналогично второму сценарию подогретые воды также прижимаются к левому берегу и движутся к подводящему каналу, но с меньшей скоростью. Средняя скорость движения ~ 0,1-0,15 м/сек. Подогретые воды начнут поступать в подводящий канал через 23-25 часов, к водозаборным устройствам ~ 38-40 часов.

**Сценарий 5.** На рисунке 4.2.5 показано векторное поле скоростей в Камском водохранилище, полученное при 5-м сценарном расчете.

В данном случае, результаты 2D моделирования позволяют наиболее адекватно оценить общую структуру течений (направление и скорость) и соответствующие им температурные поля. Кроме этого, она служит

инструментом для получения начальных и граничных условий для трехмерных моделей. Оценивать температурное воздействие на Камское водохранилище, главным образом, следует по результатам 3D-моделирования, которые будут приведены ниже.



*Рисунок 4.2.1. Векторное поле скоростей в Камском водохранилище, при Исценарном расчете*

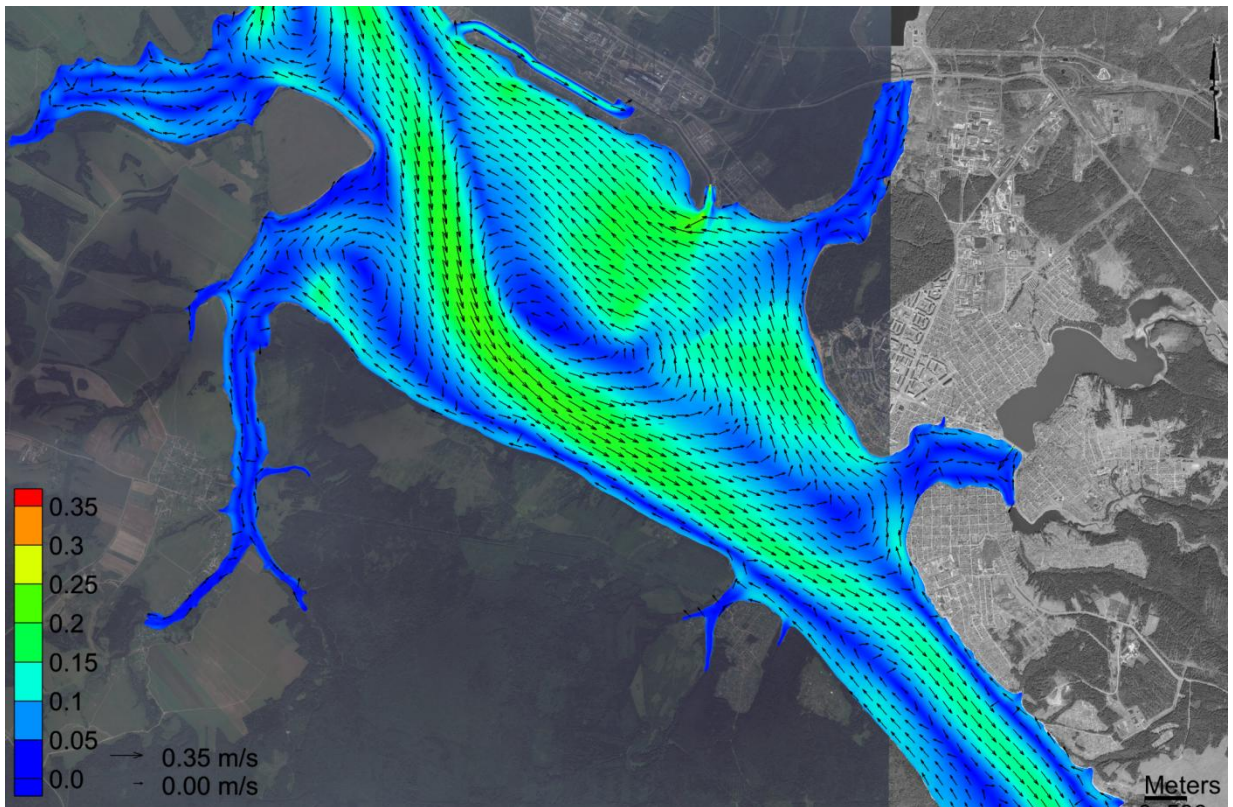


Рисунок 4.2.2. Векторное поле скоростей в Камском водохранилище, при 2 сценарном расчете

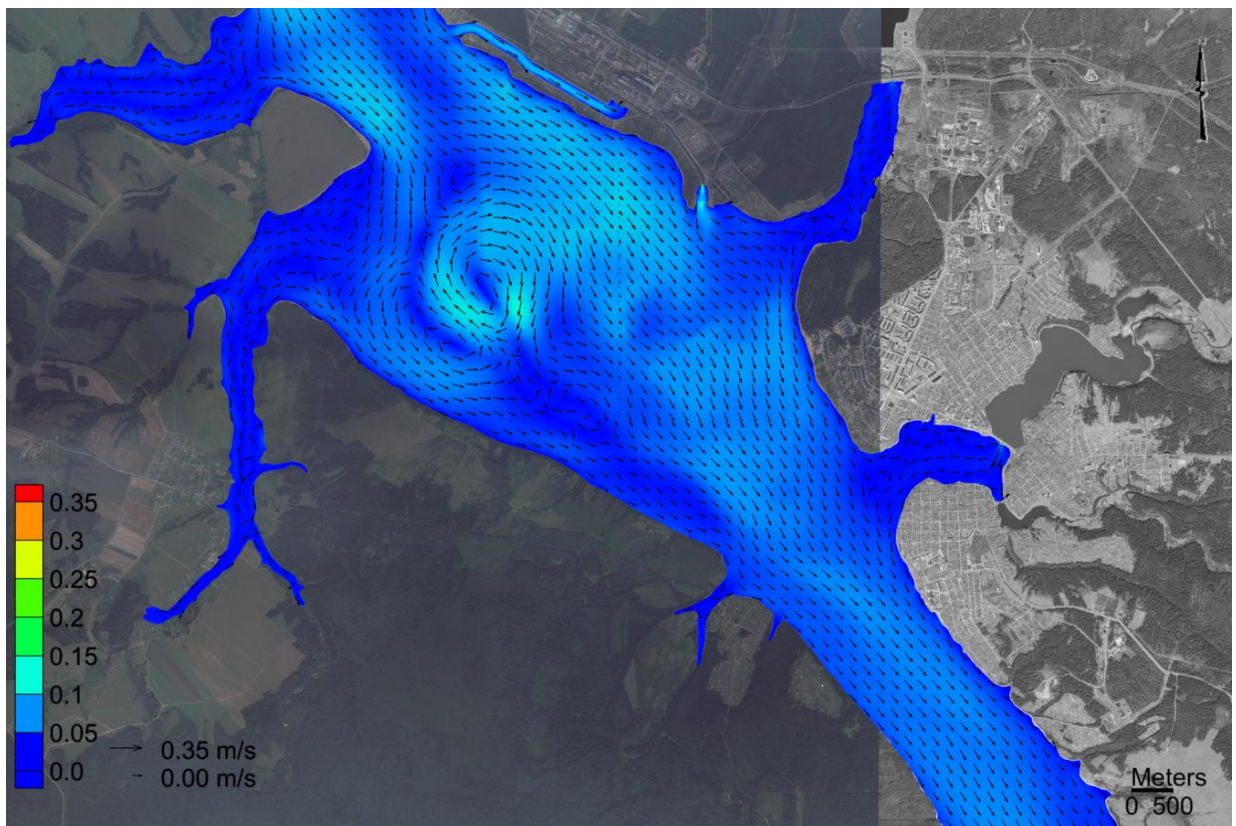


Рисунок 4.2.3. Векторное поле скоростей в Камском водохранилище при 3 сценарном расчете

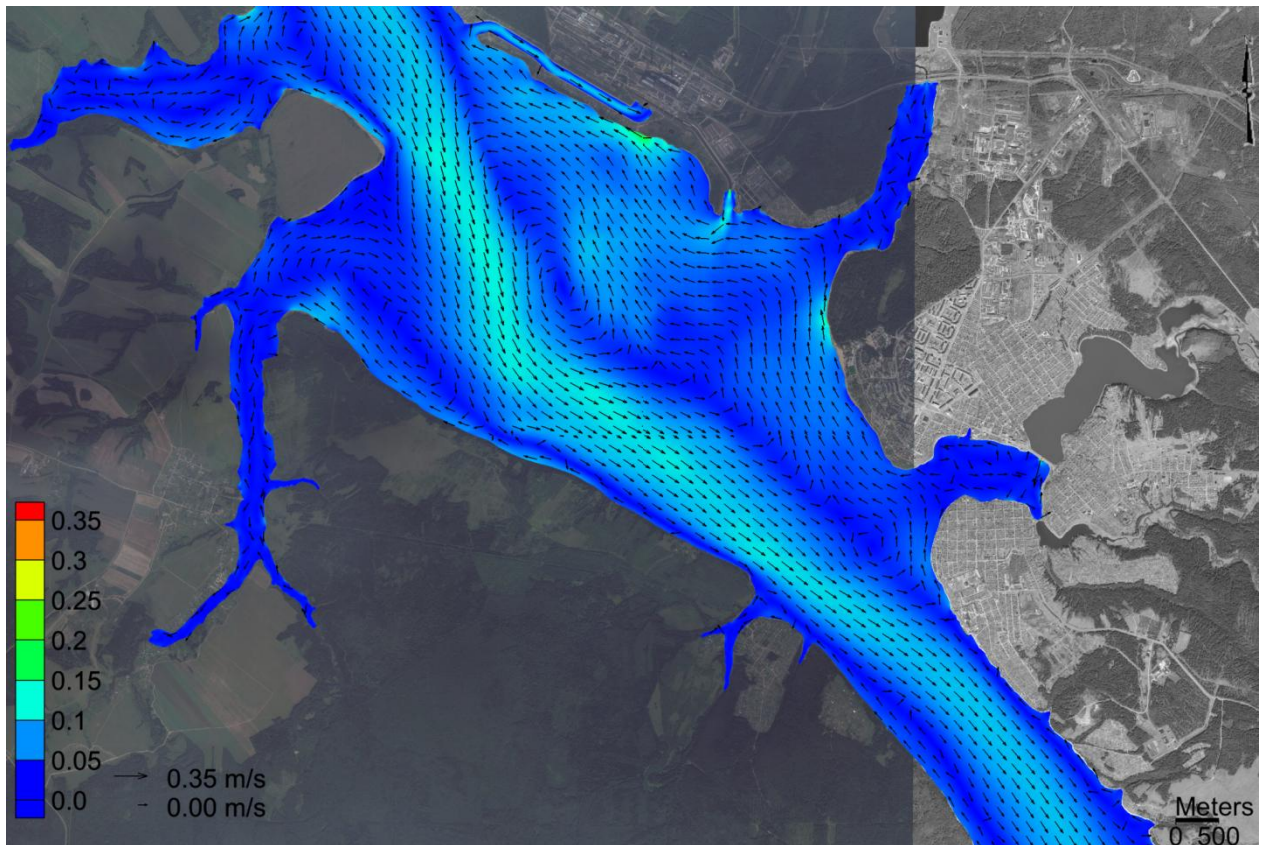


Рисунок 4.2.4. Векторное поле скоростей в Камском водохранилище при 4 сценарном расчете

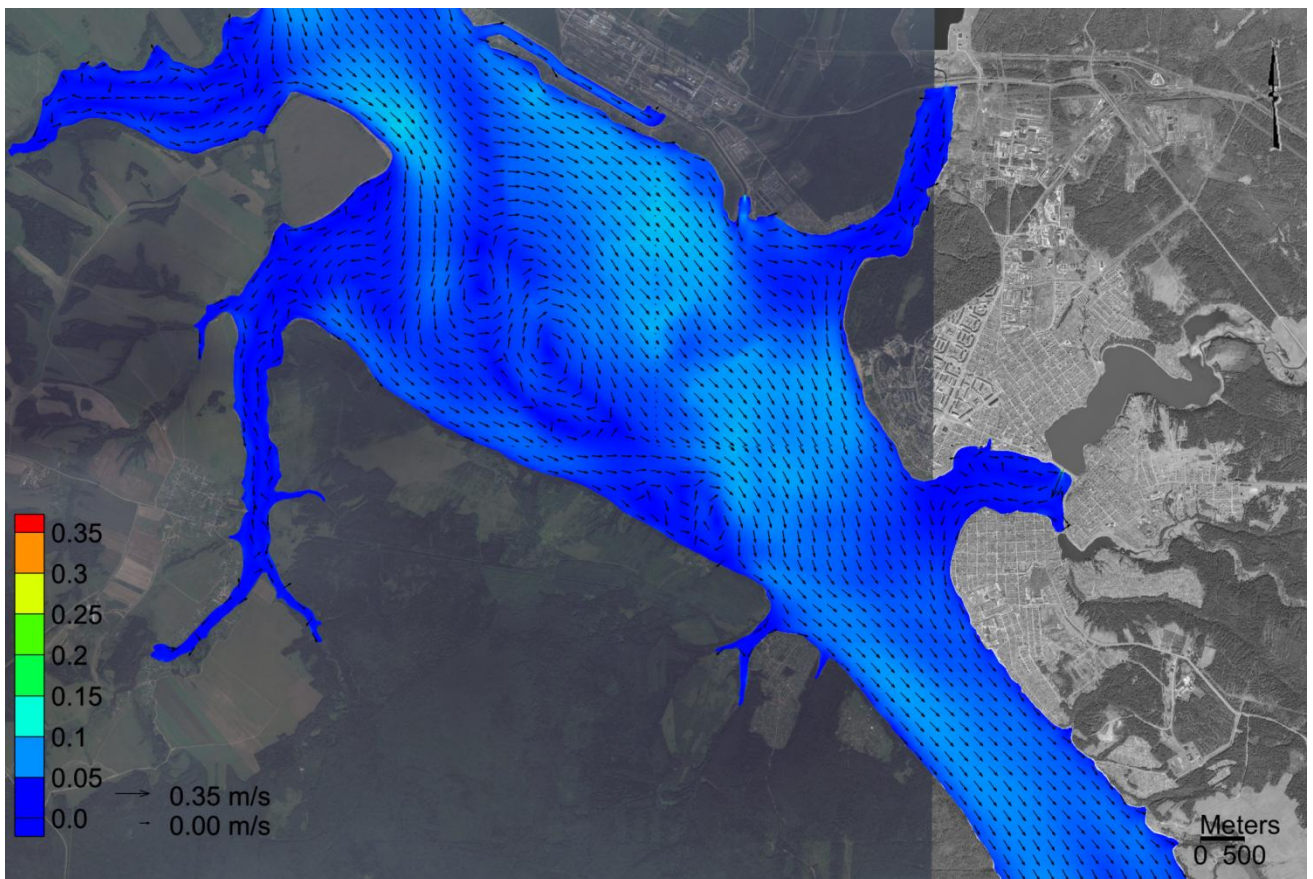


Рисунок 4.2.5. Векторное поле скоростей в Камском водохранилище при 5 сценарном расчете

### 4.3. Результаты гидротермических расчетов в рамках 3D-модели

Определяющим критерием эффективности моделей в прикладных областях знаний, в том числе гидрологии, является «близость» расчетных и фактических значений.

Наиболее отработана процедура оценки близости расчетных и фактических значений в задачах прогнозирования на основе использования критерия Нэша-Сатклифа NSE, систематической ошибки BIAS.

При этом критерий NSE оценивается как:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_{fi} - T_{si})^2}{\sum_{i=1}^N (T_{fi} - \bar{T}_f)^2} \quad (4.3.1)$$

где  $T_{fi}, T_{si}$  – соответственно фактические и расчетные значения параметра  $T$ , а BIAS:

$$BIAS = \frac{\bar{T}_f - \bar{T}_s}{\bar{T}_f} * 100\% \quad (4.3.2)$$

Характерной особенностью данных критериев является то, что они построены с применением операции осреднения по всему массиву расчетных значений. Такой подход корректен относительно однородных величин, когда, исходя из условий задачи, все значения однородны и однозначны для принятия решений.

В общем случае при решении прикладных задач критерии близости расчетных и фактических значений должны строиться, исходя из их особенностей.

При решении задачи расчета температурных полей в 3D-постановке получаем 3-мерный массив расчетных величин. Исходя из решаемой задачи, оценки масштабов теплового воздействия энергетических комплексов на водные объекты для потребителей критическое значение имеют не все значения, а только те, которые относятся к лимитирующим зонам для конкретного вида водопользования.

При производственно-техническом использовании водного объекта критически важным является оценка максимальных отклонений температуры воды в зоне водозаборных оголовков, а для оценки последствий экологических



воздействий необходимы интегральные оценки зон возможного повышения температур.

В то же время, исходя из поставленной задачи, если проводить расчеты NSE, BIAS, по вертикалям и горизонталям, расположенным вне зоны активного техногенного воздействия, то  $BIAIS \equiv 0$ , а NSE не будет определен из-за стремления числителя и знаменателя к нулю.

Поэтому для рассматриваемой задачи, адекватность разработанной модели можно оценить по критерию Тейла (Т) [Theil H., 1971]:

$$T = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{\text{наб}} - X_{\text{расч}})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_{\text{наб}}^2 + \sum_{i=1}^n X_{\text{расч}}^2}}$$

где  $X_{\text{наб}}$  – наблюдаемые и  $X_{\text{расч}}$  – расчетные значения температуры

Значение критерия Т изменяется от 0 до 1. При полном совпадении значений  $T=0$ . Так, сопоставление 100 значений (в зоне влияния стоков) на 15 различных вертикалях позволило получить значение параметра  $T=0,11$ , что считается хорошим результатом.

Для верификации результатов трехмерного моделирования были проведены вычисления для тех же гидрометеорологических условий и режима эксплуатации Пермской ГРЭС, что и при верификации 2D-модели. Результаты сверялись с соответствующими измерениями 17 июля 2014 года (рисунок 2.2.2., 4.3.1., 4.3.2).

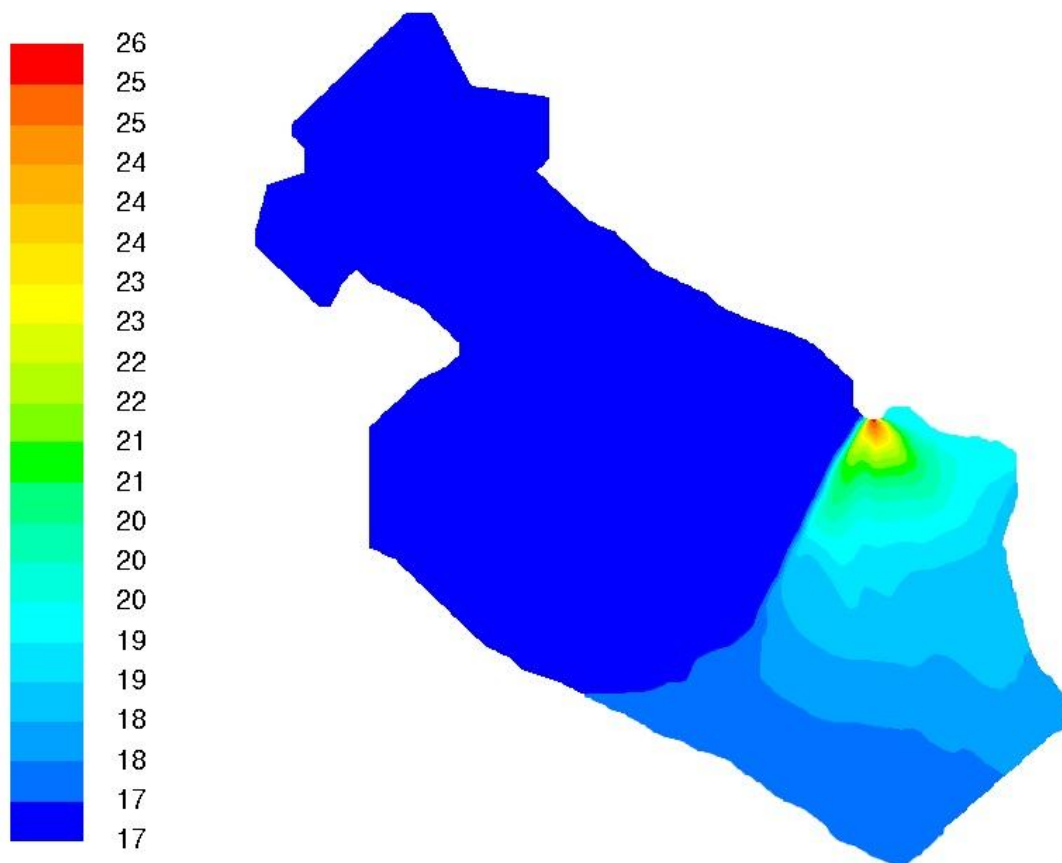


Рисунок 4.3.1. Распределение температуры воды ( $^{\circ}\text{C}$ ) по поверхности Камского водохранилища в районе Пермской ГРЭС при верификационном расчете

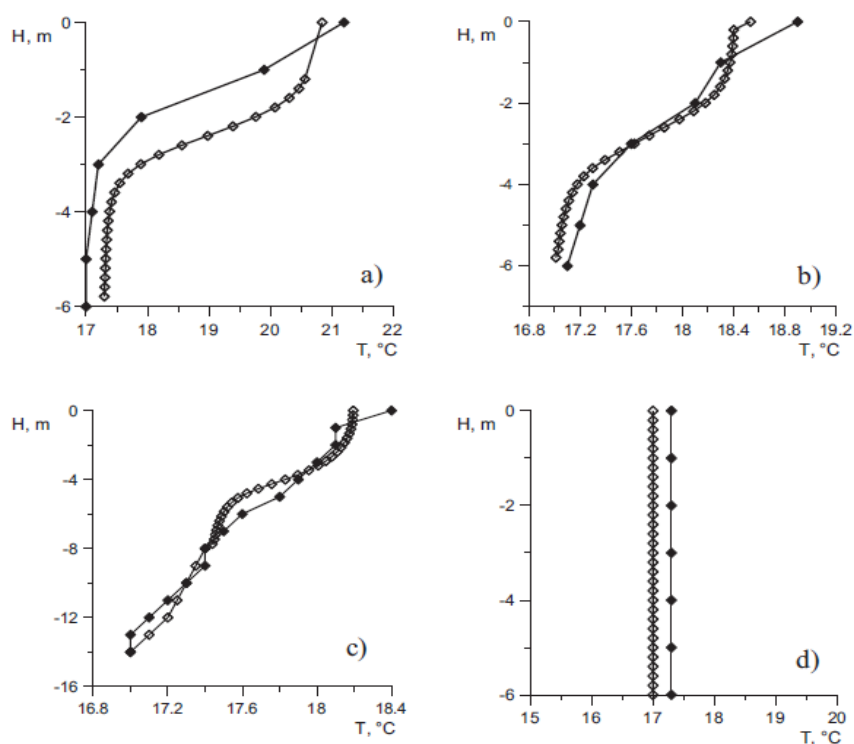


Рисунок 4.3.2. Распределение температуры по глубине на некоторых вертикалях 1.3 (a), 2.3 (b), 3.7 (c), 11.3 (d) по результатам верификационного расчета (полые символы) и результатам натуральных измерений

При решении задач организации селективного отбора воды принципиальное значение имеет расположение слоя скачка. Соответственно, используемая модель в 3D-приближении должна воспроизводить формирование этого слоя. Проведенные модельные расчеты для Камского водохранилища показали, что используемая модель достаточно хорошо воспроизводит расположение слоя скачка (рисунок 4.3.2). Как показали расчеты, различие рассчитанных и наблюдаемых величин не превышают ~ 1 м или 10÷15 % от характерной глубины водного объекта.

Сопоставление данных натуральных измерений и верификационных расчетов показало, что результаты численного моделирования достаточно хорошо согласуются. Поэтому разработанная модель может применяться для дальнейших сценарных расчетов, часть которых приведена ниже.

В результате проведенных вычислений были получены поля температуры и скорости при разных направлениях и скорости ветра, а также количественных характеристиках сброса теплой воды.

#### ***Результаты модельных расчетов при реализации 1 сценария.***

На рисунках 4.3.3-4.3.5 представлено векторное поле течений на разных горизонтах (глубинах). На поверхности структура потока достаточно равномерная и определяется, главным образом, ветровым воздействием. С глубиной (~3 и более метра) структура меняется коренным образом, появляются вихри и противотечения. Их возникновение уже объясняется сложностью морфометрии участка, стоковыми течениями и плотностной неоднородностью водных масс.

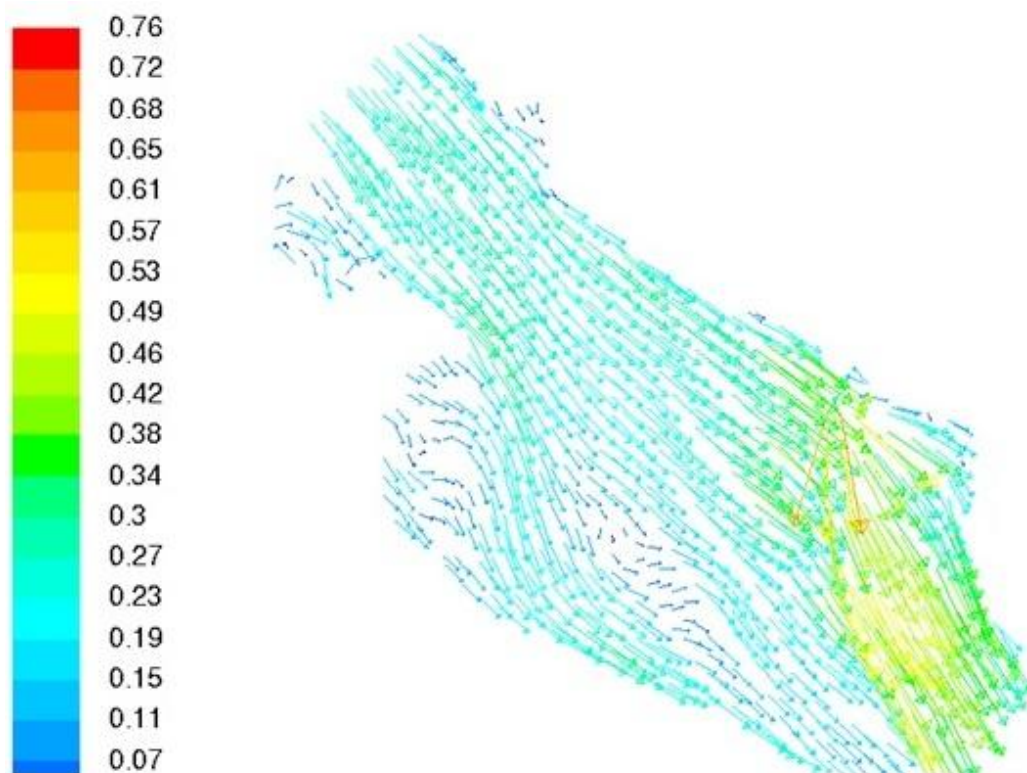


Рисунок 4.3.3. Векторное поле скорости течения воды в поверхностном слое Камского водохранилища при 1 сценарном расчете (шкала скорости в м/сек)

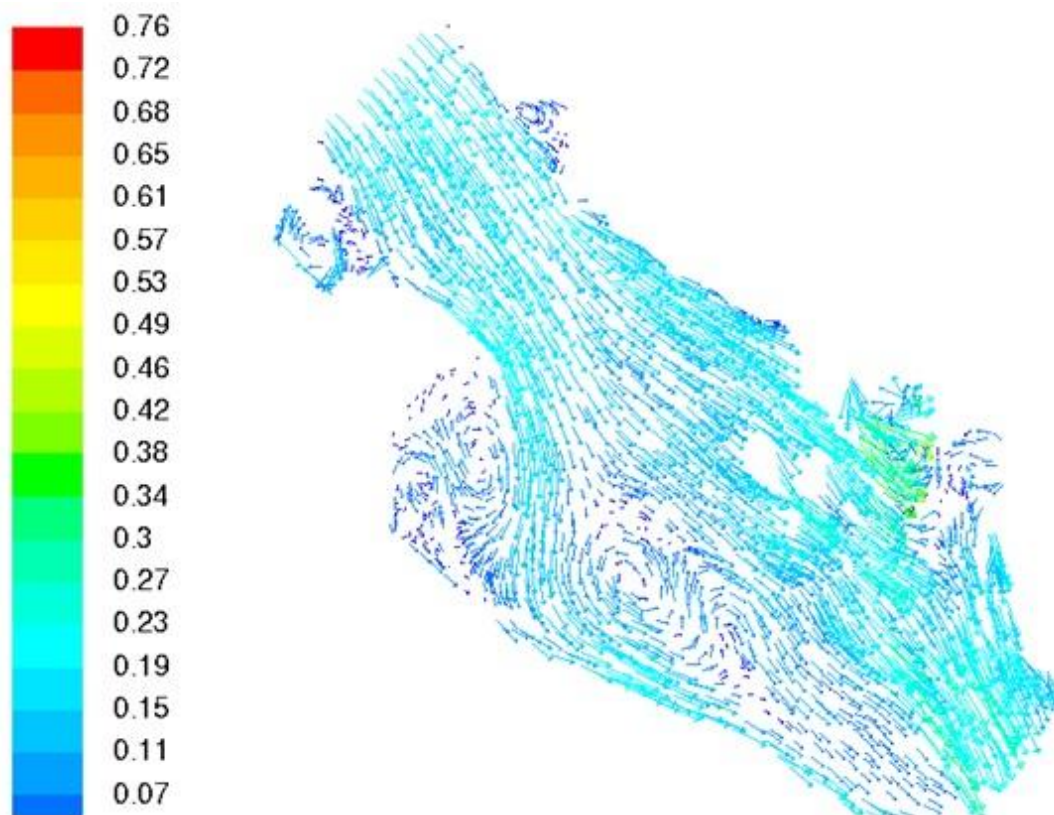
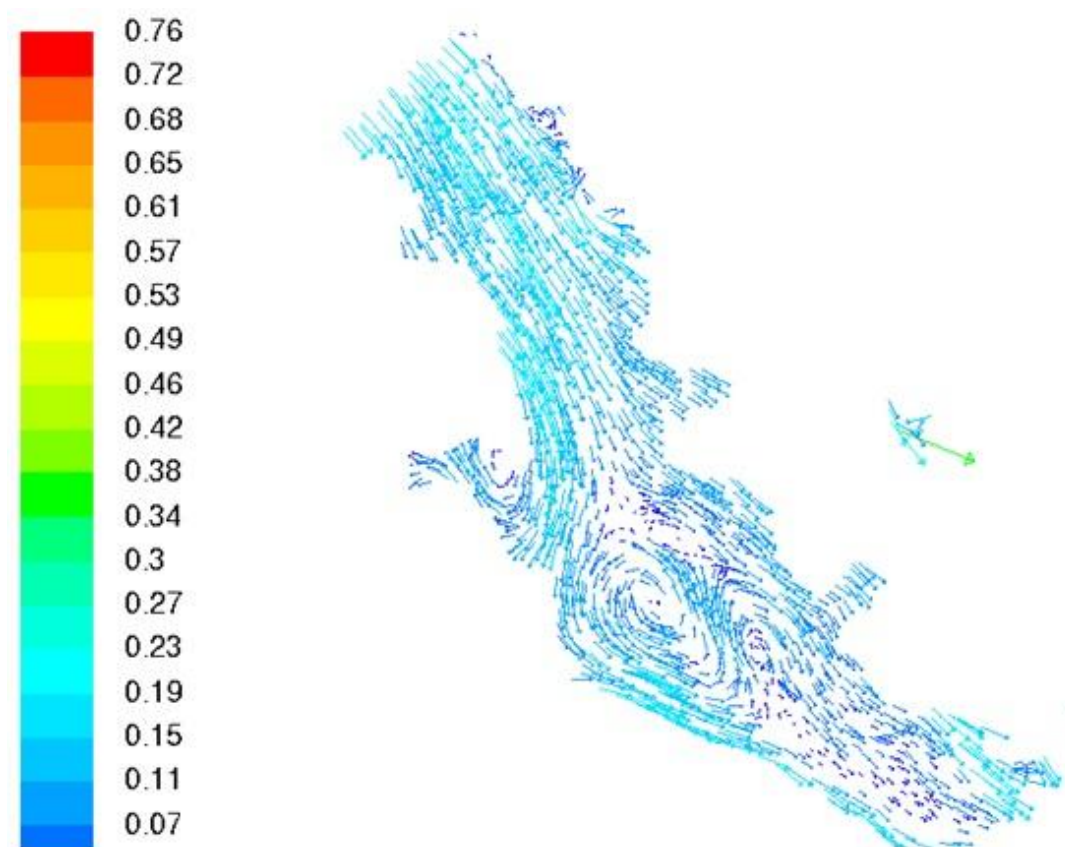


Рисунок 4.3.4. Векторное поле скорости течения воды в Камском водохранилища на глубине 5 м (103,5 м абс.) при 1 сценарном расчете (шкала скорости в м/сек)



*Рисунок 4.3.5. Векторное поле скорости течения воды в Камском водохранилище на глубине 10 м (98,5 м абс.) при 1 сценарном расчете (шкала скорости в м/сек)*

На рисунке 4.3.6 представлено распределение температуры в поверхностном слое при реализации 1 расчетного сценария. На рисунке 4.3.7 приведены эпюры распределения температуры по глубине на некоторых вертикалях. Местоположение вертикалей определяется по рисунку 2.2.1. На эпюрах достаточно четко прослеживается слой (глубина) воздействия подогретых вод. В силу разной плотности теплого сбрасываемого потока и водных масс водохранилища (фон) происходит распластывание подогретых вод по поверхности. Глубина воздействия определяется динамическими параметрами сброса, морфометрическими характеристиками участка и удаленностью контрольной вертикали. Полученные при верификации 3D модели распределения по глубине, имеют хорошую сходимость с данными натурных обследований.

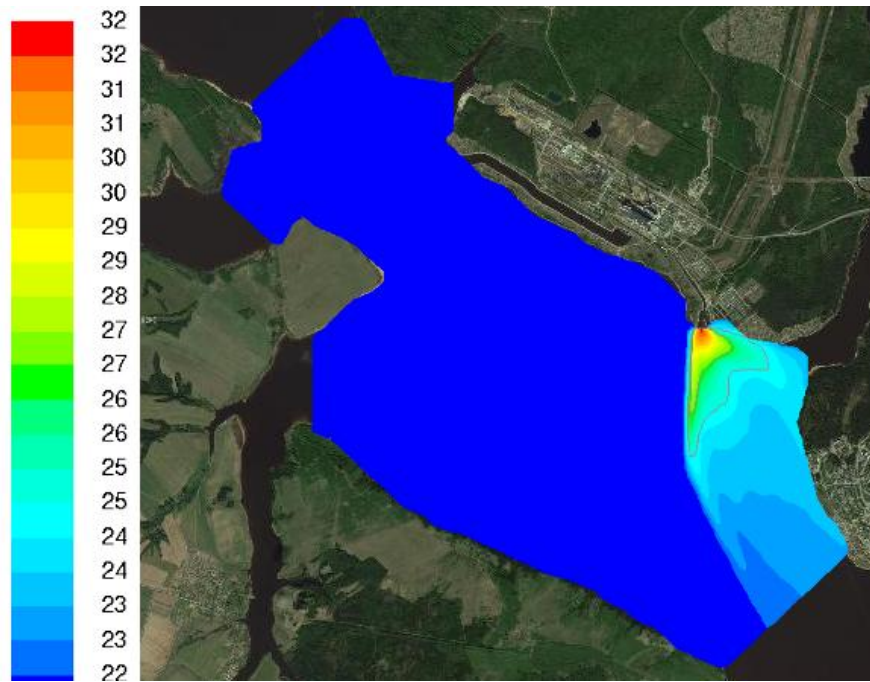


Рисунок 4.3.6. Поле распределения температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в поверхностном слое Камского водохранилища при I сценарном расчете (линиями обозначены границы увеличения температуры на 3 и на  $5^{\circ}\text{C}$  относительно фоновой температуры)

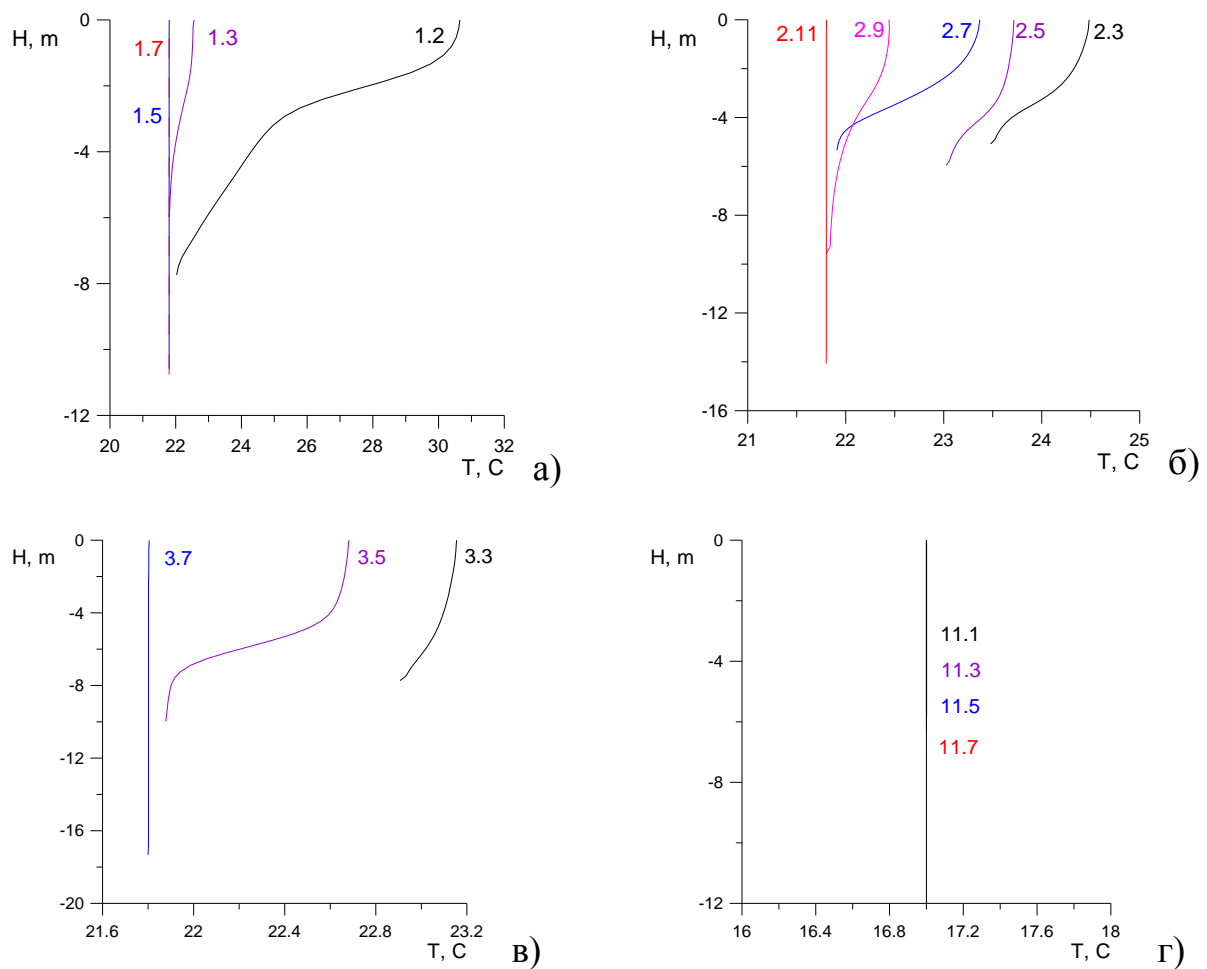
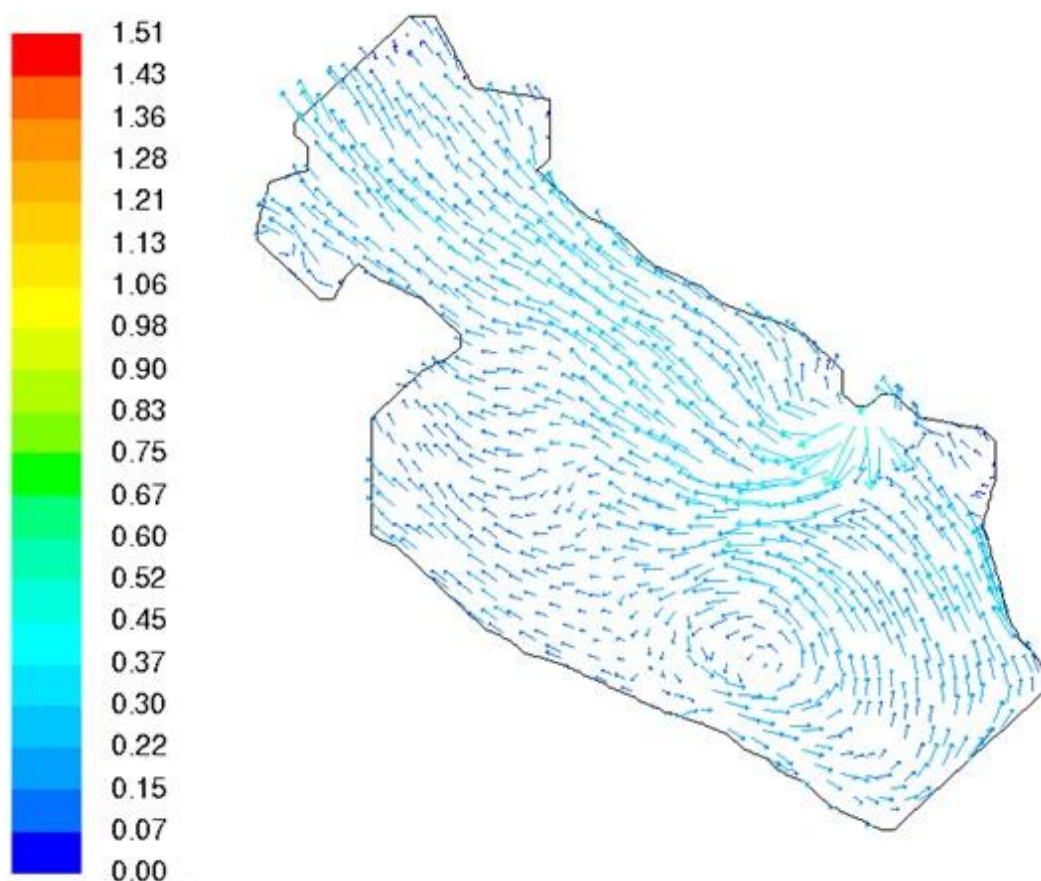


Рисунок 4.3.7. Распределение температуры воды по глубине (эюры) в некоторых контрольных створах при I сценарном расчете а) – первый контрольный створ, б) – второй, в) – третий, г) – одиннадцатый

### ***Результаты модельных расчетов при реализации 2 сценария.***

В поверхностном слое структура течений полностью определяется ветровым воздействием и направлена против движения стоковых течений. Средние скорости  $\sim 0,2-0,3$  м/сек (рисунок 4.3.8). Принципиальные изменения структуры течений происходят на глубине 4-5 м, и в нижней части участка отмечается выраженный трехмерный вихрь, влияние которого распространяется на глубину до 9 м (рисунки 4.3.9-4.3.10). Кроме того, он оказывает влияние на распределение температурного поля, образуя "язык" в нижней части моделируемого участка (рисунок 4.3.11).



*Рисунок 4.3.8. Векторное поле скорости течения в поверхностном слое Камского водохранилища при 2 сценарном расчете (шкала скорости в м/сек)*

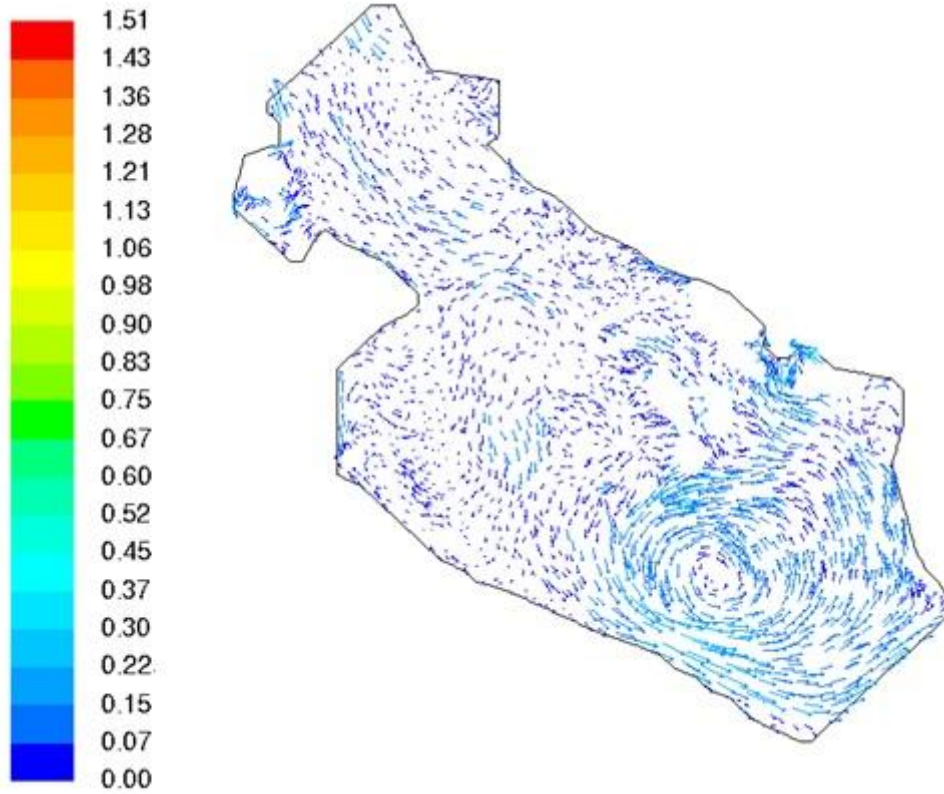


Рисунок 4.3.9. Векторное поле скорости в Камском водохранилище на глубине 5 м (103,5 м абс.) при 2 сценарном расчете (шкала скорости в м/сек)

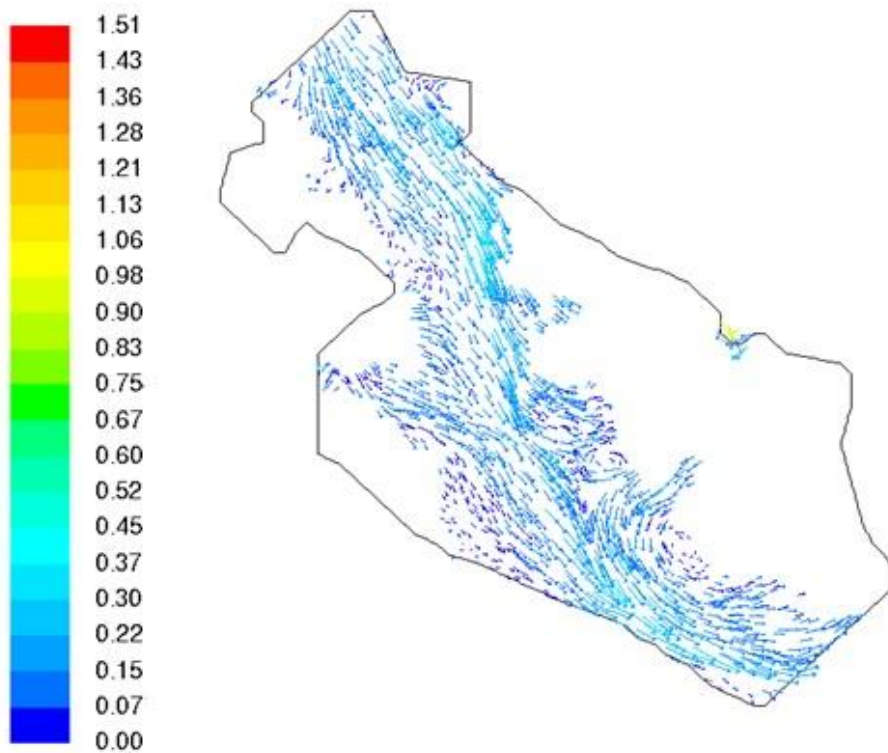
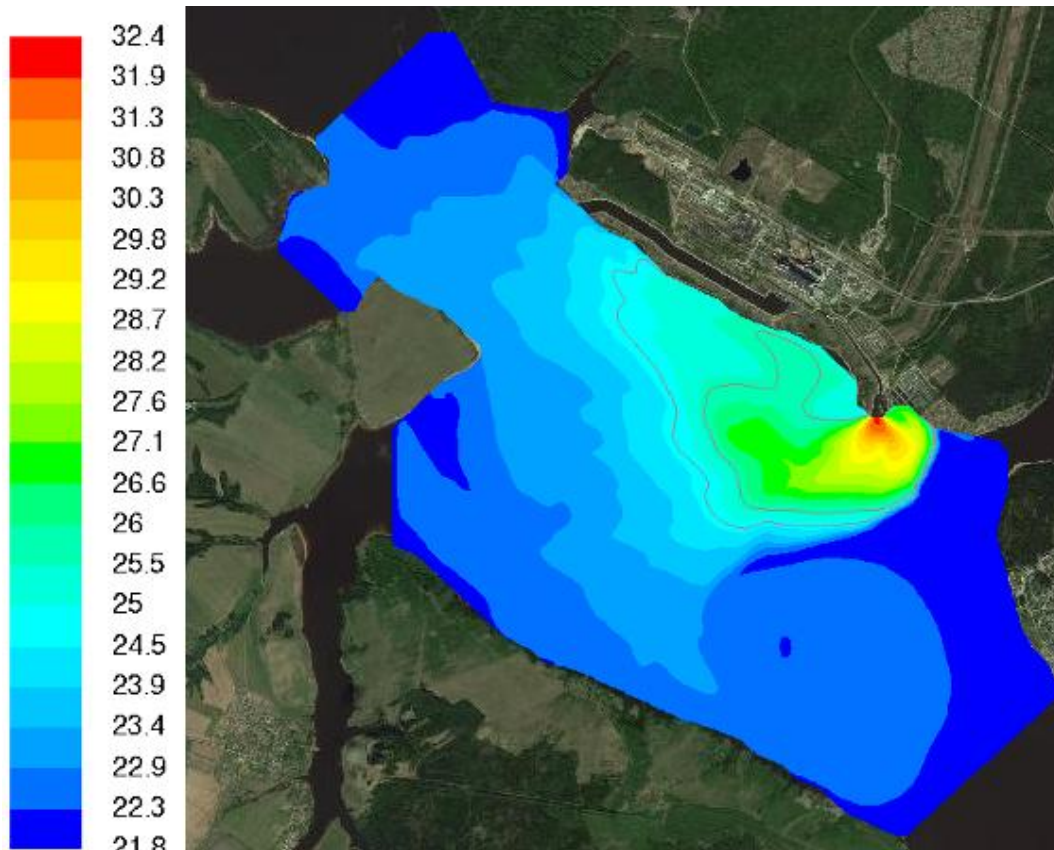


Рисунок 4.3.10. Векторное поле скорости в Камском водохранилище на глубине 10 м (98,5 м абс.) при 2 сценарном расчете (шкала скорости в м/сек)

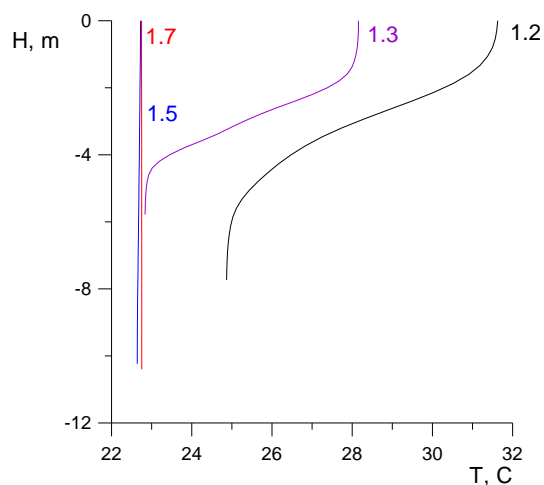




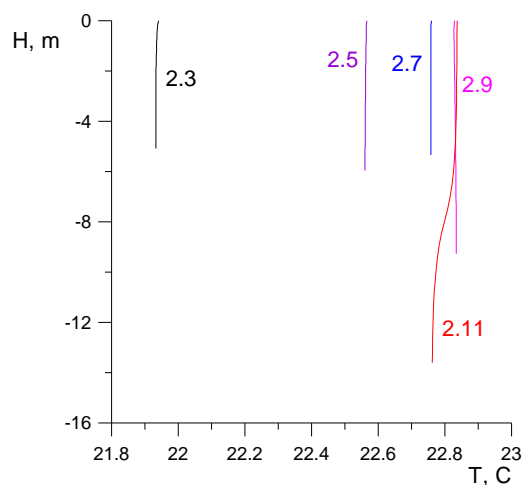
*Рисунок 4.3.11. Поле распределения температуры (°С) в поверхностном слое Камского водохранилища при 2 сценарном расчете (линиями обозначены границы увеличения температуры на 3 и на 5 °С относительно фоновой температуры)*

В целом, при реализации второго сценария наблюдается максимальное тепловое воздействие. Так, увеличение температуры по отношению к фоновым значениям на 3 и 5 °С происходит, соответственно, на акватории площадью ~ 2,8 и 1,5 км<sup>2</sup> (таблица 4.3.1, рисунок 4.3.24).

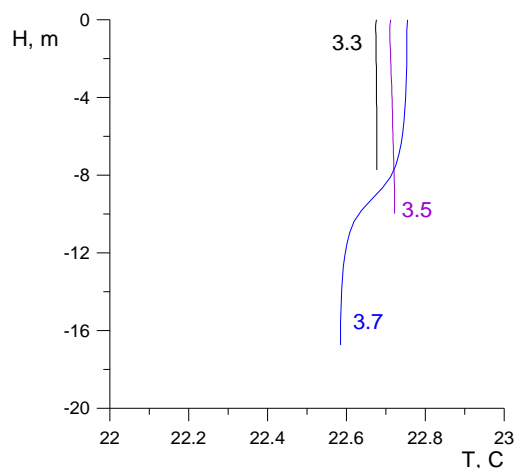
Распределение температуры по глубине представлено на рисунке 4.3.12.



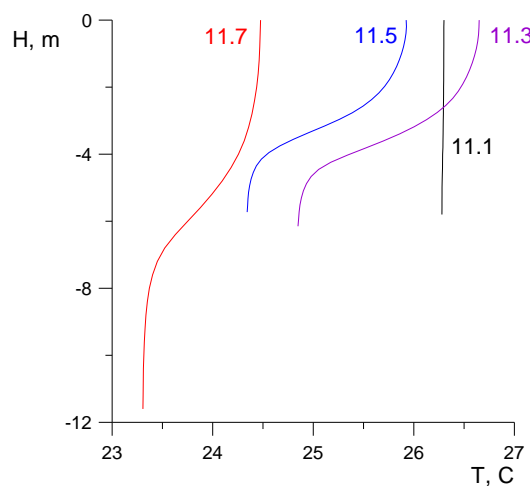
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.3.12. Распределения температуры воды по глубине в некоторых контрольных точках при 2 сценарном расчете а) – первый контрольный створ, б) – второй, в) – третий, г) – одиннадцатый

### **Результаты модельных расчетов при реализации 3 сценария.**

При данных сценарных условиях формирование структуры течений в поверхностном слое определяется уже не только ветровым воздействием (как в 1 сценарии), но и сбросом подогретых вод с Пермской ГРЭС. В целом поток достаточно быстро приобретает однонаправленную структуру. При подходе к зоне смешения поверхностные скорости  $\sim 0,1-0,15$  м/сек. Течения, создаваемые потоком подогретых вод, имеют скорость около  $0,2-0,4$  м/сек (рисунок 4.3.13).

В данном случае, ветер уже не создает достаточно сильного прижимного эффекта и происходит более интенсивное распластывание подогретых вод по

акватории водохранилища и происходит достаточно интенсивное перемешивание вод до глубины 3-4 метров (рисунок 4.3.15). Поэтому площадь, на которой температура увеличивается по отношению к фоновым значениям на 3 градуса и более, составляет около 1,2 км<sup>2</sup>, хотя при реализации 1 сценария (скорость ветра 8 м/с) соответствующая площадь ~ 0,7 км<sup>2</sup> (таблица 4.3.1., рисунок 4.3.24).

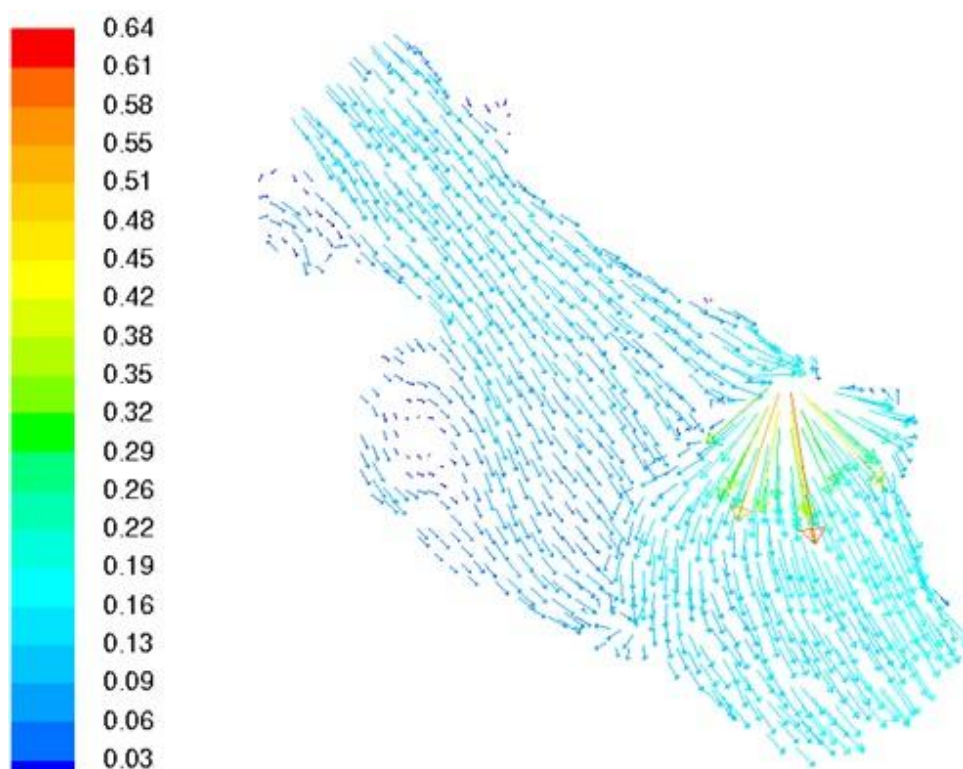


Рисунок 4.3.13. Векторное поле скорости течений в поверхностном слое Камского водохранилища при 3 сценарном расчете (шкала скорости в м/сек)

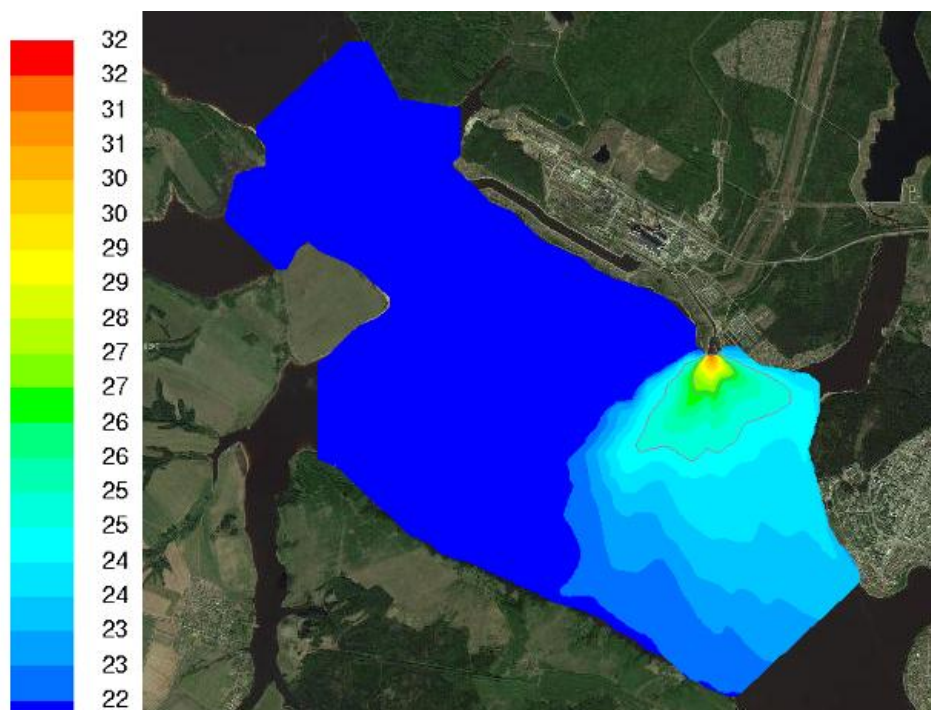


Рисунок 4.3.14. Поле распределения температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в поверхностном слое Камского водохранилища при 3 сценарном расчете (линиями обозначены границы увеличения температуры на 3 и на  $5^{\circ}\text{C}$  относительно фоновой температуры)

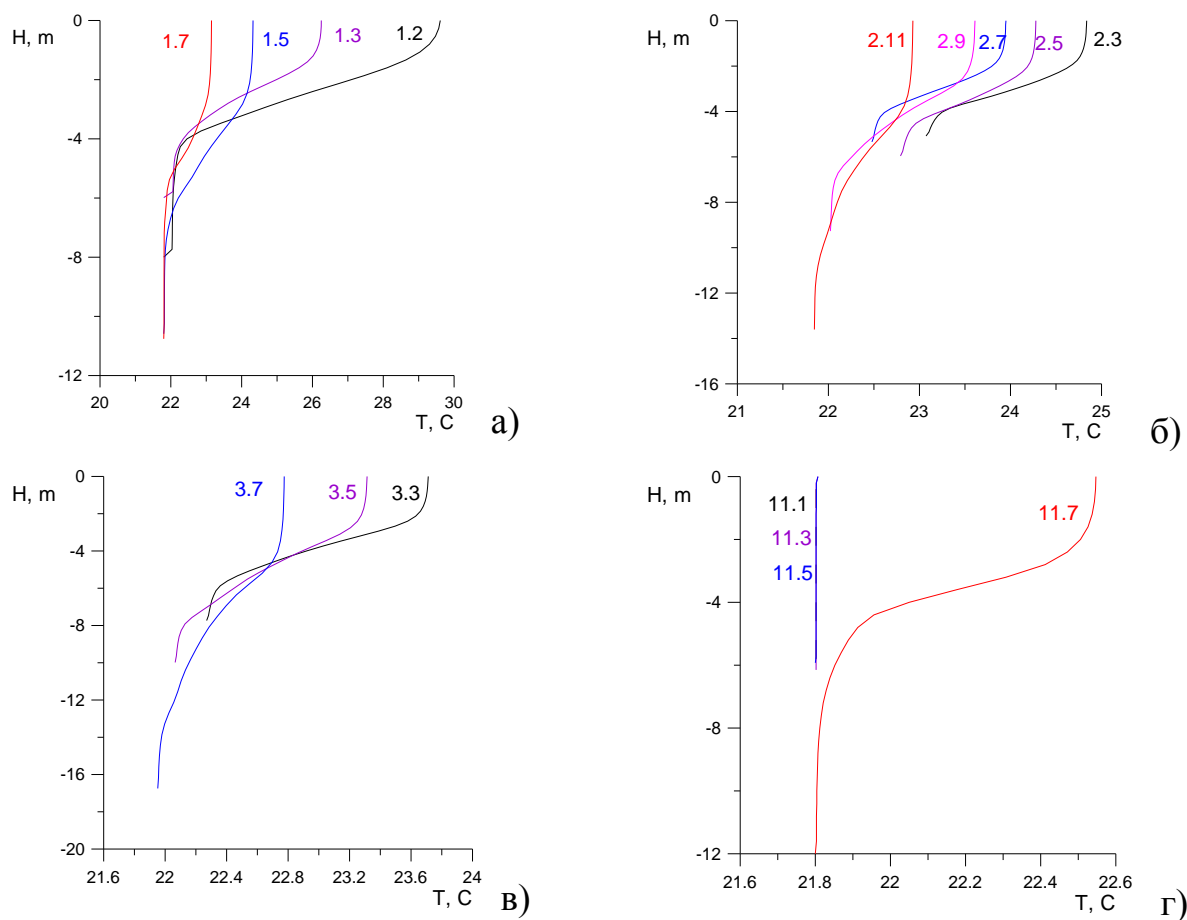
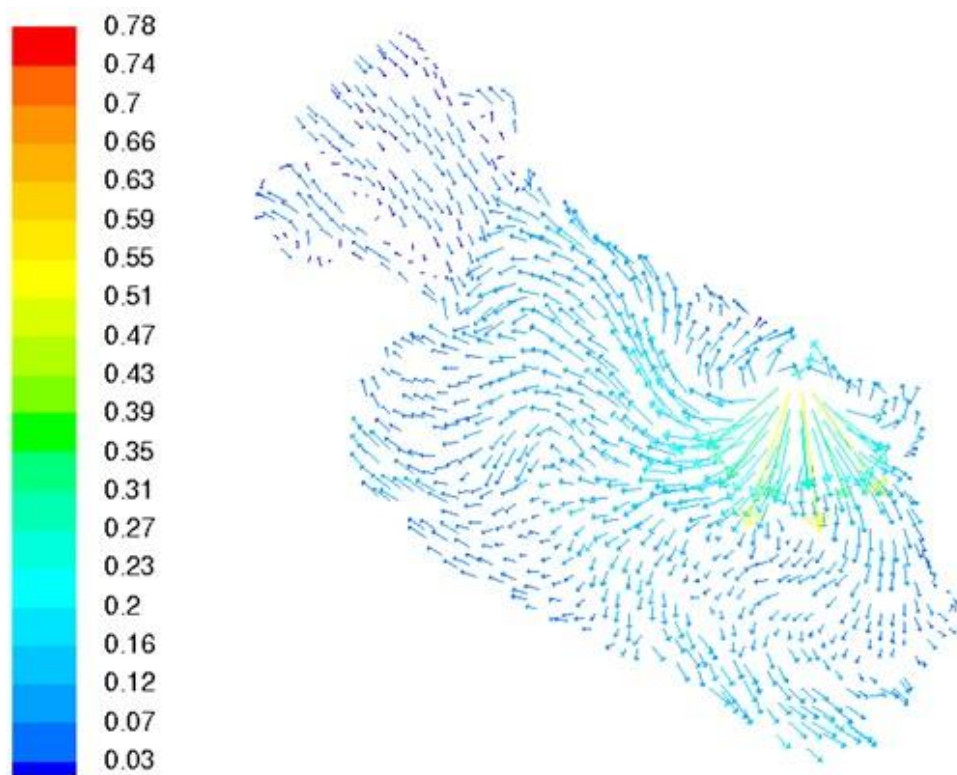


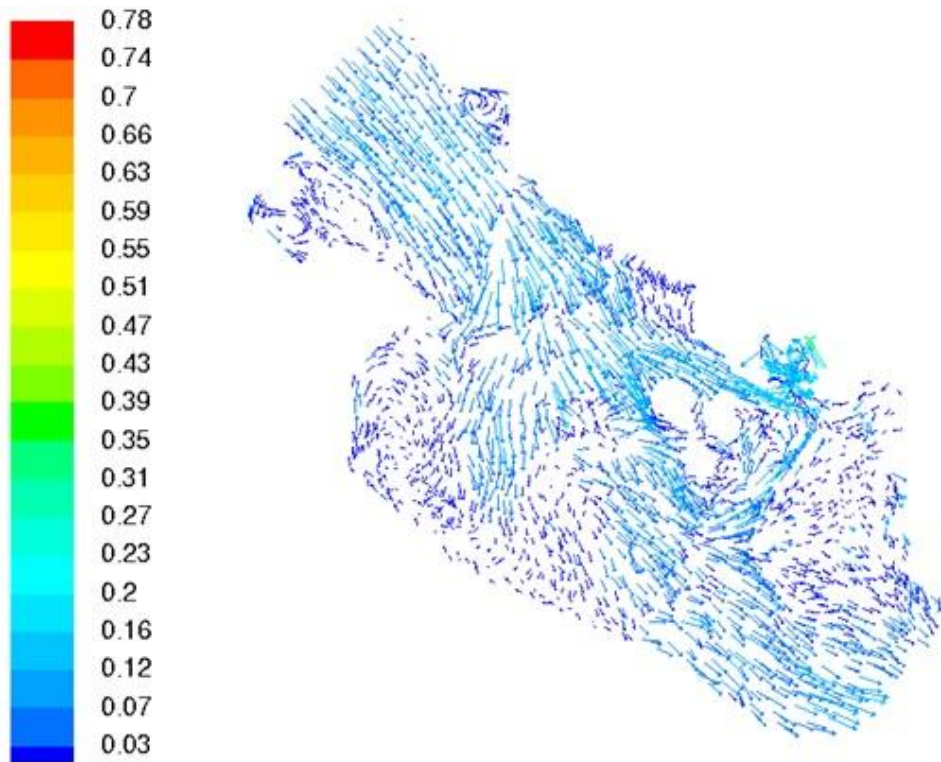
Рисунок 4.3.15. Распределение температуры воды по глубине в некоторых контрольных вертикалях при 3 сценарном расчете а) – первый контрольный створ, б) – второй, в) – третий, г) – одиннадцатый

### *Результаты модельных расчетов при реализации 4 сценария*

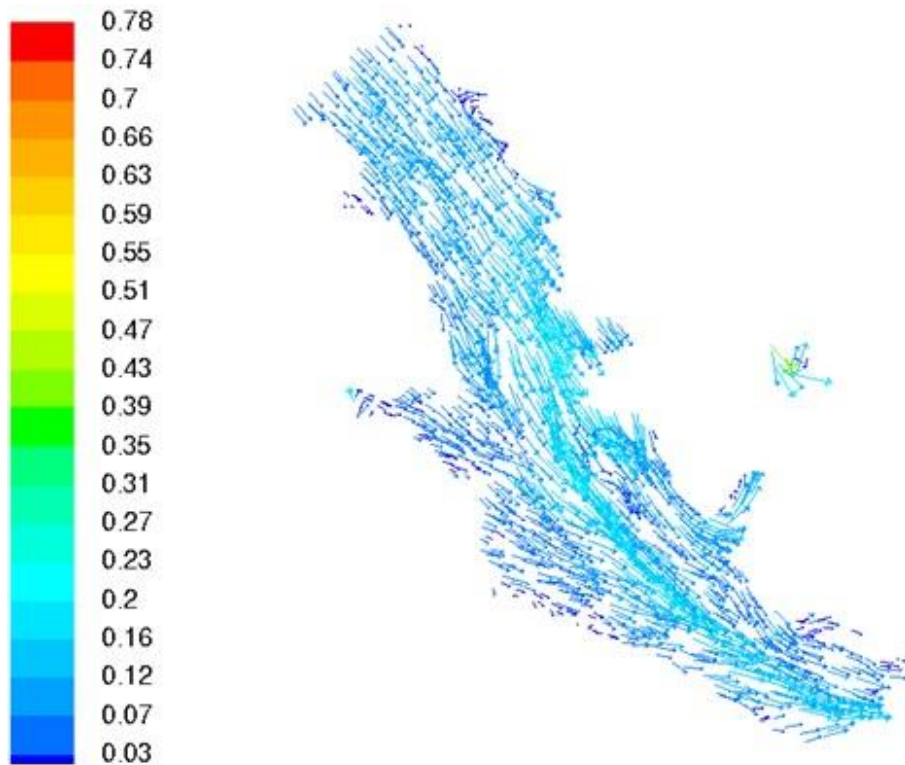
В данных условиях формируется достаточно сложная структура течений как на поверхности, так и на глубине. Это связано с тем, что стоковые, ветровые и "сбросные" течения (от сбросов Пермской ГРЭС) имеют примерно одну скорость, но разнонаправлены. Кроме этого, не стоит забывать о плотностных эффектах, ввиду разной температуры потоков. Поэтому какой-либо общей направленности на глубинах до 5-6 метров поток не имеет (рисунки 4.3.16-4.3.20).



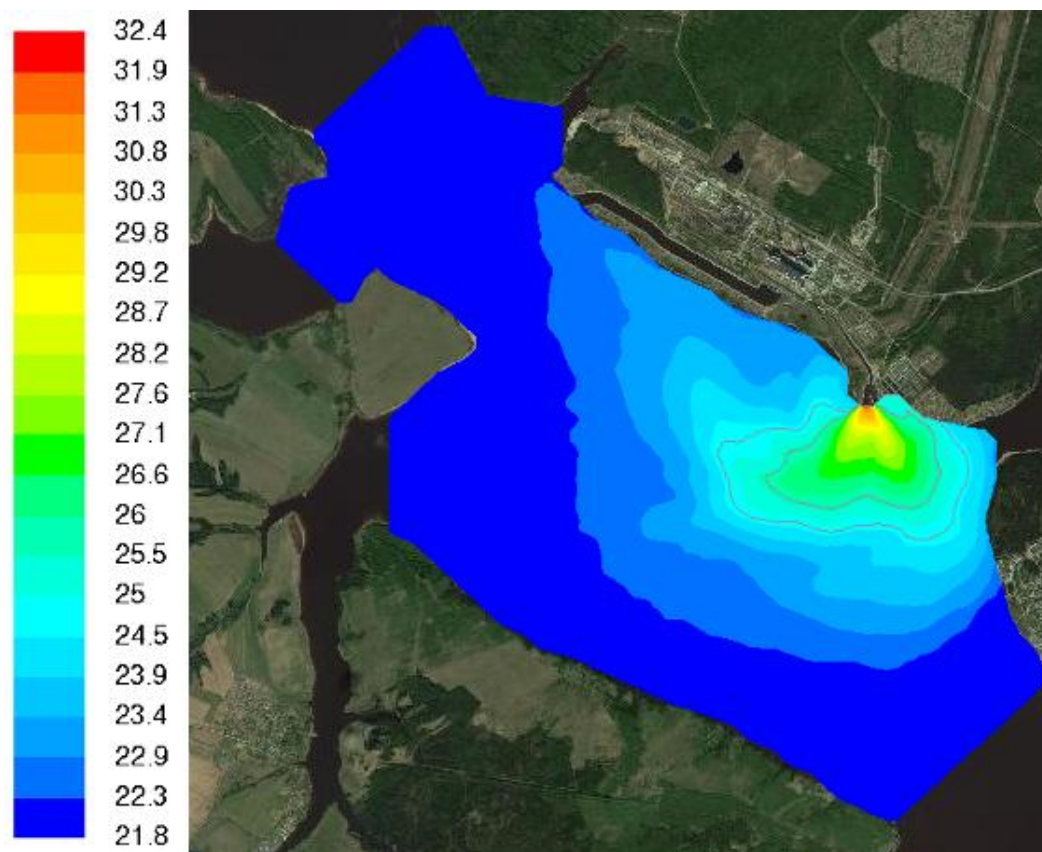
*Рисунок 4.3.16. Векторное поле скоростей в поверхностном слое Камского водохранилища при 4 сценарном расчете*



*Рисунок 4.3.17. Векторное поле скоростей в Камском водохранилище на глубине 5 м (103,5 м абс.) при 4 сценарном расчете*



*Рисунок 4.3.18. Векторное поле скорости в Камском водохранилище на глубине 10 м (98,5 м абс.) при 4 сценарном расчете*

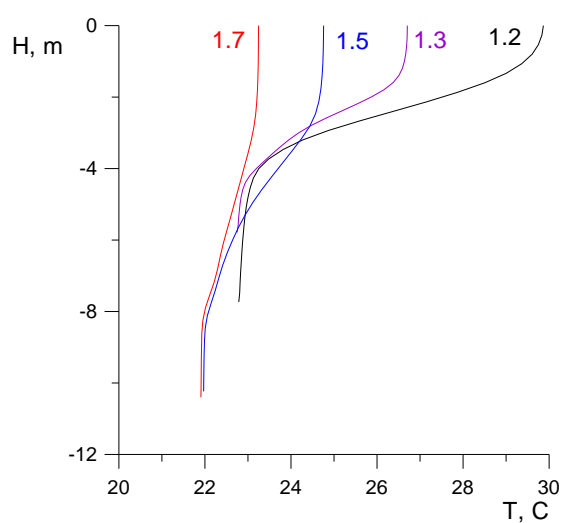


*Рисунок 4.3.19. Поле распределения температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в поверхностном слое Камского водохранилища при 4 сценарном расчете (линиями обозначены границы увеличения температуры на 3 и на  $5^{\circ}\text{C}$  относительно фоновой температуры)*

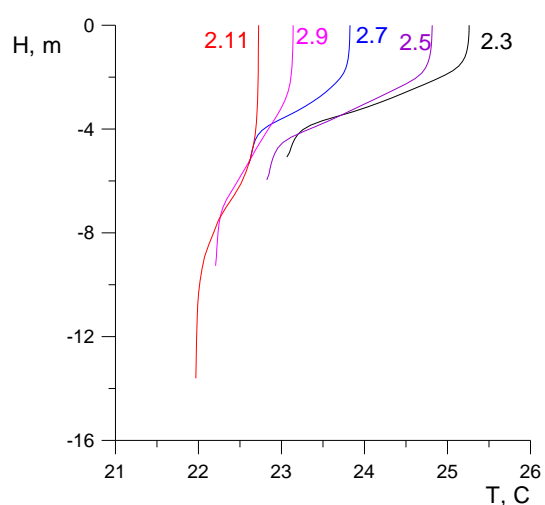
В целом, наиболее неблагоприятные ситуации с поступлением теплой воды в подводящий канал Пермской ГРЭС могут возникнуть при юго-восточных ветрах. При этом, если увеличение скорости ветра снижает время добегания и повышает интенсивность поступления теплой воды в подводящий канал, то величина расхода воды в р. Каме (Камском водохранилище) оказывает, на рассматриваемые процессы, противоположное воздействие. Снижение расходов увеличивает вероятность затока теплой воды к водозаборным сооружениям (рисунки 4.3.11., 4.3.19). При этом, как следует из представленных результатов сценарных расчетов, обратные потоки от отводящего канала к подводящему наблюдаются только в верхнем слое толщиной, как правило, не более 2-3 м.

Поступление теплой воды в подводящий канал в безледоставный период может наблюдаться при реализации следующих факторов:

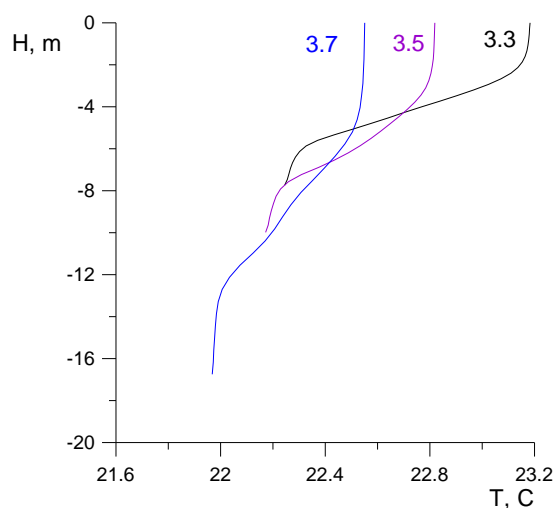
- наличием достаточно интенсивного ( $W > 8$  м/сек) и продолжительно действующего ( $T > 12-15$  часов) юго-восточного ветра;
- относительно невысоких расходов сброса воды в створе Камской ГЭС  $Q < 1000$  м<sup>3</sup>/сек;
- поддержание уровня воды в Камском водохранилище на отметках близких к НПУ  $\sim 108,5$  м абс.;
- температура сбрасываемой с Пермской ГРЭС воды должна быть не менее  $30^{\circ}\text{C}$ , расход сброса – больше  $40$  м<sup>3</sup>/сек.



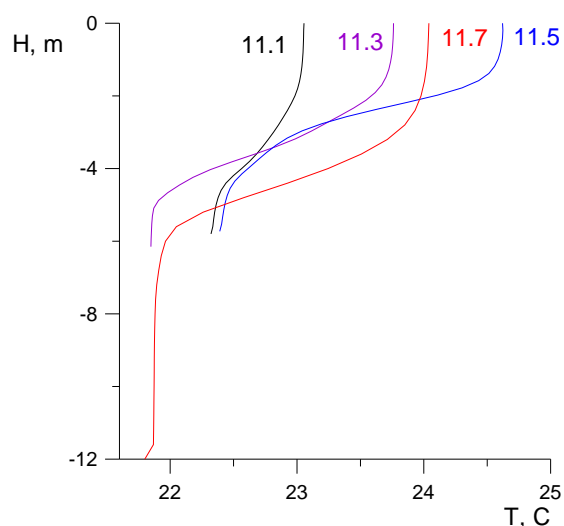
а)



б)



в)



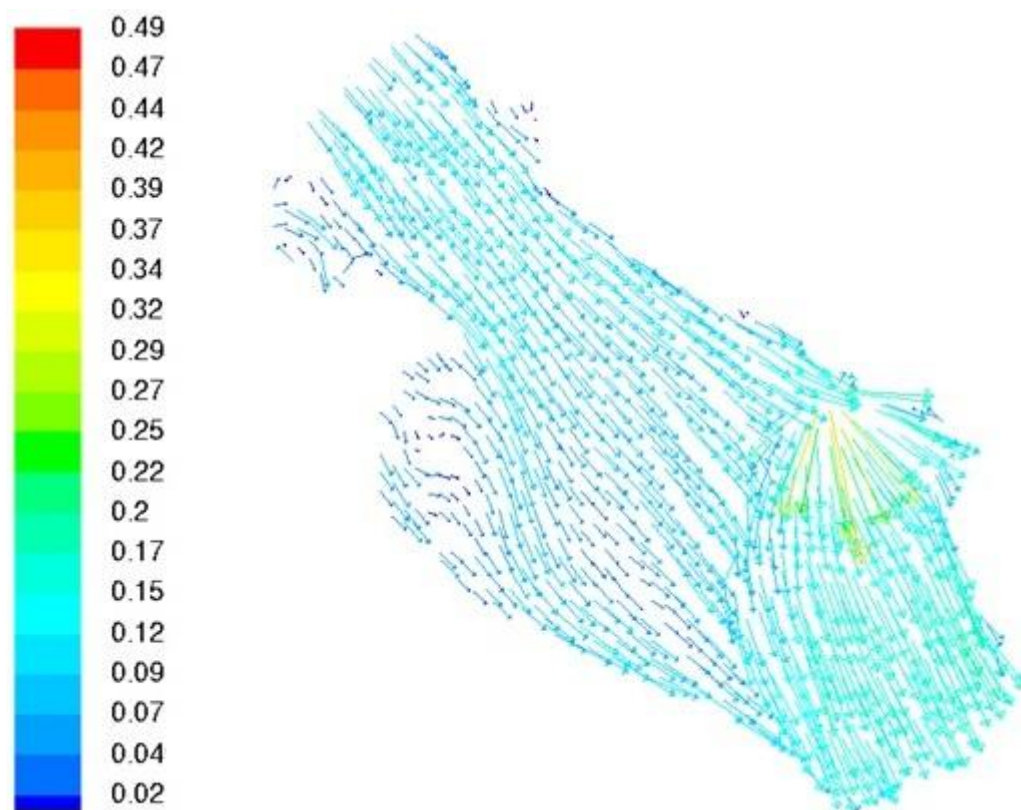
г)

Рисунок 4.3.20. Распределения температуры воды по глубине в контрольных точках при 4 сценарном расчете а) – первый контрольный створ, б) – второй, в) – третий, г) – одиннадцатый



### ***Результаты модельных расчетов при реализации 5 сценария***

Поле распределения скоростей потока очень схоже с распределением при моделировании 3-го сценария (рисунок 4.3.21). Влияние сбросов на динамику потока в водохранилище меньше, ввиду более низкого расхода. Это приводит к существенному уменьшению масштабов воздействия и по акватории, и по глубине (рисунок 4.3.22-4.3.23). Площадь акватории, на которой происходит увеличение температуры на 3 и более градусов составляет около 8 га (0,08 км<sup>2</sup>), на 5 и более ~ 1 га (рисунок 4.3.24., таблица 4.3.1).



*Рисунок 4.3.21. Векторное поле скоростей в поверхностном слое Камского водохранилища при 5 сценарном расчете*

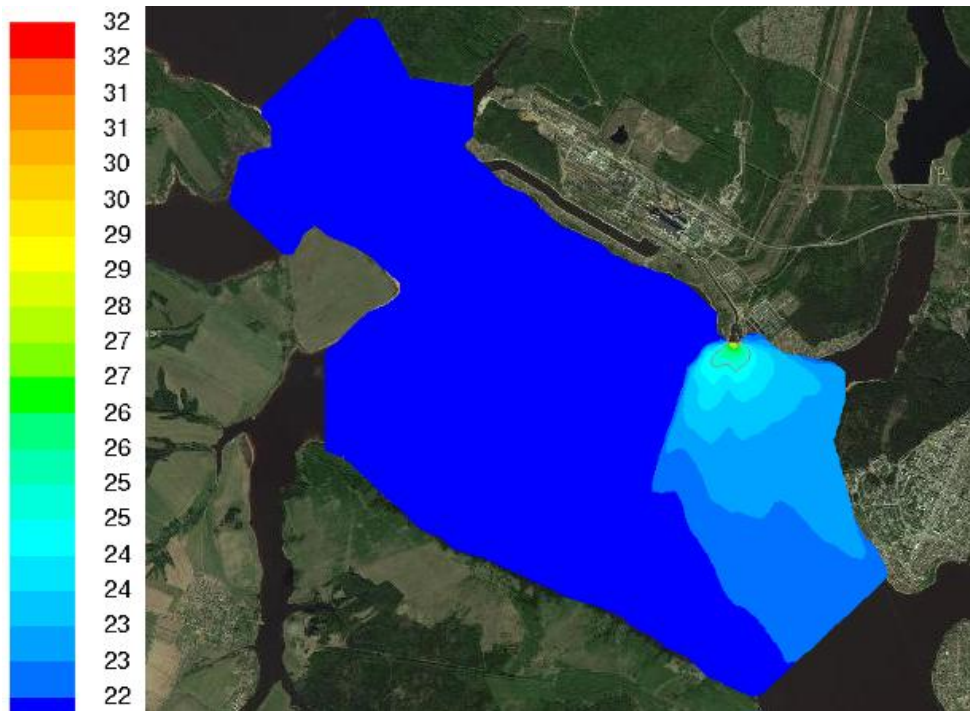


Рисунок 4.3.22. Поле распределения температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в поверхностном слое Камского водохранилища при 5 сценарном расчете (линиями обозначены границы увеличения температуры на 3 и на  $5^{\circ}\text{C}$  относительно фоновой температуры)

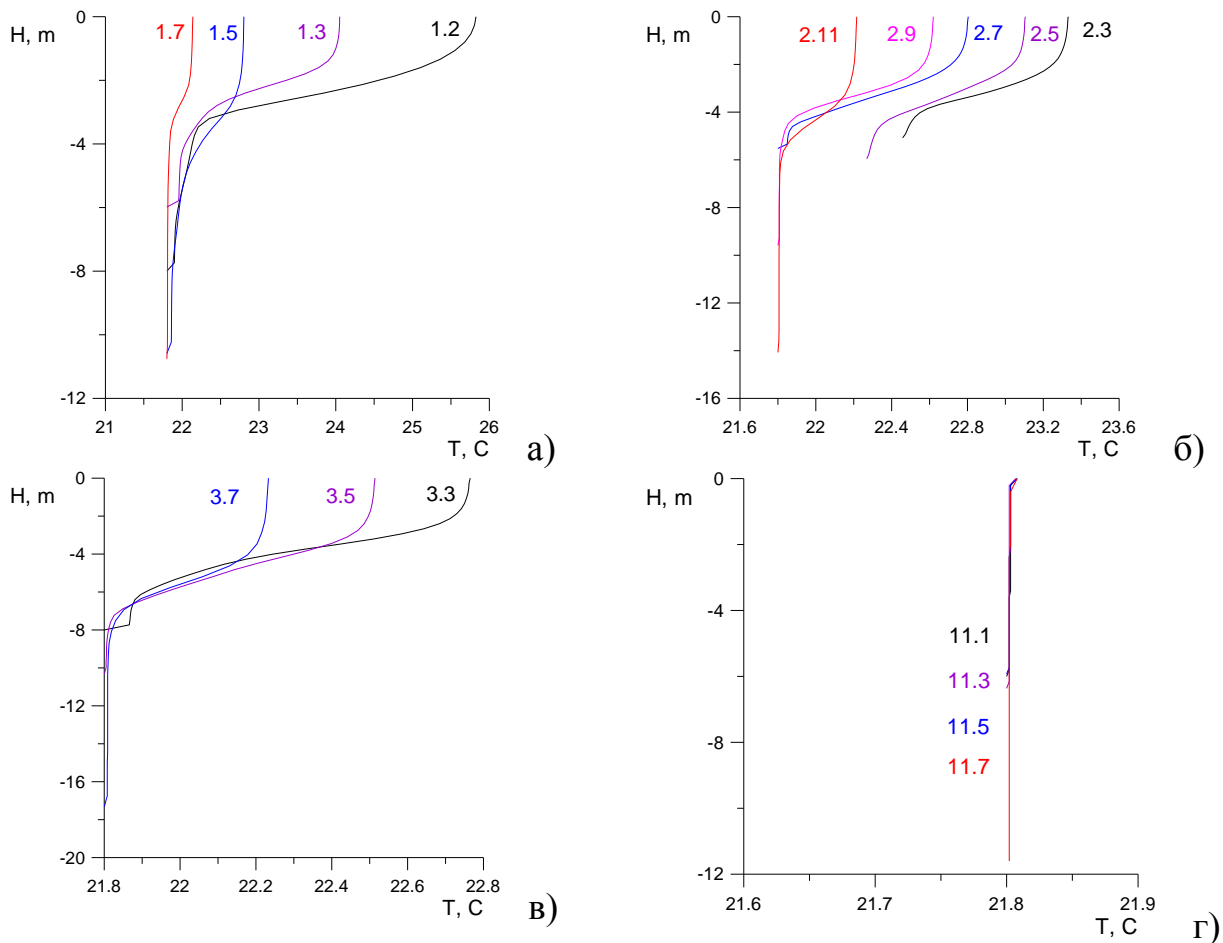


Рисунок 4.3.23. Распределения температуры воды по глубине в контрольных точках при 5 сценарном расчете а) – первый контрольный створ, б) – второй, в) – третий, г) – одиннадцатый

Более подробно характеристики зон влияния подогретых вод при реализации рассматриваемых сценариев представлены в таблице 4.3.1 и наглядно приведены на рисунке 4.3.23.

Таблица 4.3.1

Распределение площадей (км<sup>2</sup>) повышения температуры воды (°С) по акватории Камского водохранилища в районе Пермской ГРЭС при различных сценарных условиях

Превышение над фоном, °С	Площадь, км <sup>2</sup>				
	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4	Сценарий 5
8	0.03	0.18	0.018	0.02	0.003
7	0.05	0.52	0.038	0.06	0.004
6	0.12	0.97	0.07	0.14	0.005
5	<b>0.25</b>	<b>1.49</b>	<b>0.15</b>	<b>0.43</b>	<b>0.01</b>
4	0.45	2.06	0.39	1.15	0.04
3	<b>0.72</b>	<b>2.84</b>	<b>1.18</b>	<b>2.35</b>	<b>0.08</b>
2	1.54	4.94	3.77	4.61	0.44
1	4.23	8.01	7.56	9.71	2.17

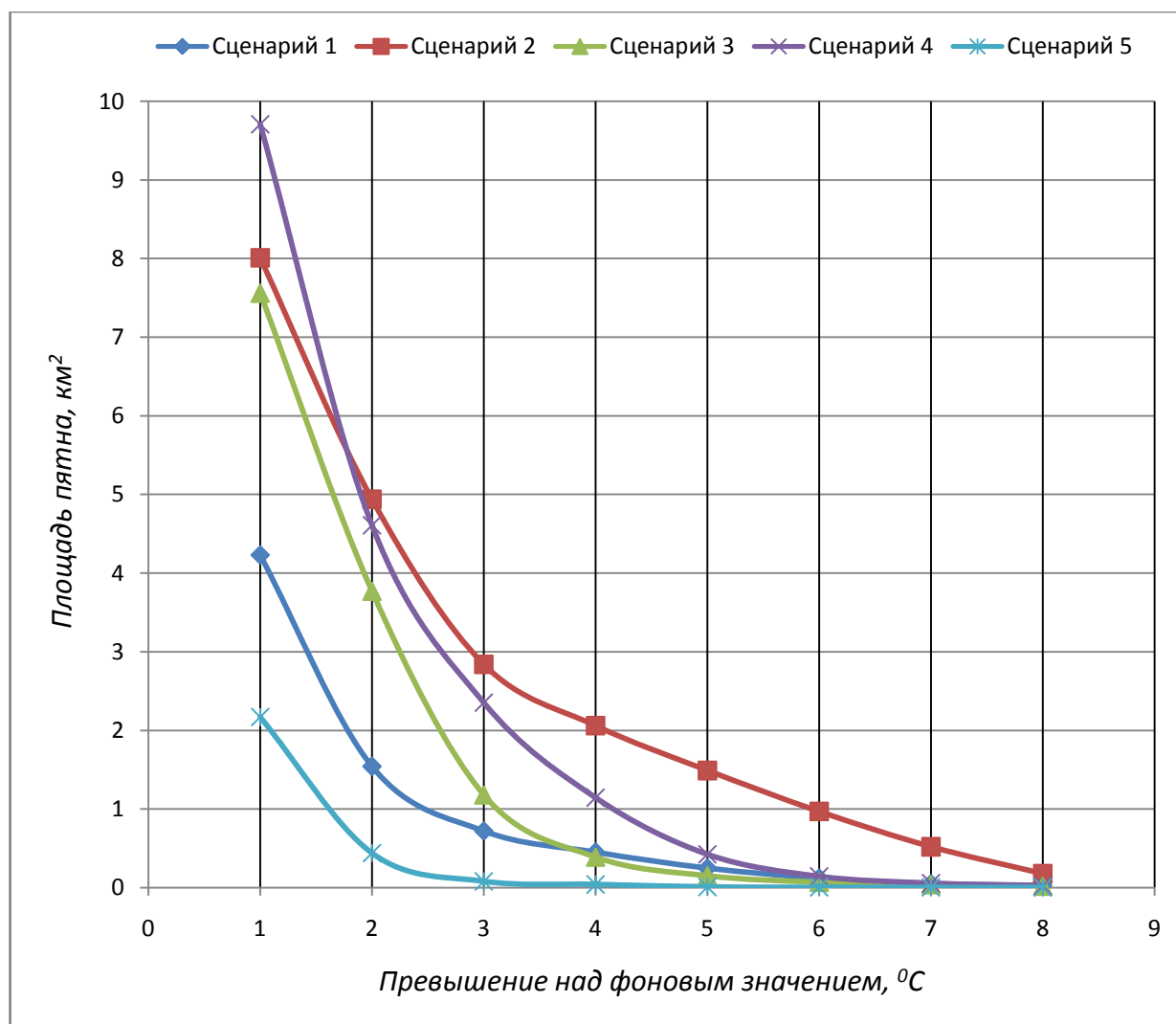


Рисунок 4.3.24. Распределение площадей превышения температуры при различных сценарных расчетах

## ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ МАГНИТОГОРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ СТОКОВ ПАО «ММК»

### 5.1. Анализ «ноль» - мерных моделей водоемов-охладителей

Построение любых прикладных моделей направлено на решение конкретных практических задач в определенных пространственно-временных масштабах. «Ноль»-мерная модель по своему характеру направлена на анализ осредненных по всему объекту температурных характеристик и может использоваться для оценки инерционности системы охлаждения при некоторых экстремальных сочетаниях метеорологических параметров.

Естественно, в такой постановке в модель не должны включаться длительные инерционные параметры. В первую очередь, в качестве такого упрощения принимается отсутствие теплообмена через смачиваемую поверхность, т.е.:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \vec{r}} \right|_{\vec{r}=0} = 0, \quad (5.1.1)$$

где  $\vec{r} = 0$  – вектор ортогональный смачиваемой поверхности.

В такой постановке основными факторами, определяющими тепловой режим водоема является теплообмен с атмосферой, сброс и забор воды из водоема-охладителя.

В данной постановке при постоянном объеме водного объекта имеем [Методические указания по технологическим расчетам..., 2004]:

$$\frac{c\rho H}{k} \frac{dT}{dt} + \alpha_e (e_m - e) + \alpha_c (T - T_a) - R - \frac{\Delta S}{\Omega} = 0, \quad (5.1.2)$$

где  $T$  – средняя температура свободной поверхности водоема;

$t$  – время;

$c$  и  $\rho$  – удельная теплоемкость и плотность воды, принимаемые постоянными;

$\Delta S$  – разность теплосодержаний поступающей в водоем и забираемой из него воды в единицу времени;

$\alpha_e$  – коэффициент теплоотдачи испарением;

$\alpha_c$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией;

$e_m$  – максимальная упругость водяных паров при температуре  $T$ ;

$e$  – абсолютная влажность воздуха;

$T_a$  – температура воздуха;

$R$  – радиационный баланс (составляющая плотности теплового потока на свободной поверхности, обусловленная радиационным теплообменом и излучением);

$\Omega$  и  $H$  – площадь свободной поверхности и средняя глубина водоема-охладителя;

$k$  – коэффициент неравномерности распределения температуры воды по глубине, численно равный отношению средней температуры свободной поверхности к средней по объему воды температуре.

При выпуске и заборе циркуляционной воды ТЭС:

$$\Delta q = c\rho Q\Delta T, \quad (5.1.3)$$

где  $Q$  – циркуляционный расход;

$\Delta T$  – температурный перепад водоема-охладителя между сбрасываемой и забираемой водой

Коэффициент  $k$  для глубоких водоемов-охладителей с явно выраженной вертикальной температурной стратификацией принимается равным 1,1, для частично перемешанных по глубине – 1,05, для нестратифицированных – 1,0 [Методические указания по технологическим расчетам..., 2004].

Для определения коэффициентов теплоотдачи испарением и конвекцией могут быть использованы зависимости:

$$a_e = 0,084(1 + 0.135W_2), \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{Па}) \quad (5.1.4)$$

$$a_c = 5,38(1 + 0.135W_2), \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{°C}) \quad (5.1.5)$$

Радиационный баланс  $R$  определяется по формуле

$$R = \Phi_0[1 - (1 - k_1)n] * (1 - a_p) - I(1 - k_2n^2) - 20,77 * 10^{-8}(T_a + 273,2)^3(T_e - T_a), \text{ Вт}/\text{м}^2, \quad (5.1.6)$$

где  $\Phi_0$  - суммарная солнечная радиация при безоблачном небе;

$a_p$  - альbedo поверхности воды;

$I$  - эффективное излучение при безоблачном небе;

$k_1$  и  $k_2$  - коэффициенты, определяемые по таблицам;

$n$  - общая облачность (в долях единицы).

Эффективное излучение при безоблачном небе определяется по формуле:

$$I = (-2,889 \cdot 10^{-4}e + 1,607)Ta - 1,123 \cdot 10^{-2}e - 32,46 \log(e/133,3) + 107,6 [\text{Вт/м}^2] \quad (5.1.7)$$

Большинство входящих показателей требует для своей оценки дополнительных параметров, которые, в свою очередь, также оцениваются с определенной погрешностью.

При этом, как подчеркивал Д.И. Менделеев: «точность вычислений не должна превышать точность измерений». Как известно, если какая-либо функция  $U = f(x_1 \dots x_n)$ , определяемая  $n$ -параметром характерной среднеквадратичной погрешностью оценки  $\sigma_{xi}$ , то дисперсия, как известно, будет:

$$D_u = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial U}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \sigma_{xi}^2 \quad (5.1.8)$$

Так как характерная погрешность измерения гидрометеорологических параметров, как правило,  $\sigma_{mi} \geq 0,1$ , то уже при включении в расчетные зависимости 4-5 исходных параметров, расчетные функции будут характеризоваться неприемлемо высокой погрешностью.

Поэтому необходимо максимально минимизировать количество используемых метеорологических параметров. Учитывая инерционность рассматриваемых систем, целесообразно при модельных расчетах использовать допущение соответствия исходной температуры воды с расчетной среднесуточной температурой воды.

Весьма важной технологической характеристикой водоема-охладителя, для решения задач управления, является его инерционность по отношению к достаточно быстро изменяющимся метеорологическим параметрам.

Оценим инерционность системы охлаждения к изменчивости метеорологических показателей.

В первом приближении, эффективный коэффициент инерционности, исходя из уравнения (5.1.2), можно оценить следующим образом.

Принимая, что в естественном состоянии без активной техногенной нагрузки тепловой режим водного объекта определяется интенсивностью теплообмена с атмосферой, имеем:

$$\frac{1}{(T-T_A)} \frac{dT}{dt} = -\alpha_{эф} \text{ или } T(t) = T_0 - T_A \exp(-\alpha_{эф} \cdot t + T_A), \quad (5.1.9)$$

$$\text{где } \alpha_{эф} = \frac{K \cdot \alpha_{\Sigma}}{c \rho H} \text{ [1/сек.]}$$

Подставляя в (5.1.2) характерные значения определяющих параметров при средней скорости ветра  $W \sim 3$  м/сек. и эффективной глубине  $H \sim 5$  м имеем:

$$\alpha_{эф} = \frac{1,1 \cdot 3,3 \cdot 3}{4,18 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 6} = 0,434 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{сек}} \sim 0,0371 \frac{1}{\text{сут}} \sim 1,1 \frac{1}{\text{мес}}$$

На рисунке 5.1.1 представлены характерные зависимости

$$\frac{T-T_A}{T_0-T_A} = \exp(-\alpha_{эф} \cdot t) \quad (5.1.10)$$

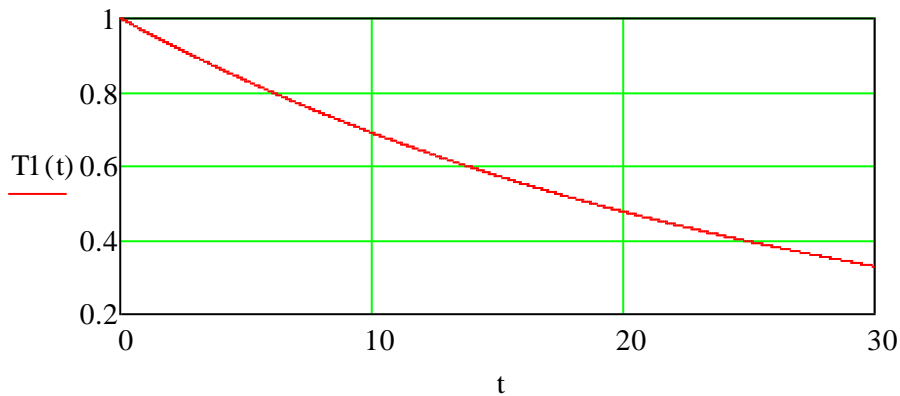


Рисунок 5.1.1. Чувствительность температуры воды в водоеме-охладителе к изменению температуры воздуха

Как видно из рисунка 5.1.1, характерные суточные и тем более внутрисуточные колебания температуры не могут оказывать значимого влияния на колебания осредненной, по всему объему водного объекта, температуры воды.

Значимые воздействия при данных условиях могут оказывать только декадные и месячные колебания. Поэтому при оценке расчетных характеристик основное внимание должно уделяться анализу декадных и месячных характеристик.

Данное допущение принципиально упрощает схему расчетов.

Если начальная температура воды соответствует метеорологическим заданным условиям рассматриваемой территории, то ее изменение, вследствие сброса и забора из водоема-охладителя, в условиях полного мгновенного перемешивания, имеет вид:

$$\frac{d(W \cdot T)}{dt} = q_1 \cdot T_1 - q_2 \cdot T, \quad (5.1.11)$$

где  $W$  – объем водоема-охладителя,

$T$  – осредненная по объему температура воды,

$q_1$  – суммарный расход сброса термальных стоков с характерной температурой  $T$

$T_1$  = характерная температура отводимых стоков.

$q_2$  – суммарный забор воды из водоема

Если объем водоема постоянный, то нетрудно видеть, что:

$$T(f) = (T_0 - T_R) \exp\left(-\frac{q_2}{W} \cdot t\right) + T_R, \quad (5.1.12)$$

где  $T_0$  – начальная температура соответствующих заданных метеорологических характеристик

$$T_R \sim \left(\frac{T_1 \cdot q_1}{q_2}\right) \quad (5.1.13)$$

В первом приближении, для поддержания стабильного объема водоема-охладителя необходимо, чтобы  $q_1 = q_2$ .

Зависимость (5.1.12) в координатах  $\frac{T(t) - T_R}{T_0 - T_R}$  и  $\frac{q_2}{W} \cdot t$  представлена на рисунке 5.1.2.

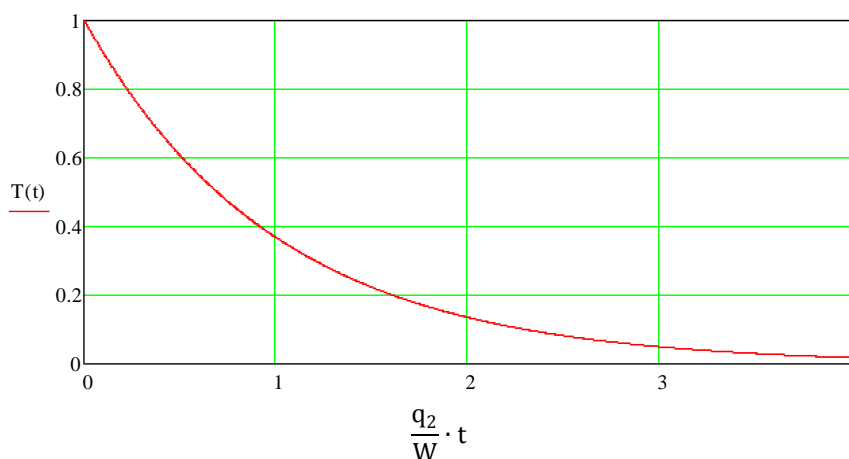


Рисунок 5.1.2 Инерционность изменения температуры воды в водоеме-охладителе под влиянием технологических факторов



Для конкретных значений  $q_2 = 15,2 \text{ м}^3/\text{сек.}$ ,  $W = 9,56 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ , характерных для водоема-охладителя ПАО «ММК», зависимость представлена на рисунке 5.1.3.

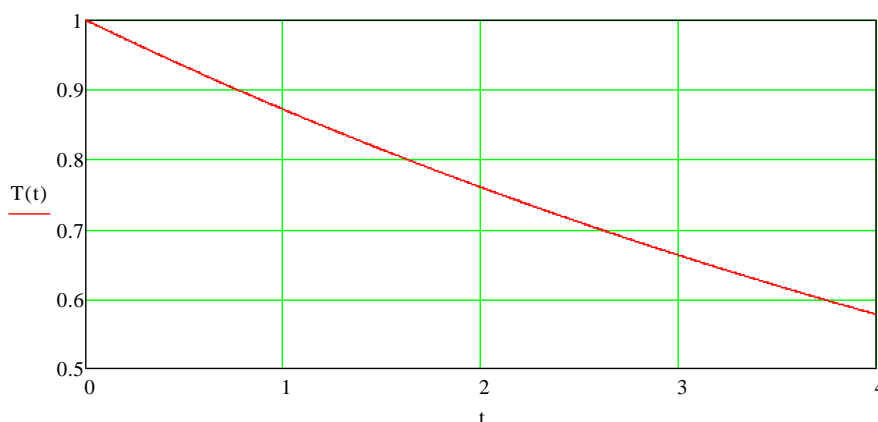


Рисунок 5.1.3. Инерционность изменения температуры воды в водоеме-охладителе ПАО «ММК» под влиянием технологических факторов (t-сутки)

Для условий ПАО «ММК» водоем-охладитель оказывается значительно более инерционным по отношению к метеорологическим параметрам, чем к технологическим.

Существенный интерес представляет оценка инерционности системы охладений при учете комплекса метеорологических и технологических факторов.

Уравнение теплового баланса в общем виде будет иметь следующий вид:

$$\frac{d(W \cdot T)}{dt} = \alpha_{\text{эф}}(T_A - T)H \cdot F + q_1 \cdot T_1 - q_2 \cdot T \quad (5.1.14)$$

Принимая также, как в (5.1.2), объем охладителя постоянным, а  $\frac{W}{F} \sim H$ , решение уравнения (5.1.14) будет иметь следующий вид:

$$T(t) = (T_0 - T_R) \exp\left(-\left(\alpha_{\text{эф}} + \frac{q_2}{W}\right)t\right) + T_R, \quad (5.1.15)$$

$$\text{где } T_R = \frac{T_A + \frac{q_1}{W \cdot \alpha_{\text{эф}}} \cdot T_1}{1 + \frac{q_2}{W \cdot \alpha_{\text{эф}}}}$$

$T_0$  – начальная температура воды в резервуаре-охладителе.

Пренебрегая величиной испарения с водной поверхности, для обеспечения стабильности объема воды необходимо, чтобы  $q_1 = q_2 = q$ .

Как уже отмечалось, для рассматриваемых условий охладителя ПАО «ММК»  $q_2=15,2 \text{ м}^3/\text{сек.}$ ,  $W= 9,56*10^6 \text{ м}^3$ ,  $\alpha_{эф} \sim 0.037 \text{ 1/сут.}$

Решение уравнения (5.1.15) для характерных численных параметров  $q_2$ ,  $W$ ,  $\alpha_{эф}$  представлено на рисунке 5.1.4.

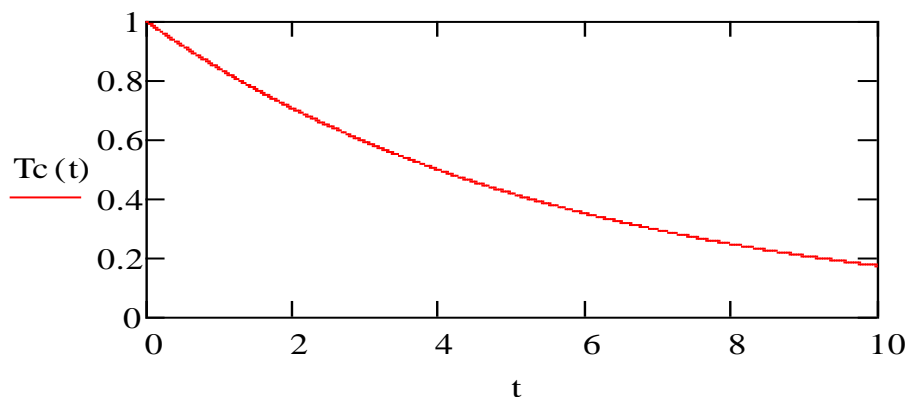


Рисунок 5.1.4. Зависимость интенсивности приближения средней температуры воды в резервуаре-охладителе к равновесной  $T_R$ .

Зависимость равновесной температуры воды  $T_R$  от температуры воздуха  $T_A$  и характерных объемов сброса и забора воды при включении и выключении изданной системы охлаждения выпуска №7 представлена на рисунке 5.1.5.

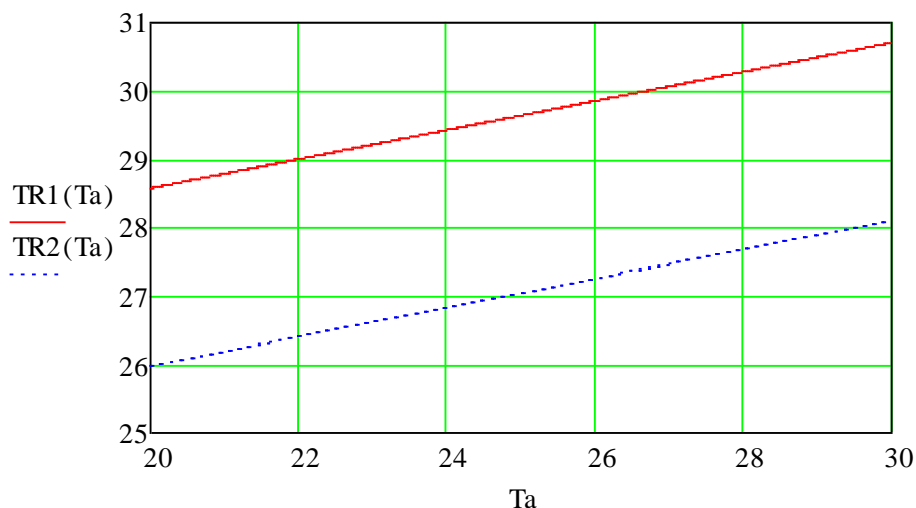


Рисунок 5.1.5. Зависимость равновесной температуры от средней декадной суточной температуры воздуха при учете выпуска №7 (TR1) и без учета выпуска №7 (TR2).

## **5.2. Обоснование и описание сценариев моделирования в 2D-постановке**

Разработка сценариев дальнейших модельных расчетов всегда вытекает из поставленных задач. При этом, в рамках обсуждения проводимых исследований, определяются начальные условия, возможные диапазоны изменения определяющих параметров и требуемый результат. Исходя из вышеуказанного, и были разработаны представленные сценарии.

Для адекватного построения гидродинамической модели участков Магнитогорского водохранилища и резервуара-охладителя ПАО «ММК», кроме полученной на стадии изысканий информации, необходимо было задать современные параметры забора и сброса воды ( $\text{м}^3/\text{сек}$ ) каждого из существующих сооружений. В рабочем порядке с сотрудниками предприятия все необходимые характеристики и местоположение были определены, согласованы, приняты для дальнейших расчетов на исследуемом участке (рисунок 5.2.1., таблица 5.2.1-5.2.2).

Сценарные расчеты по рассматриваемому объекту проводились в несколько этапов в течение 2013-2017 годов в рамках НИР, а также предпроектных проработок [Проект: Реконструкция системы оборотного водоснабжения..., 2015]. Большой блок работ был посвящен именно изучению изменений динамики водных масс в разные периоды при реализации проекта расширения существующего резервуара-охладителя. Именно результаты гидродинамического моделирования в 2D-постановке определили, в дальнейшем, ряд принятых принципиальных технических решений.

Ниже приведены некоторые разработанные и принятые к расчету сценарии, которые затрагивали как существующие объекты, так и предполагаемые к проектной реализации.

Таблица 5.2.1

Насосные станции (водозаборы) ПАО «ММК» со средними объемами забора воды

№ п/п	Наименование насосной станции (н/с)	Объем забора, м <sup>3</sup> /сек	Объем забора, м <sup>3</sup> /час
1	н/с 16	7,5	27000
2	н/с 16а	7,65	27540
3	н/с 1а	10,24	36864
4	н/с 1	1,24	4464
5	н/с 17	13,08	47088
6	н/с ЦЭС	10,81	38916

Таблица 5.2.2

Водовыпуски ПАО «ММК» и его структурных подразделений со средними объемами сброса

№ п/п	Наименование водовыпуска	Объем сброса, м <sup>3</sup> /сек	Объем сброса, м <sup>3</sup> /час
1	Выпуск № 1 ПАО "ММК"	11,6	41760
2	Выпуск № 7 ПАО "ММК"	2,95	10620
3	Выпуск ТЭЦ	4,91	17676
4	ЦЭС	10,8	38880
5	КЦ	2	7200
6	КЦ КС-4	7,94	28584
7	Охлаждающие воды ДЦ	11,33	40788
8	Паросиловой цех	0,74	2664
9	ЦУПХП (КЦ)	0,84	3024
10	ЛПЦ-4	2,95	10620
11	ЛПЦ-5	1,58	5688
12	ЛПЦ	0,17	612
13	ЭСЩ	1	3600
14	КЦ, Огнеупор	0,56	2016
15	ЦВС	0,14	504
16	Выпуск у проходной № 5	0,05	180
17	Выпуск ПАО "ММК Метиз"	0,06	216
18	Сброс осветленных вод левобережного гидроотвала	0,04	144
19	Южная нагорная канава	1,65	5940
20	Цех изложниц	0,96	3456
21	ЛПЦ-9	0,06	200
22	Сортовой цех	0,06	200

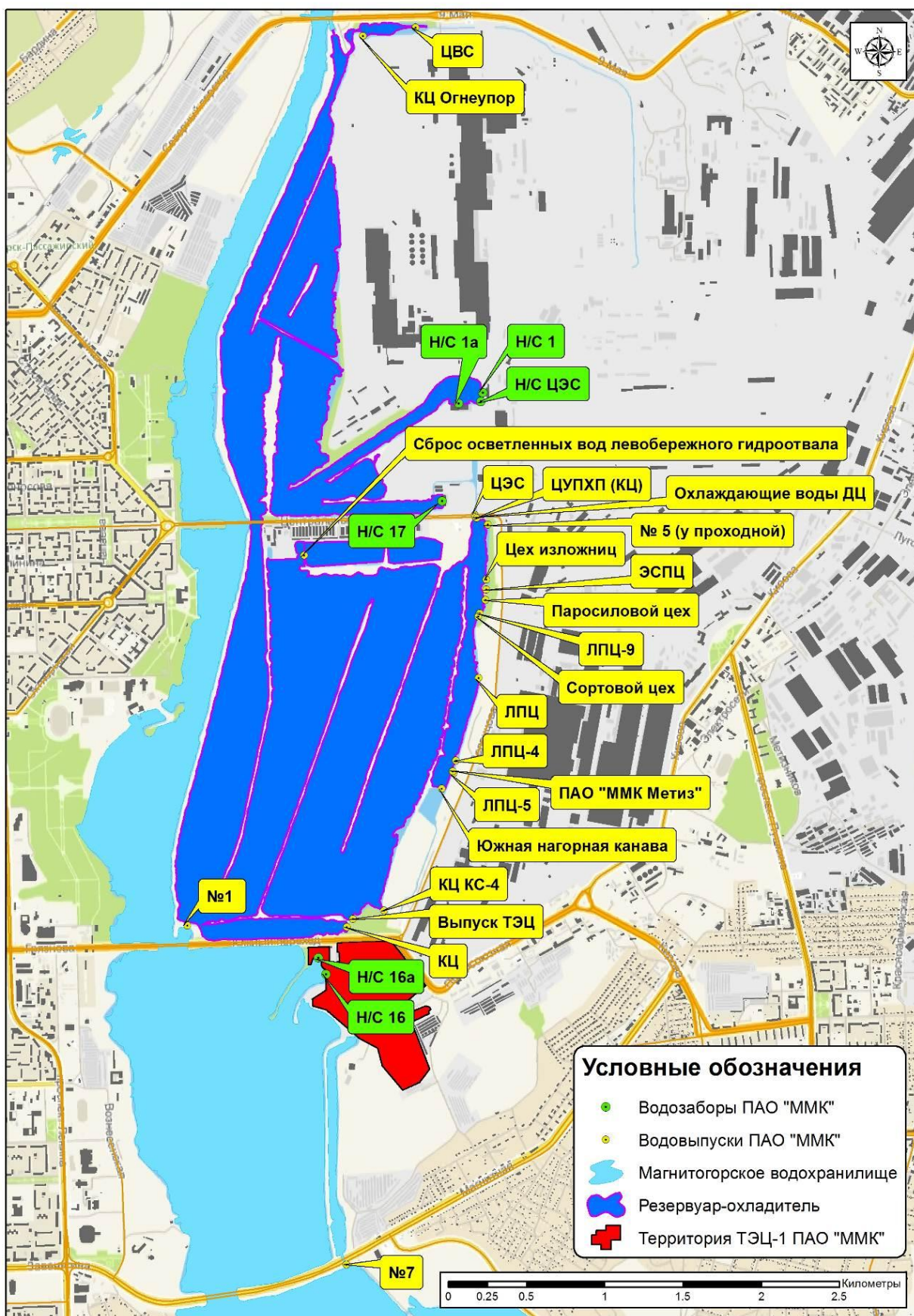


Рисунок 5.2.1 Картограмма расположения насосных станций и водовыпусков ПАО «ММК» и его структурных подразделений

**Сценарий 1.** Сценарий движения водных потоков в резервуаре-охладителе при современных (штатных) условиях работы. Ветер северный 4 м/сек.

*Особенности (цель):* адекватная общая существующая схема движения воды в резервуаре-охладителе в двухмерной постановке при наиболее часто повторяющемся ветре.

**Сценарий 2.** Схема движения водных потоков в стационарных условиях между Южным и Казачьим переходами. Ветер южный 4 м/сек. Температура воды выпуска №1 – 32 °С, выпуска № 7 – 40 °С, температура воды в водохранилище - фактическая измеренная в момент изысканий (~24-26 °С). Расходы на насосных станциях и на водовыпусках, согласно таблицам 5.2.1-5.2.2.

*Особенности (цель):* наиболее интересный (для заказчика) участок, в границах которого рассматривается возможность реализации различных мероприятий. Для сопоставления с дальнейшими результатами необходимо «просчитать» естественные условия использования.

**Сценарий 3.** Участок между Южным и Казачьим переходами. Увеличиваем оборотную часть ограждающей дамбой, оставляя не перекрытым участок (ширина ~ 25 м, глубина - фактическая) у левого быка моста Казачьего перехода (подобие с существующим выпуском №1). В нее запускаем воды 1-го выпуска ПАО «ММК». Также в оборотную отгороженную часть пускаем воды выпуска №7 (ТЭЦ). Параметры канала: ширина ~ 15 м, глубина ~ 2 м. Существующий канал под Казачьим переходом перекрываем. Схема представлена на рисунке 5.2.2. Температура воды фактическая (на момент полевого обследования). Ветер юго-восточный 4 м/сек.

В результате в оборотную часть добавляется 9,2 млн. м<sup>3</sup> воды, прирост площади акватории - 1,68 км<sup>2</sup>, объем материала, необходимый для создания ограждающей дамбы №1 длиной ~ 2,2 км, составляет около 400-420 тыс. м<sup>3</sup> (рисунок 5.2.2).

Следует отметить, что при моделировании и определении объемов необходимого материала на создание ограждающих и струенаправляющих дамб (во всех сценариях), принимались следующие параметры: превышение гребня над уровнем воды 2,3 м (352 м абс), ширина по гребню 5 м, заложение откосов 1:2. Ширина по основанию зависит от глубины.

*Особенности (цель):* преимуществом, в случае реализации данного сценария, является уход от сбросов выпуском №7 в водохранилище, а также осуществление забора станциями 16 и 16а из оборотной системы. Кроме этого существенно меняется баланс водопользования в сторону уменьшения использования вод естественной части водохранилища.

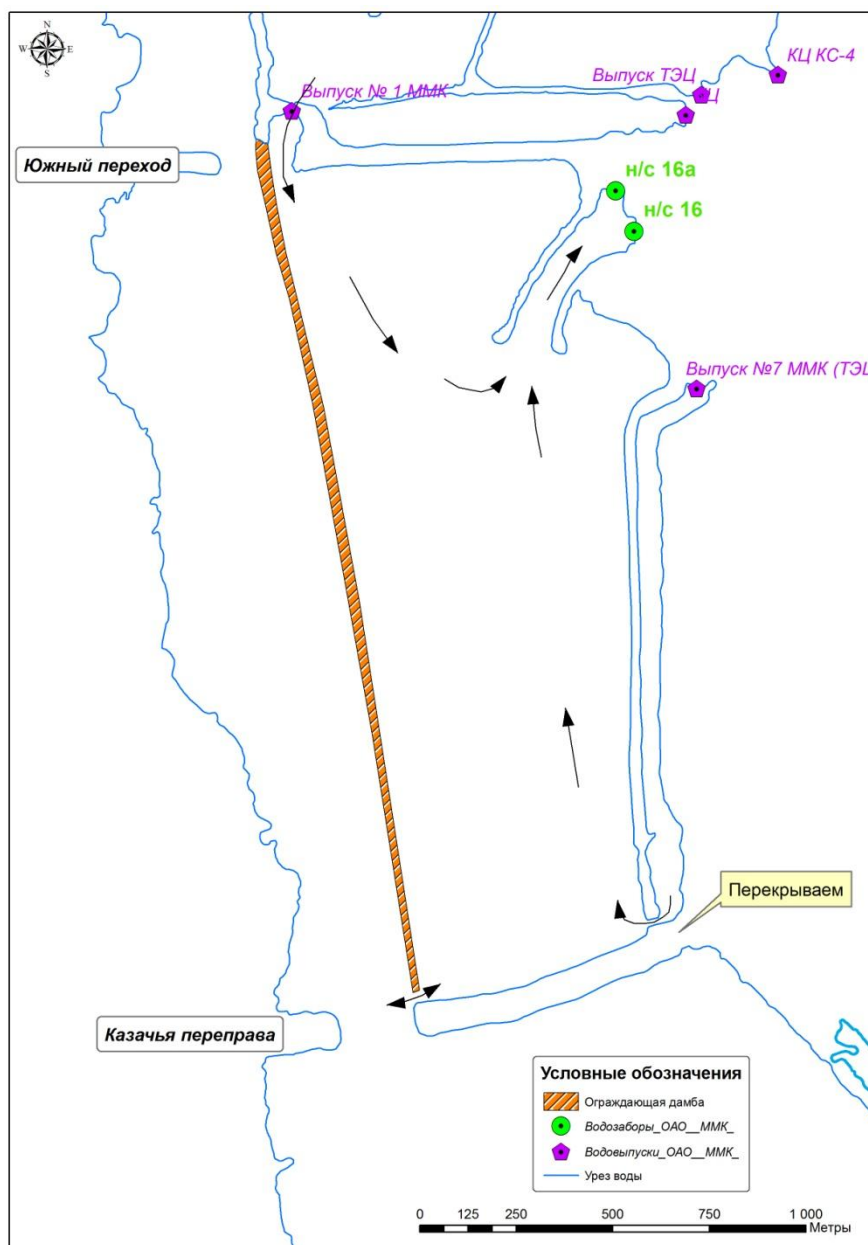


Рисунок 5.2.2 Схема для моделирования сценария №3.

**Сценарий 4.** Аналогично 3-му сценарию располагаем ограждающую дамбу и также запускаем воды выпуска №7. Кроме этого создаем 3 струенаправляющие дамбы, 2-е из которых - продленные "усы" от ковша насосных станций 16 и 16а. Схема приведена на рисунке 5.2.3. Температуры фактические. Ветер южный 4 м/сек.

Прирост объема оборотной части ~ 8,3 млн. м<sup>3</sup>, площади ~ 1,61 км<sup>2</sup>.  
Объем материала: ограждающая дамба №1 ~ 400-420 тыс. м<sup>3</sup>, струенаправляющая дамба 1 (длина 1,5 км) ~ 200 тыс. м<sup>3</sup>, струенаправляющая дамба 2 (длина 1,5 км) ~ 200 тыс. м<sup>3</sup>, струенаправляющая дамба 3 (длина 530 м) ~ 80 тыс. м<sup>3</sup>.

*Особенности (цель):* необходимо понять эффект от струенаправляющих дамб и целесообразность их возможного создания; определить (ориентировочно) параметры новой зарегулированной части и объем необходимого материала для создания.



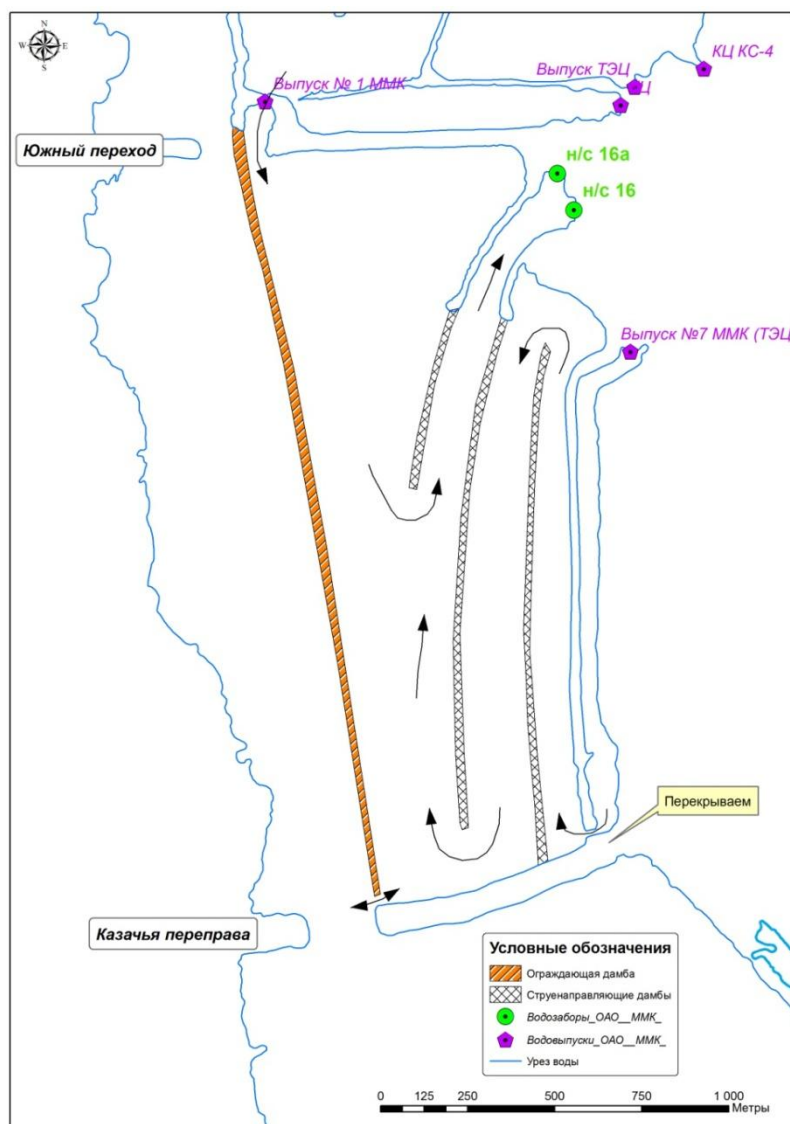


Рисунок 5.2.3 Схема для моделирования сценария № 4

**Сценарий 5.** Результаты расчетов по данному сценарию должны были показать изменение динамики потока под «Южным переходом» при организации подпорной стенки во время весеннего половодья (рисунок 5.2.4). Значение максимальной скорости потока являлось определяющим при расчетах конструкций креплений откосов и крупности материала для отсыпки и забутовки.

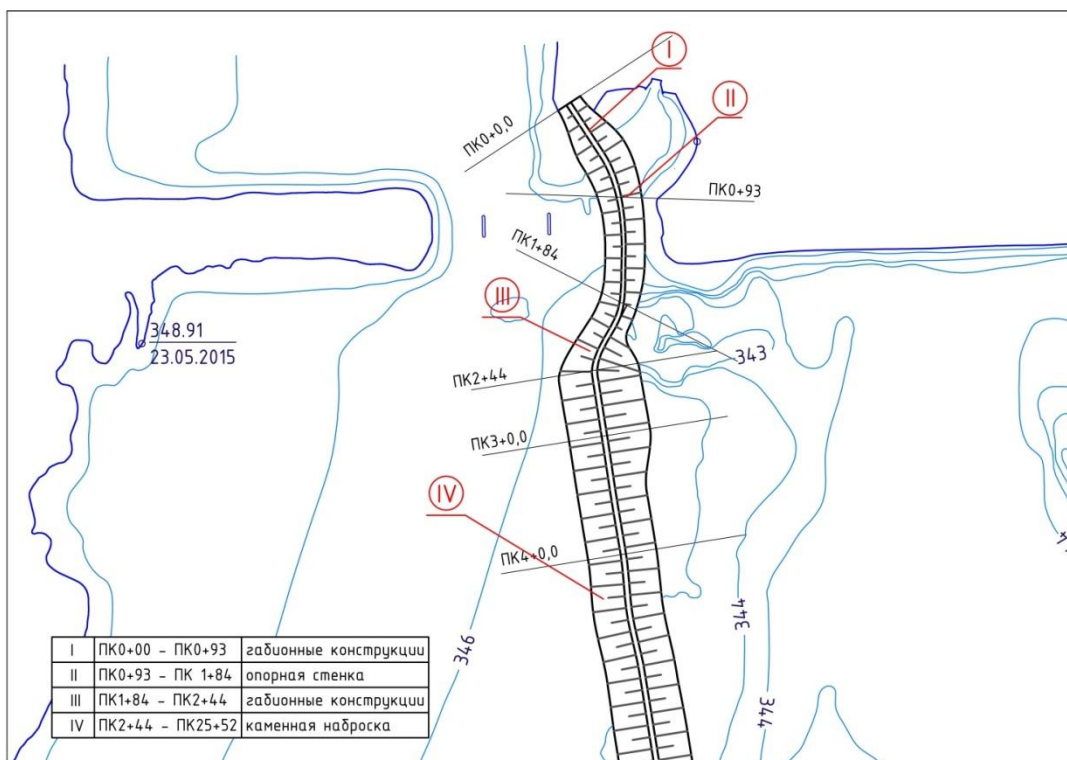


Рисунок 5.2.4 - Схема участка для моделирования сценария №5 в виде горизонтальной планировки проектируемого сооружения под "Южным переходом"

**Сценарий 6.** На основе расчетов по данному сценарию необходимо было оценить структуру течений при переходе на обратную систему водоснабжения ПАО «ММК» при строительстве ограждающей дамбы. Данный сценарий разрабатывался с учетом проведенных предпроектных инженерных изысканий и должен был учитывать большинство принятых технических решений (рисунок 5.2.5).



*Рисунок 5.2.5. Схема участка для моделирования сценария №6 в виде трассировки проектируемой плотины*

В данной работе представлена только часть наиболее показательных сценарных расчетов. Дополнительно проводились оценки: по организации и размещению водопропускных устройств для нивелирования дефицита баланса в замкнутой системе; при разном уровне наполнения Магнитогорского водохранилища; при возможной реализации более сложных схем использования акватории и др.

### **5.3. Результаты гидродинамического и гидротермического моделирования в 2D-постановке**

Основным отчетным материалом при описании результатов моделирования, как правило, являются графические и видеоприложения. Они наиболее наглядно отображают интересующую информацию: направление потока (вектор), скорость потока отображается цветом подложки и длиной вектора (рисунок 5.3.1).

**Сценарий 1.** Результаты моделирования показали общую схему движения водных потоков и их формирование. Большая часть вод поступает в левобережный отстойник промливневых стоков. Средняя скорость движения воды в резервуаре-охладителе составляет 4-6 см/сек. В районе впадения вод крупных выпусков: ТЭЦ ~ 0,4-0,5 м/сек; КЦ КС ~ 0,5-0,6 м/сек; охлаждающие воды ДЦ и ЦЭС - до 0,8 м/сек (рисунок 5.3.1). Период добегаания воды от левобережного отстойника до насосных станций 1 и 1а составляет порядка 62 часов (2,6 суток). В целом, поток формируется достаточно равномерный.

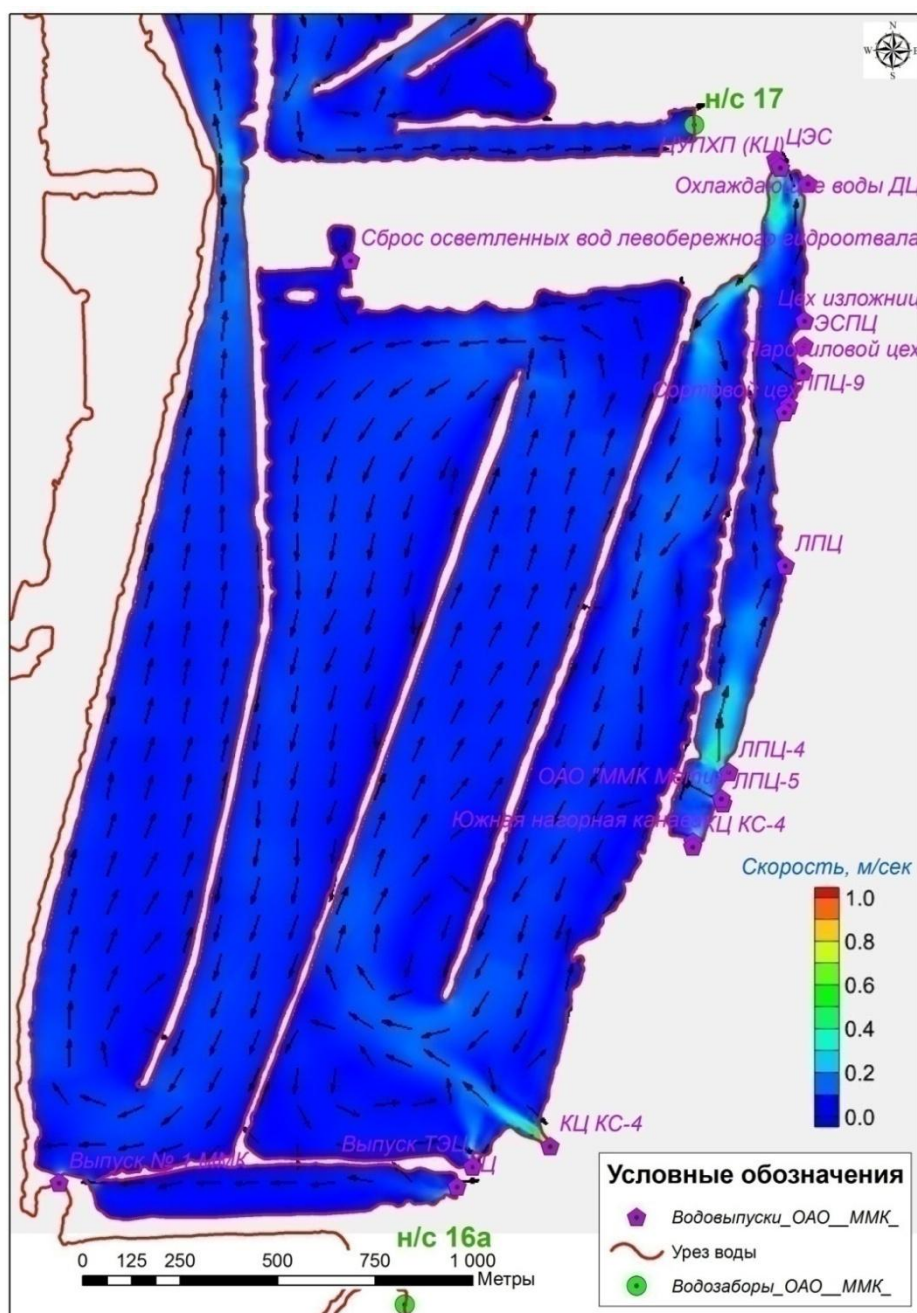


Рисунок 5.3.1. Общая картосхема структуры течений в южной части резервуара-охладителя ПАО "ММК"

*Сценарий 2.* Модельные расчеты показали, что в данных конкретных условиях забор воды насосными станциями 16 и 16а формируется также за счет вод, поступающих от выпусков № 1 и 7. При южном ветре в 4 м/сек, воды выпуска №1 прижимаются к Южному переходу и далее следуют к водозаборному ковшу насосных станций. Часть вод выпуска № 7 подобным образом прижимается к южной части Казачьей переправы и огибает ее, проходя под мостовым переходом, далее вдоль левого берега также следует к ковшу насосных станций 16 и 16а. Средняя скорость движения данных потоков составляет около 1 см/сек. (рисунок 5.3.2).

Цветовое отображение, в данном случае, позволяет лишь более наглядно отображать распределение теплых стоков по акватории и изначальную температуру воды на выпусках. Анализ абсолютных значений температуры по акватории, в данных условиях, может осуществляться только на основе результатов 3D-моделирования.

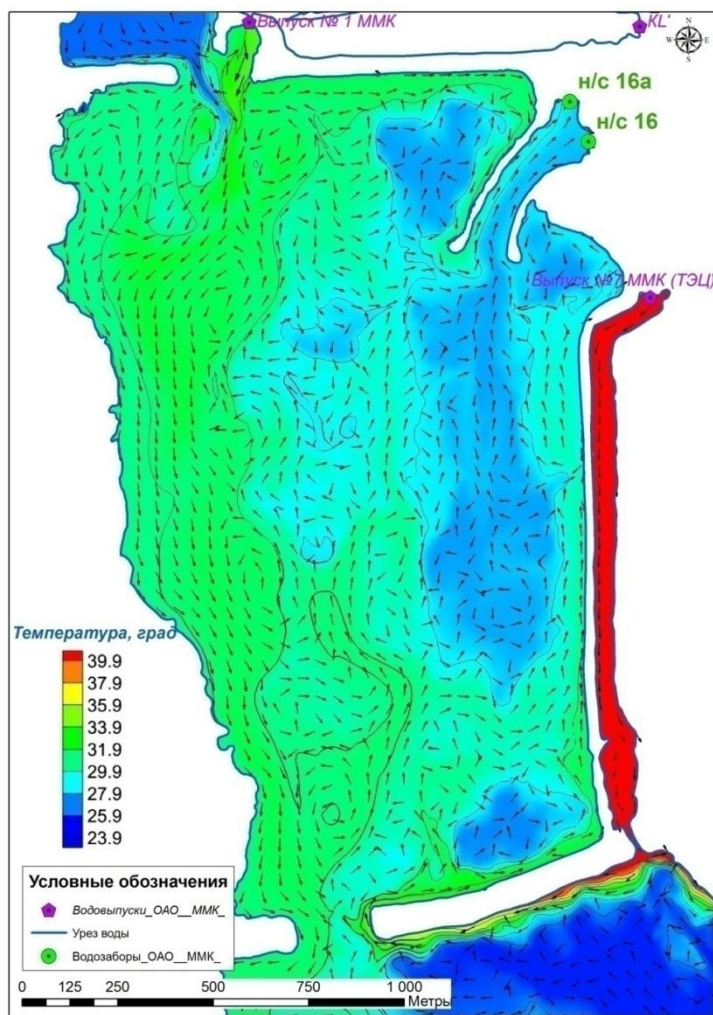


Рисунок 5.3.2 Общая схема движения теплых вод между Южным переходом и Казачьей переправой при 2 сценарном расчете

### Сценарий 3.

При данных условиях период добегания воды от 1 и 7 водовыпусков до насосных станций составляет около 3 суток. В центральной части формируется 2 достаточно крупных вихря. Скорость движения воды при подходе к насосным станциям 16 и 16а (в ковше) – около 2-3 см/сек. Скорость течения в "прорези" выпуска № 7 – 10-12 см/сек. В сложившихся условиях в огороженную часть будет притекать вода из Магнитогорского водохранилища с расходом ~ 1,5-2 м<sup>3</sup>/сек., т.е. сброс в водохранилище будет отсутствовать. Тем не менее, данного объема "свежей" воды, будет недостаточно, чтоб ощутимо разбавлять тёплые воды выпусков №1 и 7, и у насосных станций будет происходить увеличение температуры забираемой воды.

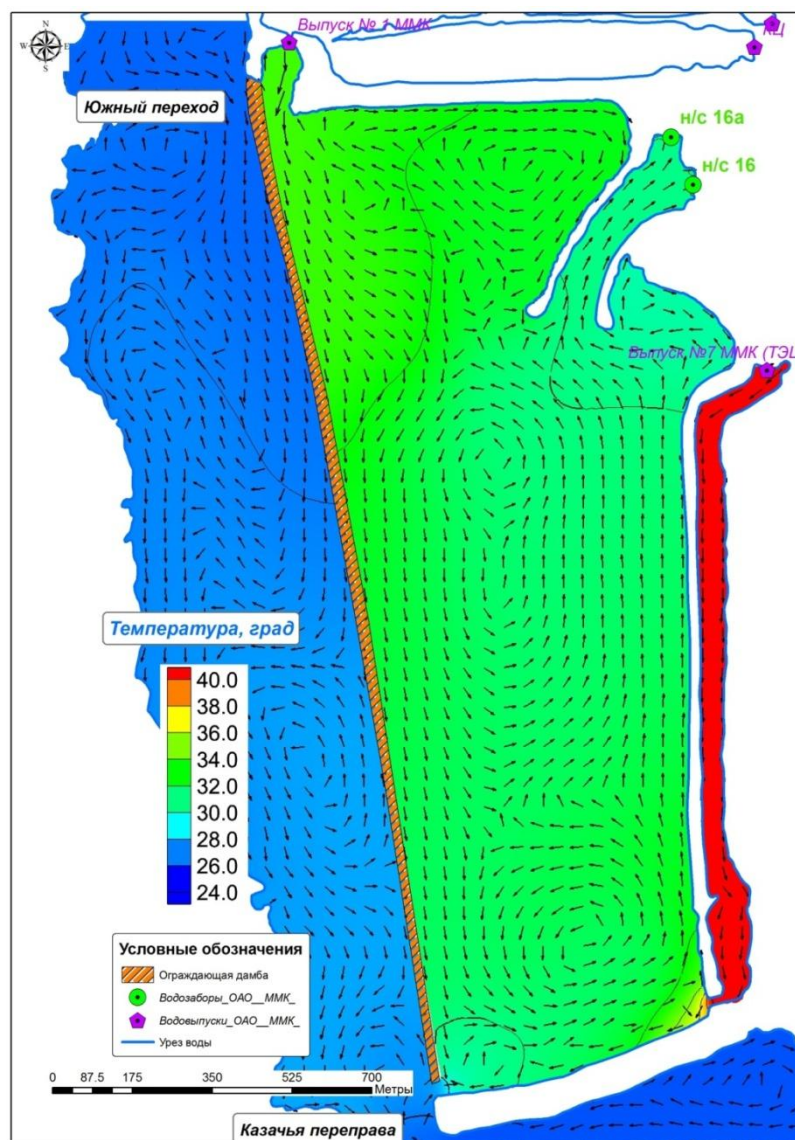


Рисунок 5.3.3. Общая схема структуры течений при реализации 3-го сценария

По аналогии с результатами по 2-му сценарию, цветовое отображение применено для наглядности и показывает только общий характер движения подогретых стоков и температуры воды на выпусках.

**4 сценарий.** В данном сценарии главная задача струенаправляющих дамб заключается в увеличении пути прохождения теплых вод выпуска №7 и, как следствие, уменьшение её температуры при дальнейшем заборе насосными станциями. Как показали расчеты, период добегания вод выпуска №7 до насосных станций, по сравнению с третьим сценарием, увеличивается более чем в 2 раза, до 7-8 суток.

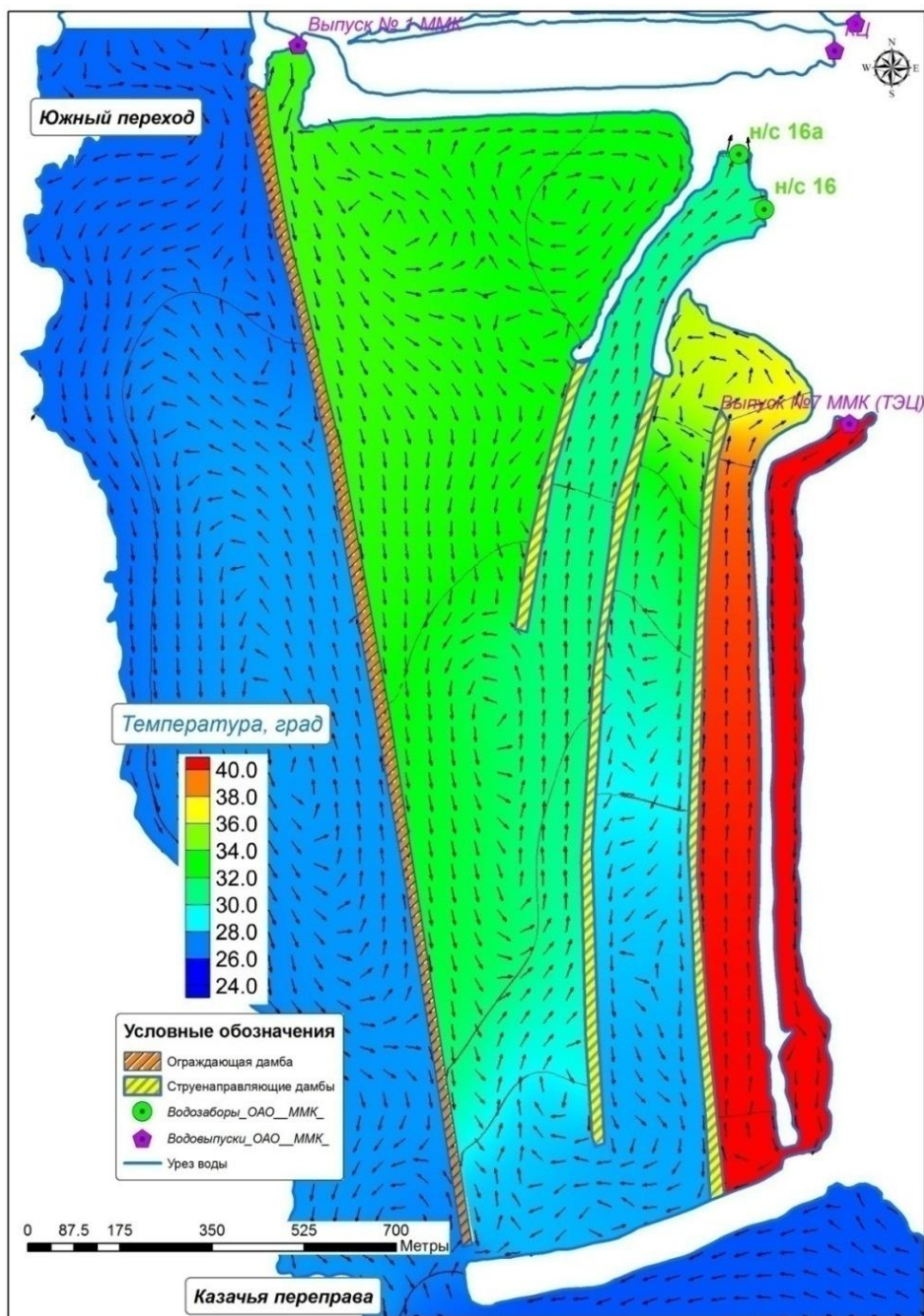
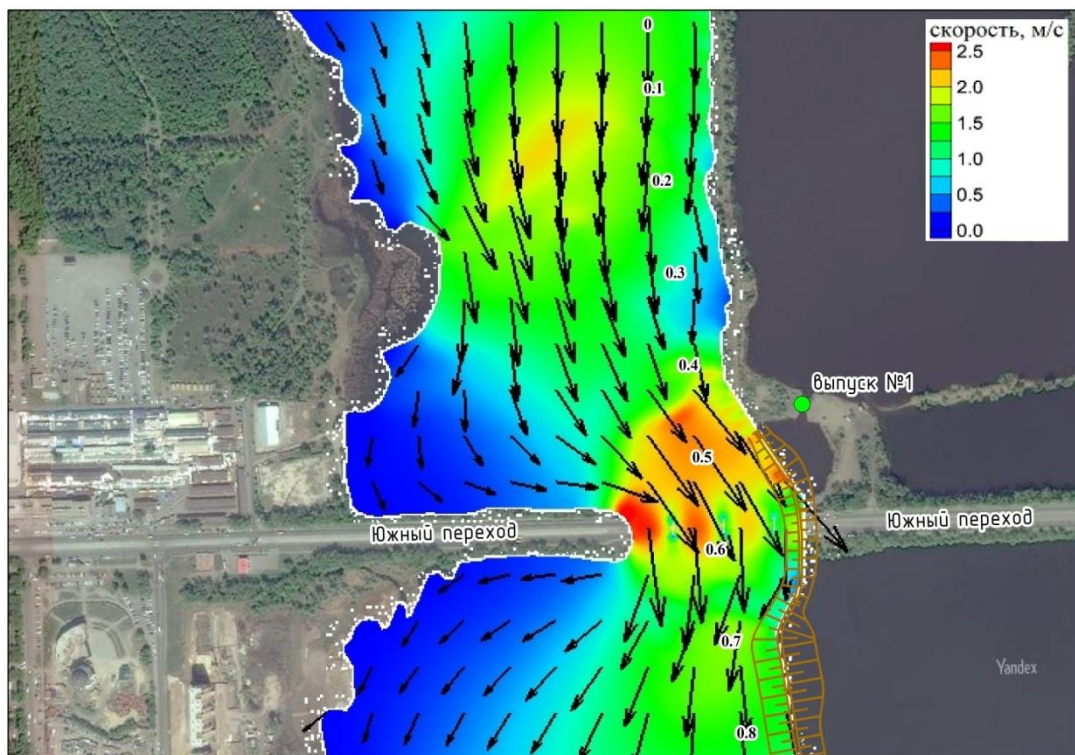


Рисунок 5.3.4. Общая схема структуры течений при реализации 4-го сценария

**5 сценарий.** При размещении в акватории водохранилища проектируемого сооружения на участке поток находится под влиянием двух факторов: стеснение мостовым переходом и дополнительное стеснение после строительства подпорной стенки. Ширина живого сечения в створе мостового перехода после реализации проекта уменьшится на 5%.



Как показывает рисунок 5.3.5, на данном участке отмечается косоуструйность потока в правобережной части водоема, поле повышенных скоростей имеет более вытянутую форму, а максимальная скорость потока в створе мостового перехода составляет 2,5 м/сек., среднее значение  $\sim 1,8$  м/сек. Ниже (700 м) мостового перехода скорость потока снижается (максимальное значение – 1,6 м/сек., среднее по створу – 0,74 м/сек.) вследствие распластывания.



*Рисунок 5.3.5. Результаты гидродинамического моделирования участка Магнитогорского водохранилища в районе Южного перехода при прохождении половодья 1% обеспеченности и поддержании отметок НПУ при реализации строительства подпорной стенки*

**Сценарий 6.** Результаты расчетов по данному сценарию показали общую схему движения подогретых вод при реализации строительства ограждающей дамбы (рисунок 5.3.6). Кроме этого, показано влияние (охлаждение) водопропускного устройства, на котором будет организован забор воды из придонного, более холодного, горизонта. При данном сценарии, теплые стоки выпуска № 7 отводятся в Магнитогорское водохранилище. По такой схеме

предполагается работа в теплые летние месяцы (июнь-август), когда не обеспечивается охлаждение за счет взаимодействия с атмосферой.

Цветовая подложка применена для наглядности отображения температуры на водовыпуске №1 и водопропускном устройстве.

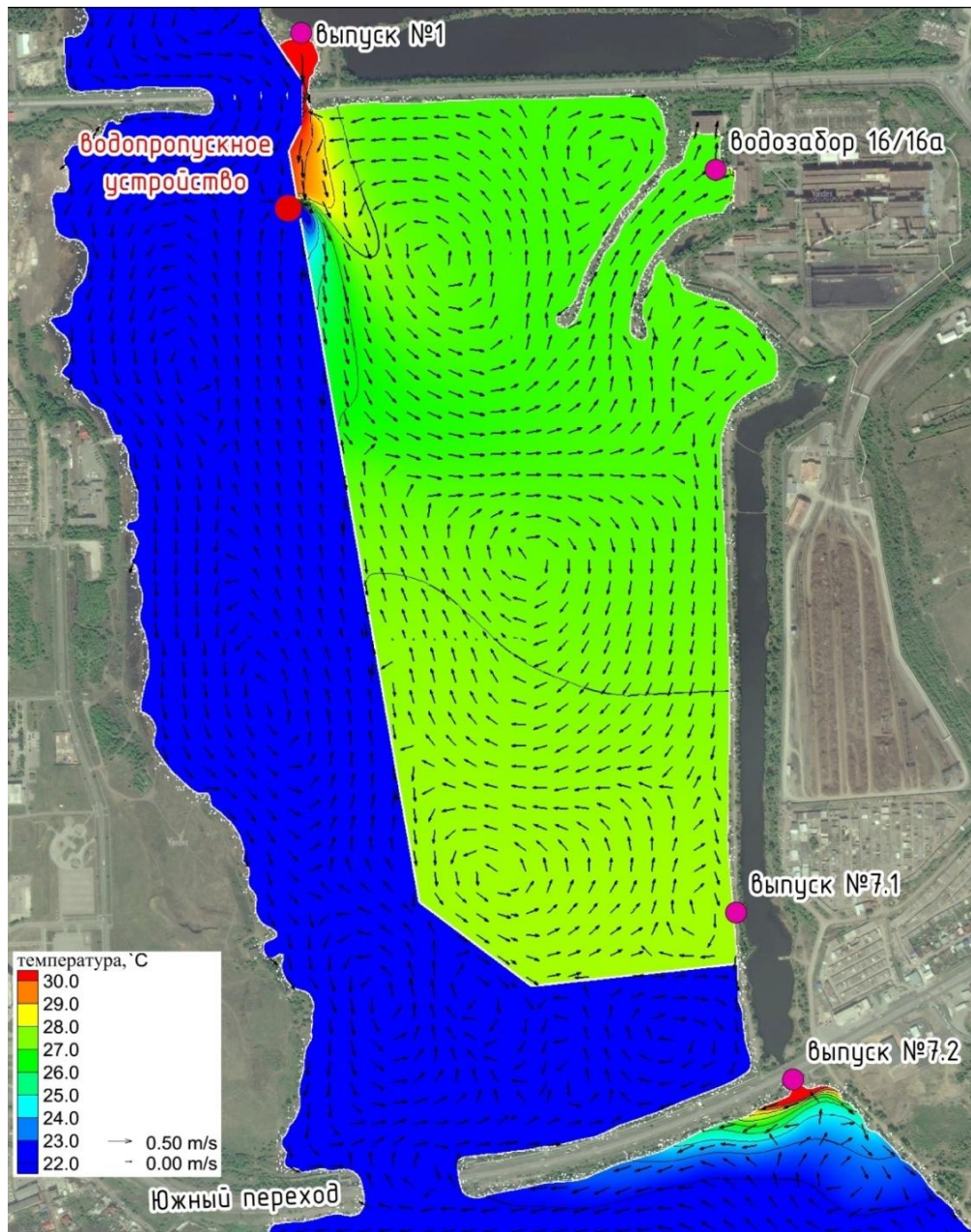


Рисунок 5.3.6. Картограмма структуры течений в проектируемой части резервуара-охладителя при реализации б сценария

## 5.4. Результаты гидротермических расчетов в рамках 3D-модели

### *Исходные данные и постановка задачи для 3D-моделирования*

Ввиду достаточной трудоемкости (временной и технической) процесса подготовки и проведения гидротермического моделирования в трехмерном приближении, для резервуара-охладителя ПАО «ММК» расчет производился для одного сценария.

Цель расчета по данному сценарию заключалась в определении возможности эксплуатации водозаборных станций 16 и 16а в наиболее жаркие летние месяцы с непревышением 28 °С температуры забираемой воды при переходе на оборотную систему водоснабжения.

Для данного объекта, на начальной стадии, было достаточно сложно построить "адаптированную" расчетную сетку, учитывающую все технические особенности объекта. При достаточно больших размерах водного объекта (несколько квадратных километров) было необходимо встроить водопропускные галереи, водопроводящее устройство, окна водозаборов с геометрическими размерами в несколько метров. Кроме этого, необходимо было учесть разную шероховатость поверхностей (ложе резервуара-охладителя, откосы ограждающей дамбы, железобетонные галереи).

В сложившихся условиях, охлаждение отводимых стоков выпусками №1 и 7.1 в замкнутую систему будет производиться, главным образом, посредством:

- разбавления более холодными водами Магнитогорского водохранилища, поступающими из придонного слоя через водопропускное устройство (рисунок 5.3.6);
- взаимодействия с атмосферой.

Согласно проведенным в несколько этапов натурным обследованиям, было установлено, что придонная температура воды Магнитогорского водохранилища в районе водопропускного устройства не превышает 23 °С. Температура воды выпуска №1 была принята равной 30 °С при расходе сброса 11,6 м<sup>3</sup>/сек, выпуска №7.1 – 40 °С при расходе сброса 3,7 м<sup>3</sup>/сек. Суммарный

забор воды насосными станциями 16 и 16а составляет  $\sim 19,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Поэтому для устранения разницы между забором и сбросом принимался расход через водопропускное устройство равный  $3,9 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

Коэффициент температурного взаимодействия водной массы с атмосферой рассчитывался по соотношениям, приведенным разделе 5.1, исходя из максимальной декадной температуры воздуха, которая наблюдалась во 2 декаду июля 2012 года и составила  $25,3 \text{ }^\circ\text{C}$  при штилевых условиях.

Кроме температуры воды, результаты модельных расчетов в 3D постановке должны были позволить оценить и динамику потоков по акватории и глубине резервуара-охладителя. Для этого необходимо было учесть, принимаемые технические решения, в частности по конструктивным особенностям водопроводящих устройств (рисунок 5.3.1-5.3.2).

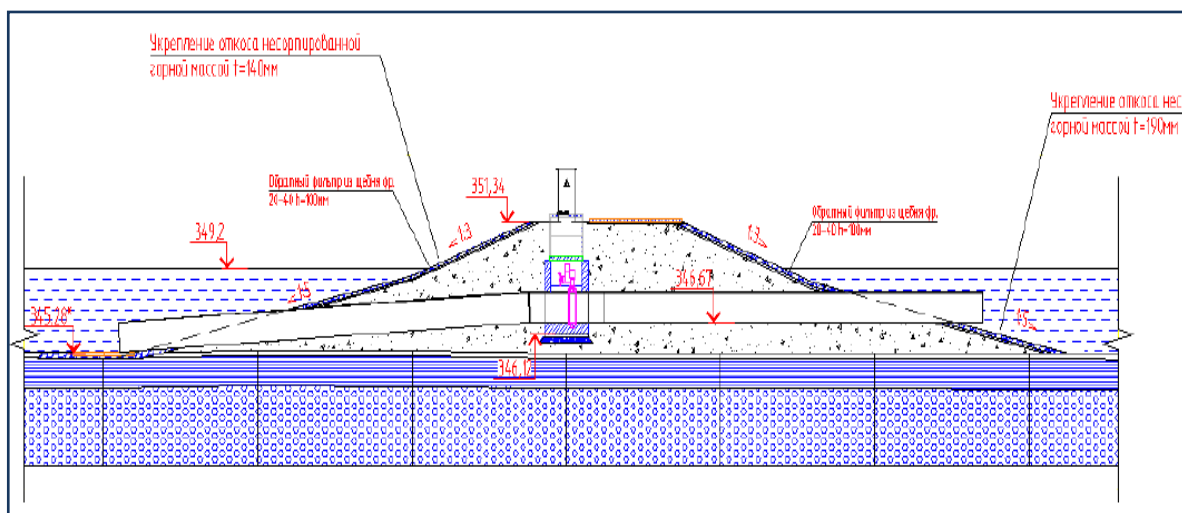


Рисунок 5.3.1. Общий вид разреза водопропускного устройства (2 ж/б трубы  $D=1420\text{мм}$ )

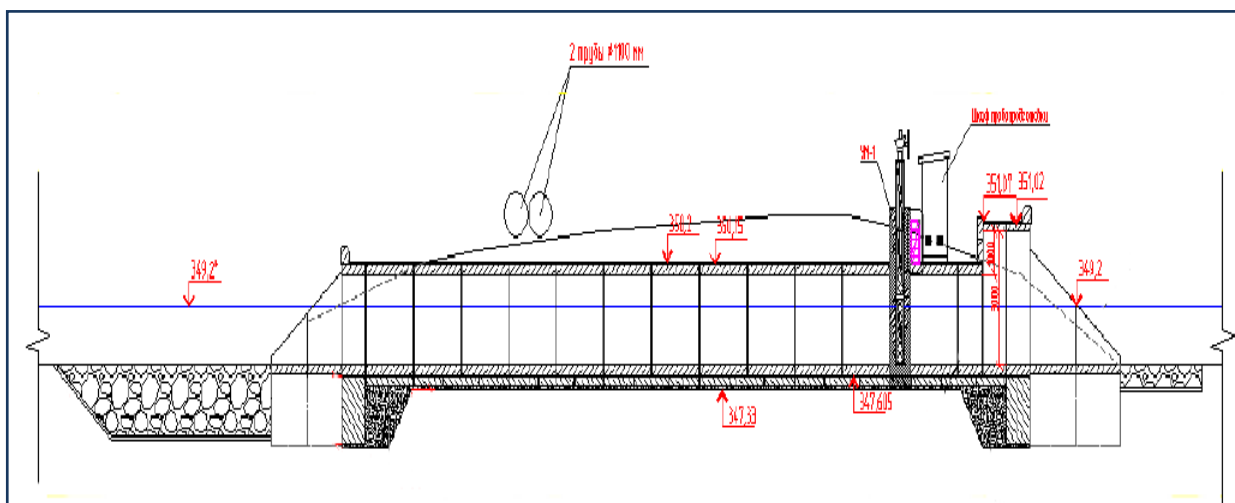


Рисунок 5.3.2. Общий вид разреза водовыпуска №7.1 (2 ж/б галереи  $2000 \times 2500 \text{ мм}$ )

Следует отметить, что для получения корректных оценок температурных полей, их распределения как по акватории, так и глубине резервуара-охладителя, принципиальное значение имело адекватное задание принимаемых технических решений по особенностям водопроводящих устройств.

Весьма сложной является задача верификации используемой 3D-модели для условий Магнитогорского водохранилища. Проблема в том, что на весьма ограниченной водной акватории действуют несколько отдельных водовыпусков и водозаборов. В то же время новый водоем-охладитель, для оценки параметров и режимов управления которого должна использоваться данная модель, будет иметь существенно отличную геометрию и режим работы. В этих условиях было принято допущение, что данная используемая модель не будет значительно отличаться в воспроизведении тепловых и гидродинамических характеристик, которые она показала при ее использовании для оценки зон теплового загрязнения, создаваемого в Камском водохранилище сбросами Пермской ГРЭС. Результаты данных расчетов были опубликованы в ведущем международном журнале по тепломассопереносу [Lyubimova et al, 2018].

#### ***Результаты модельных расчетов.***

К проведению расчетов тепловых полей, формируемых в водоеме-охладителе ПАО «ММК», в 3D-постановке были привлечены сотрудники лаборатории вычислительной гидродинамики ИМСС ПФИЦ УрО РАН в рамках совместного выполнения проектов по грантам РНФ (17-77-20093) и РФФИ (16-41-590005).

Представленные ниже результаты моделирования являются итогом достаточно трудоемкого процесса, связанного не только с особенностями задания исходной информации и построения адаптированной расчетной сетки, но и, непосредственно, с самим процессом расчета. Так, для достижения относительной стационарности модели при имеющейся многофакторности условий, необходимо было выполнять модельный расчет в течение нескольких суток.

Полученные результаты наглядно показывают наличие существенной стратификации при формировании температурных полей (рисунок 5.3.3-5.3.5). Видно, что наибольшее температурное воздействие на акваторию оказывают сбросы выпуска №7 (7.1), в то время как стоки выпуска №1 охлаждаются за счет поступления более холодной воды из придонного горизонта Магнитогорского водохранилища, посредством водопропускного устройства.

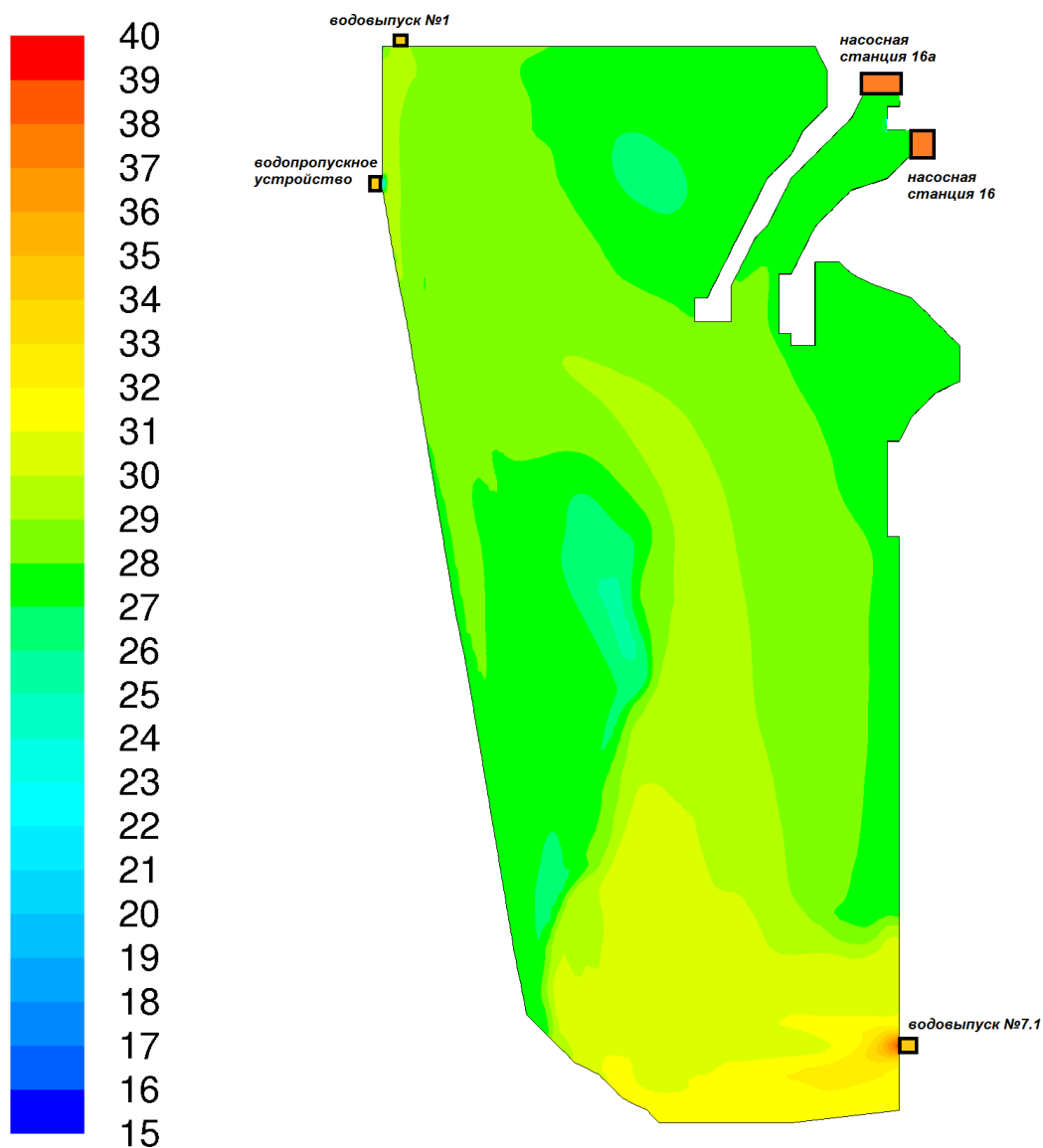


Рисунок 5.3.3. Схема распределения температуры воды ( $^{\circ}$ С) на поверхности акватории в южной части резервуара-охладителя при сценарном расчете

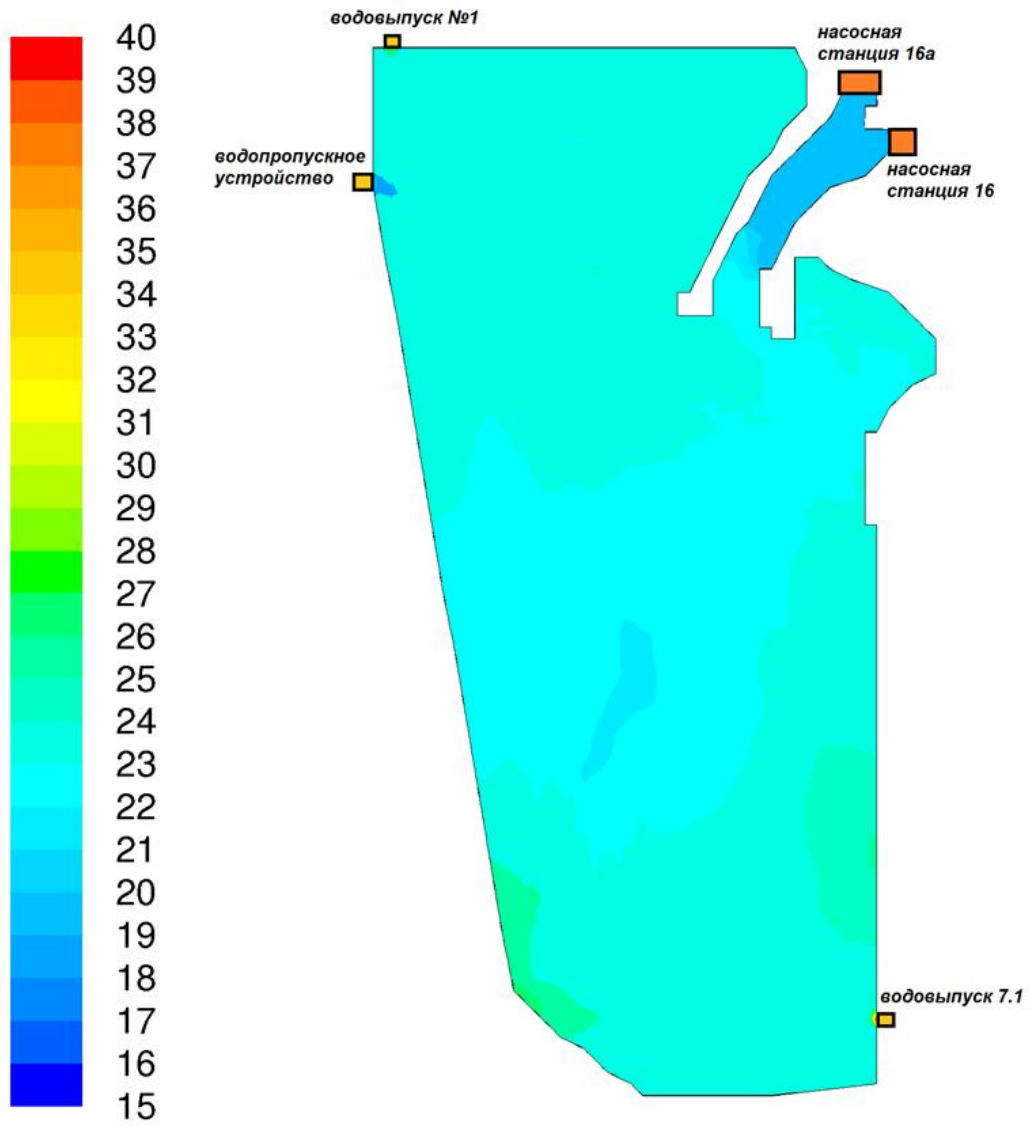


Рисунок 5.3.4. Схема распределения температуры воды ( $^{\circ}\text{C}$ ) на глубине 2 м в южной части резервуара-охладителя при сценарном расчете

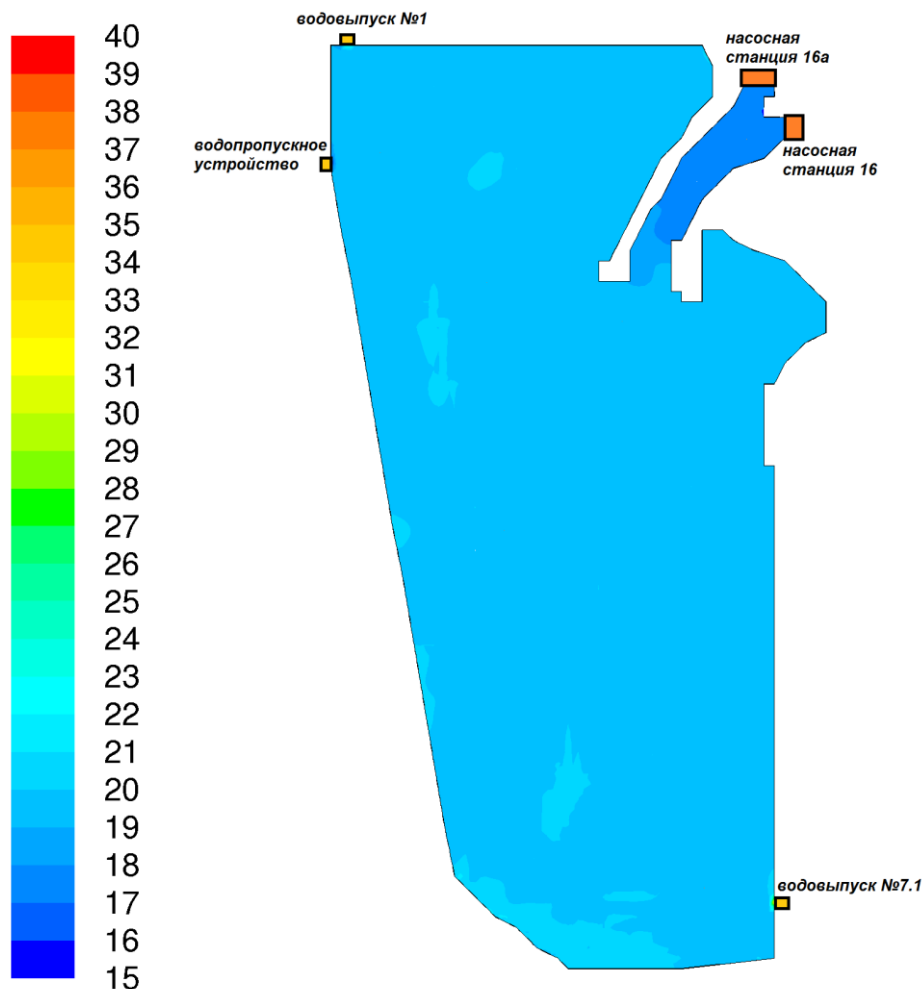


Рисунок 5.3.5. Схема распределения температуры воды ( $^{\circ}\text{C}$ ) на глубине 3 м в южной части резервуара-охладителя при сценарном расчете

При формировании конкретных технических решений, а также рекомендаций по повышению эффективности дальнейшей эксплуатации создаваемого сооружения, необходимо было определить горизонт слоя скачка. Для этого на акватории были намечены 6 вертикалей и построены эпюры распределения температуры воды по глубине (рисунок 5.3.6).

Следует отметить, что в зависимости от расположения водовыпусков, слой скачка располагается, в среднем, на глубине 2-4 м. Это является дополнительным подтверждением того, что расположенные глубже (более холодные) водные массы слабо вовлекаются в процесс охлаждения. Этот результат является базовым для проработки возможных мероприятий по повышению эффективности использования резервуара-охладителя, в первую очередь, в относительно короткий период максимальных температур воздуха.



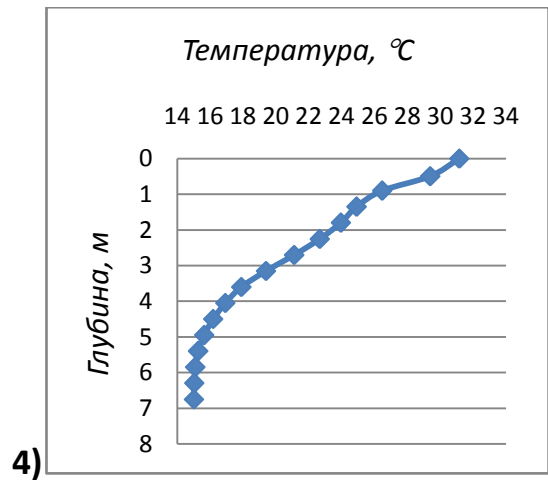
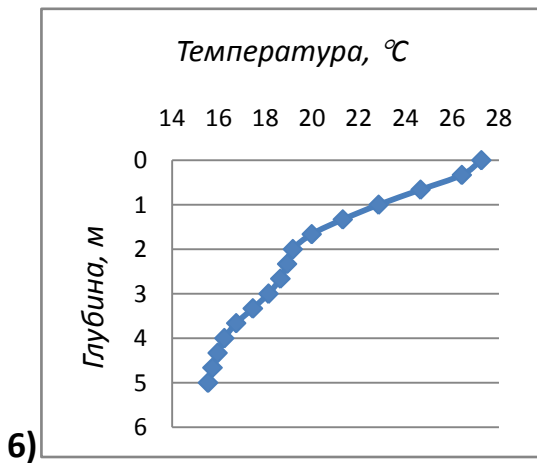
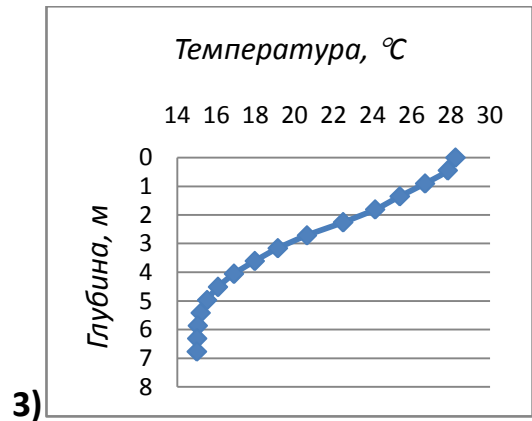
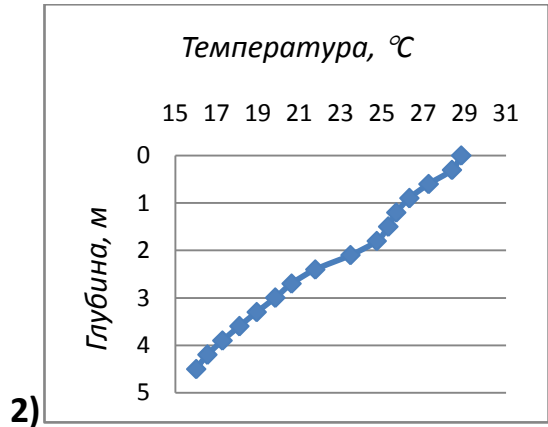
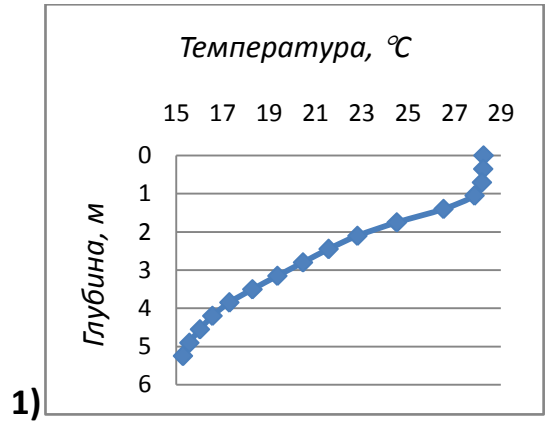
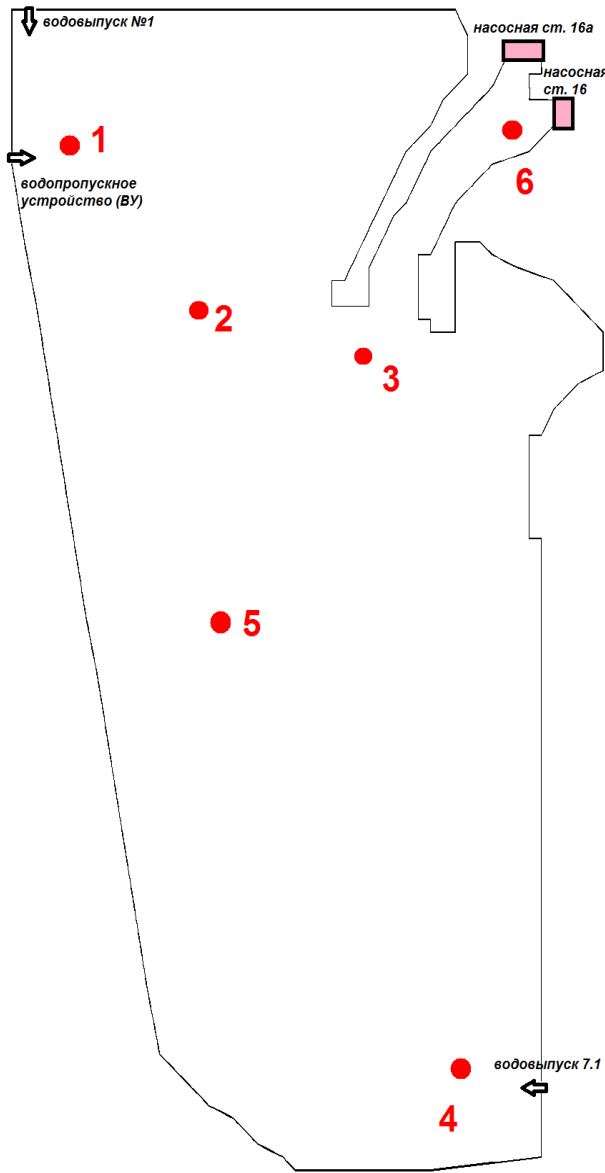


Рисунок 5.3.6. Распределение температуры воды по глубине в различных точках резервуара-охладителя при сценарном расчете

Для понимания процесса движения и перемешивания в резервуаре-охладителе водных масс, имеющих разную температуру, наиболее удобно использовать векторные схемы полей течения (рисунок 5.3.6-5.3.7).

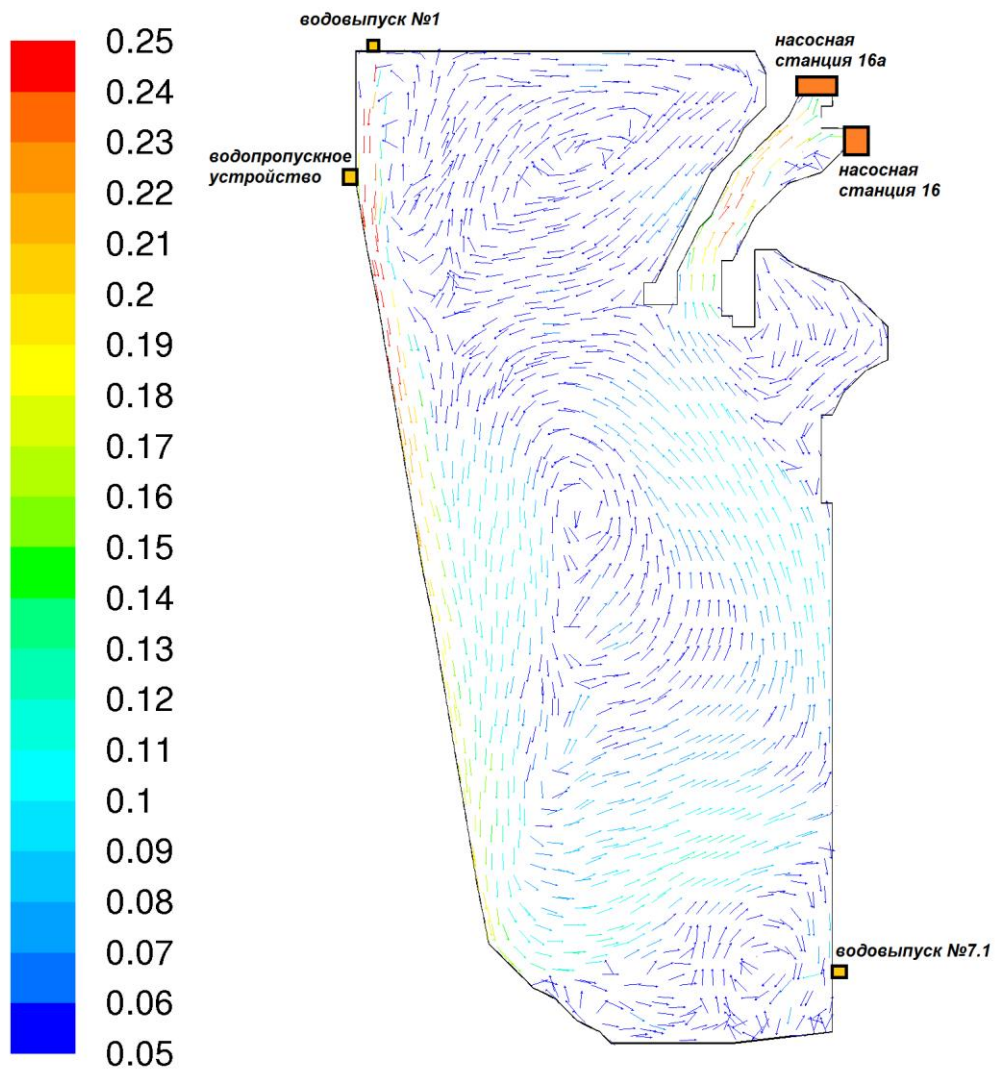


Рисунок 5.3.7. Схема векторного поля течений (м/сек.) на поверхности резервуара-охладителя при принятом сценарном расчете

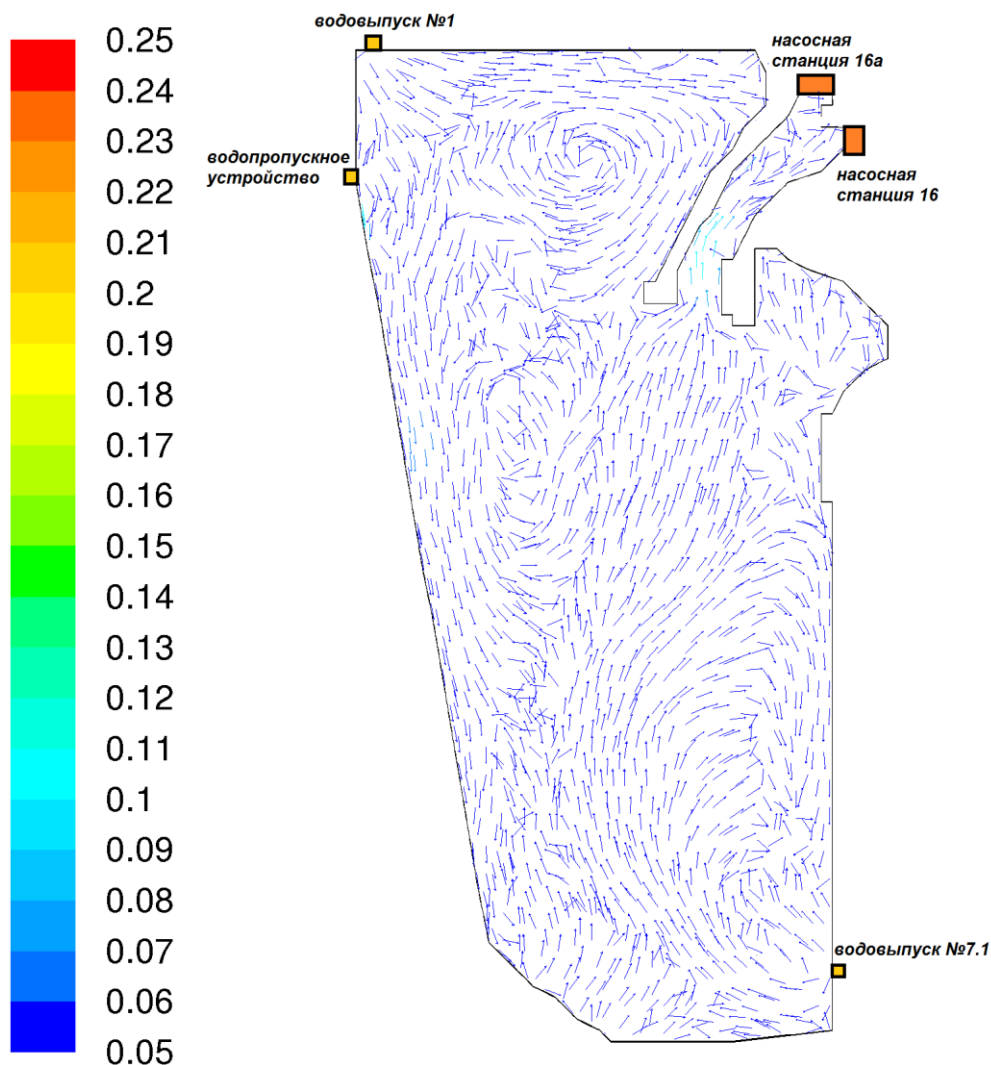


Рисунок 5.3.8. Схема векторного поля течений (м/сек.) в резервуаре-охладителе на глубине 3 м при принятом сценарном расчете

Представленные выше результаты сценарного гидротермического моделирования в 3D-постановке, позволили сделать вывод о невозможности перехода ПАО «ММК» на полностью замкнутый (оборотный) цикл водопользования в течение всего года. Было принято решение о необходимости организации дополнительного водовыпуска (7.2) в Магнитогорское водохранилище, для отведения теплых вод в лимитирующий летний период (рисунок 5.3.6).

Проведенные расчеты достаточно хорошо воспроизводят наличие слоя скачка, что дает возможность организации селективного отбора воды с целью повышения устойчивости функционирования системы водопользования ПАО «ММК» в лимитирующий период.

Селективный забор воды из придонных более охлажденных горизонтов может снижать температуру забираемой воды только в течение:

$$T_{\text{сел}} \sim \left( \frac{W_{\text{н}}}{Q_{\text{заб}}} \right) \quad (5.3.1)$$

где  $W_{\text{н}}$  – объем нижней охлажденной водной массы (ниже слоя скачка) резервуара [ $\text{м}^3$ ],

$Q_{\text{заб}}$  – расход забора воды на охлаждение [ $\text{м}^3/\text{сек.}$ ].

Как показали результаты расчетов, выполненные на основе натуральных измерений, при характерном объеме нижнего охлажденного слоя резервуара-охладителя  $\sim 4,2$  млн.  $\text{м}^3$  и заборе воды на охлаждение (разбавление)  $\sim 5$   $\text{м}^3/\text{сек.}$ , данный слой может быть использован в течение  $\sim 10$  суток.

Однако критические ситуации с высокой среднесуточной температурой воздуха, как показал анализ метеорологической информации по г. Магнитогорску, также имеют невысокую повторяемость: обеспеченность 1% – 26,2 °С (рисунок 1.3.3).

Даже если запасов охлажденной воды будет недостаточно для полного обеспечения замкнутого водоснабжения, то селективный отбор воды позволит, как минимум на 10 суток, увеличить период оборотной системы водопользования ПАО «ММК».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная диссертационная работа посвящена решению актуальных водохозяйственных задач на примере энергетических комплексов Пермской ГРЭС (г. Добрянка, Пермский край) и ТЭЦ-1 ПАО "ММК" (г. Магнитогорск, Челябинская область). Принципиальной особенностью тепловой энергетической системы является тот факт, что только около 50% энергии от сжигания топлива тратится на выработку электричества, а остальная часть ассимилируется в окружающей среде. Наиболее эффективным теплоносителем, в данном случае, ввиду ее высокой теплоемкости, является вода. Поэтому, в режиме эксплуатации энергетических комплексов, возникает проблема отведения теплых стоков в водоемы-охладители. При этом необходимо отметить, что режим отведения должен учитывать 2 важнейших аспекта: экологический, который выражается в воздействии на биологические ресурсы водоема и напрямую связан с экономической составляющей эксплуатации комплекса; технологический – недопустимость поступления отводимых подогретых стоков к заборным устройствам.

В диссертационной работе рассмотрены энергетические комплексы как с прямоточной, так и с оборотной системой охлаждения. Каждая из них имеет как ряд достоинств, так и характеризуется определенными недостатками. На примере Пермской ГРЭС рассматривается прямоточная система охлаждения станции, которая эксплуатируется в условиях наличия крупного Камского водохранилища с объемом воды более 10 км<sup>3</sup>. В этом случае устойчивая эксплуатация гарантируется достаточными запасами воды на охлаждение в течение любого периода.

На примере же Магнитогорского водохранилища рассматривается вопрос возможности перехода на замкнутый цикл водоснабжения, как наиболее экологичный. В этом случае экологический аспект решается созданием ограждающей дамбы и соответствующим уменьшением (в нашем случае на 85%) объема отведения сточных вод. При этом на первый план выходит технологический аспект, заключающийся в недопущении поступления воды с

температурой более 27-28 °С на насосные станции ТЭЦ-1. Учитывая тот факт, что в лимитирующий летний период, отмечается существенная температурная неоднородность по глубине Магнитогорского водохранилища, принципиальным становится использование селективного отбора воды с более глубоких, охлажденных горизонтов.

Данная работа построена на сопряжении большого объема натуральных измерений и комплекса комбинированных (1D→2D→3D) гидродинамических и гидротермических моделей.

В частности:

- Выполнена совокупность работ по:
  - изучению морфометрических особенностей исследуемых участков на основе детальных батиметрических съемок;
  - анализу метеорологической информации по температурному и ветровому режиму территорий размещения энергетических комплексов;
  - натурному исследованию температурных полей в зонах воздействия энергетических комплексов на водоемы-охладители с использованием современных средств измерений
- На основе уравнения теплового баланса водоема-охладителя в «0»-мерном приближении выполнен анализ инерционности теплового режима рассматриваемых водных объектов по отношению к изменению метеорологических характеристик и роли потоков тепла через дно водоема;
- Для корректного описания температурных полей, формируемых под воздействием энергетических комплексов, были использованы сопряженные гидродинамические модели в 1D→2D→3D-постановках для Камского водохранилища в районе расположения Пермской ГРЭС и Магнитогорского водохранилища в зоне воздействия ПАО «ММК». При этом 3D-модели рассматривались в негидростатическом приближении;

- Проведены многовариантные расчеты возможных зон теплового воздействия при различных модельных сценариях с заданием различных метеорологических, гидрологических и технологических параметров Пермской ГРЭС;
- Оценены, на основе анализа численных экспериментов, условия поступления (забора) теплых отводимых стоков в подводящий канал Пермской ГРЭС;
- Проведен, путем вычислительных экспериментов на основе гидродинамических моделей, анализ тепловых полей, формирующихся в Магнитогорском водохранилище при различных схемах организации системы оборотного водоснабжения;
- Показана, на основе натурных наблюдений и выполненных численных расчетов, целесообразность организации селективного забора воды для ТЭЦ-1 ПАО «ММК» из нижних, более охлажденных горизонтов с целью повышения устойчивости функционирования водохозяйственного комплекса ПАО «ММК». Выполненные расчеты показали возможность увеличения работы замкнутой системы не менее чем на 10 суток при селективном отборе воды в неблагоприятный лимитирующий период;
- Результаты сценарного гидротермического моделирования в 3D-постановке, позволили сделать вывод о невозможности перехода ПАО «ММК» на полностью замкнутый (оборотный) цикл водопользования в течение всего года и необходимо предусмотреть организацию дополнительного водовыпуска (7.2) в Магнитогорское водохранилище, для отведения теплых вод в лимитирующий летний период.

Полученные результаты легли в основу научно-технических проработок по реализации проектных решений. Так, с использованием материалов диссертационной работы, было проведено технико-экономическое обоснование различных вариантов строительства нового энергоблока Пермской ГРЭС.

Реализация проекта реконструкции оборотной системы водоснабжения с расширением резервуара-охладителя ПАО «ММК» позволит существенно

снизить экологическое воздействие на Магнитогорское водохранилище. Предложенные конструктивные решения легли в основу проекта, прошедшего государственную экспертизу и принятого к реализации со сроком сдачи в ноябре 2018 года.



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аверкиев А.Г., Макаров Т.И., Сипятин В.И. Бесплотинные водозаборные сооружения. "Энергия". Л., 1965. - 183 с.
2. Айтсам А.М., Пааль Л.А., Вальнер Х.А. Об основах инженерного расчёта самоочищения непроточных водоёмов. В кн.: Материалы I Всесоюзного симпозиума по вопросам самоочищения водоёмовсточных вод. Таллин, - 1968.- С. 99-116.
3. Базинская Е.Г. Результаты натурных исследований водохранилища-охладителя Старо-Бешевской ГРЭС / Е.Г. Базинская // Тр. координац. совещ. по гидротехнике. - 1967. - Вып. 32. - С.174-194.
4. Белолипецкий В.М. Численное моделирование ветровых течений в стратифицированных водоемах методом расщепления. Гидростатическое приближение / В.М. Белолипецкий, П.В. Белолипецкий // Вычислительные технологии. - 2006. - том 11, N5. - С. 21-31.
5. Беховых Л.А. Основы гидрофизики: учебное пособие / Л.А. Беховых, С.В. Макарычев, И.В. Шорина. - Барнаул: Издательство АГАУ, 2008. - 172 с.
6. Борисенко В.М. Годовой термический цикл озера Кенон (водома-охладителя ГРЭС) / В.М. Борисенко, М.П. Вологодин // Зап. Забайк. фил. Геогр. об-ва СССР. - 1972. - Вып. 62. - С. 34-35.
7. Бравая Е.Б. Образование туманов испарения в естественных условиях и после сброса теплых вод / Е.Б. Бравая, Т.П. Ковалевская, С.Х. Куликова // Методы расчета прогнозов водных и климатических ресурсов. Пермь, - 1978. - С. 100-105.
8. Браславский А.П. Тепловое влияние объектов энергетики на водную среду / А.П. Браславский, М.Н. Кумарина, М.Е. Смирнова. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. - 252 с.
9. Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада / Н.В. Буторин. Л.: Изд-во «Наука», 1969. - 320 с.

10. Буторин Н.В. Особенности вертикального распределения температуры воды в зоне влияния Конаковской ГРЭС / Н.В. Буторин // Биология внутренних вод: информ. бюл. 1971. - N10.- С. 66-71.
11. Васильев О.Ф. и др. Стратифицированные течения. Итоги науки и техники. Гидромеханика, т.8, изд. ВНИИТИ 1975, С. 74-119.
12. Веницианов Е.В., Лепихин А.П. Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжелых металлов в природных водах / Под науч. ред. А.М. Черняева; ФГУП КамНИИВХ. - Екатеринбург: Изд-во РосНИИВХ, 2002.- 236 с.
13. Верещагина Е.А. Оценка влияния Белоярской АЭС на гидротермический режим водоема-охладителя / Е.А. Верещагина, А.Ю. Дворников, В.Г. Румынин, В.А. Рябченко, А.М. Никуленков // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. - 2013. - Т. 6, - N4. - С. 58-67.
14. Вологодин М.П. Натурные исследования гидротермического режима водоема-охладителя Читинской ГРЭС / М.П. Вологодин // Зап. Забайкал. фил. Геогр. о-ва СССР. - 1972. - Вып. 62. С. 16-23.
15. Вольцингер Н.Е. Океанологические модели негидростатической динамики. Обзор. / Н.Е. Вольцингер, А.А. Андросов, К.А. Клеванный, А.С. Сафрай // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. - 2018. - Т. 11, - N1. - С. 3-20.
16. Гавриленко Г.Г. Теплосток на границе вода – донные отложения в небольшом озере / Г.Г. Гавриленко, Г.Э. Здоровеннова, Р.Э. Здоровеннов, Н.И. Пальшин, А.В. Митрохов, А.Ю. Тержевик // Гидрофизика. - 2015. - N9. - С. 3-9.
17. Гидротермическое моделирование и тепловой расчет Камского водохранилища с учетом трех действующих паросиловых блоков и вновь строящегося энергоблока №4 ПГУ-800 Пермской ГРЭС: отчет о НИР / Ляхин Ю.С., Лепихин А.П., Калинин В.Г., Любимова Т.П. и др. - Пермь: Западно-Уральский институт водных и экологических проблем, 2014.– 164 с.

18. Голованов В.К. Окончательно избираемые и верхние летальные температуры молоди некоторых видов пресноводных рыб / В.К. Голованов, А.К. Смирнов, Д.С. Капшай // Труды Карельского научного центра РАН. - 2012.- №2. - С. 70-75.
19. Готлиб Я.Л. Тепловой режим водохранилищ гидроэлектростанций / Я.Л. Готлиб, В.М. Жидких, Н.М. Сокольников. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1976. - 200 с.
20. Гринвальд Д.И. Речная турбулентность / Д.И. Гринвальд, В.И. Никора. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1988.- 152 с.
21. Григорьева И.Л. Изменение гидроэкологического состояния водоемов-охладителей под влиянием сброса теплых вод объектами теплоэнергетики Тверской области / И.Л. Григорьева, А.Б. Комиссаров, В.В. Кузовлев, ЕА. Чекмарёва // Сборник докладов: Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии. - 2018. - С. 338-342.
22. Гуржапов Б.О. Оценка влияния сбросов Гусиноозерской ГРЭС на термический и гидрохимический режим оз. Гусиное / Б.О. Гуржапов, Б.З. Цыдыпов, С.Г. Андреев, А.А. Аюржанаев, Б.В. Содномов, Э.А. Батоцыренов, И.А. Павлов и др. // Экология водоемов-охладителей энергетических станций: сб. материалов Всерос. научн.-практ. конференции. - Чита: ЗабГУ, - 2017. - С. 57-64.
23. Дебольская Е.И. Исследование гидро- и термодинамических процессов в системе Шатурских озер-охладителей / Е.И. Дебольская, О.Я. Масликова, А.Ю. Исаенков, И.С. Кузнецов // Гидротехническое строительство. - 2010. - №3. - С. 2-10.
24. Дёмина Т.А. Экология, природопользование, охрана окружающей среды 3-е изд. / Т.А. Дёмина. - М.: Аспект Пресс, 1996. - 143 с.
25. Динамика потребления электроэнергии как индикатор экономической активности: бюллетень социально-экономического кризиса в России / Л. Григорьев, А. Голяшев, Е. Буряк, А. Лобанова, В. Кульпина. - выпуск 10., - Аналитический центр при правительстве РФ, 2016. - 7 с.

26. Дубников А.Н. Натурные исследования термического режима водохранилища–охладителя Сургутской ГРЭС / А.Н. Дубников // Тр. координац. совещ. по гидротехнике. 1977. - № 115. - С. 129-132.
27. Дубровин Л.И. Камское водохранилище / Л.И. Дубровин, Ю.М. Матарзин, И.А. Печеркин. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1959. - 159 с.
28. Дубровин Л.И. Новые данные к гидрометеорологической характеристике Камского водохранилища / Л.И. Дубровин // Докл. IV Всеурал. совещ. по физико- и экономико-географическому районированию. Пермь, - 1958. - Вып. 1. С. 46-51.
29. Дьяков А.Ф. Природоохранная деятельность ТЭС при защите водоемов / А.Ф. Дьяков, И.В. Гордин, А.П. Берсенева, Б.С. Федосеев // Теплоэнергетика. - 1997. - №12. - С. 2-8.
30. Зиновьев А.Т. Математическое моделирование гидрологических процессов в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС на реках Сибири: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.27 / Зиновьев Александр Тимофеевич. - Барнаул, - 2014. - 43 с.
31. Зиновьев А.Т. Математическое моделирование русловых процессов на участке крупного долинного водохранилища в условиях переменного подпора / А.Т. Зиновьев, К.Б. Кошелев, К.В. Марусин, А.А. Шайдулина // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: сб. трудов конф. - Пермь. - 2017. - С. 69-73.
32. Изучение качества воды в районе Чусовского водозабора в связи с его расширением: отчет о НИР/ Лепихин А.П., Немковский Б.Б. и др. - Пермь: ВНИИОСуголь, - 1983. - С. 35-47.
33. Ильин В.П. Математическое моделирование и философия науки / В.П. Ильин // Вестник Российской Академии Наук. - 2018. - Т. 88, №1. - С. 58-66.
34. Калинин В.Г. Ледовый режим рек и водохранилищ бассейна Верхней и Средней Камы: монография / В.Г. Калинин; Перм. гос. ун-т. Пермь, 2008. - 252 с.

35. Кинд Н.Я., Аверкиев А.Г. Гидравлическое моделирование стратифицированных потоков. В кн.: Материалы международного симпозиума по стратифицированным течениям. Новосибирск, - 1972. С. 3-8.
36. Китаев А.Б. Тепловое загрязнение Камского водохранилища (по материалам полевого обследования 2007 г.) / А.Б. Китаев, В.М. Носков // Международный журнал экспериментального образования.- 2015. - №7. - С. 173-174.
37. Коколия Т.Г. Комплексные исследования водохранилищ-охладителей ГЭС / Т.Г. Коколия// Симпозиум по влиянию подогретых вод теплоэлектростанций на гидрологию и биологию водоемов. Борок, - 1971. - С. 61-74.
38. Кошелев К.Б. Трехмерная гидроледотермическая модель Телецкого озера / К.Б. Кошелев, А.Т. Зиновьев, А.В. Дьяченко, К.В. Марусин // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: труды ШВСерос. конф. - Барнаул. - 2017. - С. 122-128.
39. Лапшин Г.Н. Натурные исследования водохранилищ-охладителей / Г.Н. Лапшин, Н.Н. Терентьев // Тр. координац. совещ. по гидротехнике. 1967. - Вып. 32. - С. 149-174.
40. Лепихин А.П. Влияние «отложенных» загрязнений на формирование гидрохимического режима водных объектов (на примере промышленного комплекса г. Кирово-Чепецк) / А.П. Лепихин, Ю.С. Ляхин // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2011. - № 3. - С. 58-69.
41. Лепихин А.П. Гидродинамическое моделирование реки Вятки в среднем течении: постановка задачи, результаты расчетов / А.П. Лепихин, Т.П. Любимова, Ю.С. Ляхин, А.А. Тиунов, А.В. Богомолов, Д.И. Перепелица, Я.Н. Паршакова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2013. - №3. - С. 16-32.

42. Лепихин А.П. К проблеме отведения избыточных рассолов предприятиями калийной промышленности в водные объекты / А.П. Лепихин, Т.П. Любимова, Я.Н. Паршакова, А.А. Тиунов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2010. - N 3. С. 57-74.
43. Лепихин А.П. К проблеме расчета зон техногенного теплового загрязнения крупных водохранилищ (на примере Пермской ГРЭС) / А.П. Лепихин, Т.П. Любимова, Ю.С. Ляхин, Я.Н. Паршакова, В.В. Коновалов, А.А. Тиунов // Сборник: Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года». - 2015. -С. 321-327.
44. Лепихин А.П. Опыт создания и эксплуатации гидродинамических моделей крупных водохранилищ (на примере Камского и Воткинского) / А.П. Лепихин, Е.А. Садохина, С.А. Иваненко // Глобальные природные и антропогенные процессы и экология среды обитания. - 1996. - вып. 4. - С. 53-66.
45. Лепихин А.П. Особенности регулирования качества воды при ее селективном заборе из водохранилищ / А.П. Лепихин, Т.П. Любимова, А.А. Возняк, Я.Н. Паршакова, А.В. Богомолов, Ю.С. Ляхин // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2017. - N 3. - С. 56-68.
46. Лепихин А.П. Особенности численного моделирования плотностных стратификационных эффектов в динамике крупных водохранилищ / А.П. Лепихин, Т.П. Любимова, Ю.С. Ляхин, Я.Н. Паршакова, А.В. Богомолов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2016. - N 4. - С. 32-46.
47. Литвинов А.С. О расчете длины и глубины клина холодной воды в Мошковичском заливе Иваньковского водохранилища / А.С. Литвинов // Биология внутренних вод: информ. бюл. - 1973. - № 19. - С. 56-59.

48. Литвинов А.С. О структуре поля температуры поверхностного слоя воды в районе сброса подогретых вод Конаковской ГРЭС / А.С. Литвинов, М.Д. Исаев // Биология внутренних вод: информ. бюл. - 1974. - N 21. - С. 63–66.
49. Лучников А.И. Опыт применения беспилотных летательных аппаратов для оценки состояния берегов поверхностных водных объектов / А.И. Лучников, Ю.С. Ляхин, А.П. Лепихин // Водное хозяйство России. - 2018.- №1. - С. 37-46.
50. Лятхер В.В. Условие формирования плотностного течения в водоёмах. В кн. Труды координационного совещания по гидротехнике М.М. - вып. XI. - 1964.
51. Ляхин Ю.С. Опыт использования совмещенных с GPS эхолотов и ГИС-технологий для построения картосхем водных объектов / Ю.С. Ляхин, Д.И. Перепелица // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2009. - N 6. - С. 23-35.
52. Ляхин Ю.С. Особенности влияния Пермской ГРЭС на Камское водохранилище / Ю.С. Ляхин // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. Пермь, - 2015. - С.40-43.
53. Ляхин Ю.С. Особенности теплового режима Магнитогорского водохранилища и оптимизация системы водоснабжения ОАО «ММК» / Ю.С. Ляхин, А.А. Тиунов // В сборнике: Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды VI Международной научно-практической конференции. Пермь, - 2017. - С. 216-221.
54. Ляхин Ю.С. Технологические аспекты повышения эффективности использования водоемов-охладителей крупных промышленных комплексов (на примере ОАО «ММК») / Ю.С. Ляхин, А.П. Лепихин // В сборнике: Экология водоемов-охладителей энергетических станций. Чита, - 2017. - С. 178-184.
55. Макаров А.И. Исследования и методы определения основных характеристик гидротермического режима в ближней зоне водоемов-

- охладителей / А.И. Макаров, Ю.А. Виноградов. Деп. в Инфорэнерго 10.02.86.N 2058–ЭН. - 52 с.
56. Макаров И.Д. Глубинные селективные водозаборы тепловых электростанций. // Тр.: координации совещаний по гидротехнике вып. 39. «Энергия», - 1968. - С. 68-93.
57. Матарзин Ю.М., Богословский Б.Б., Мацкевич И.К. Гидрологические процессы в водохранилищах. Пермь 1977, - 88 с.
58. Матарзин Ю.М., Богословский Б.Б., Мацкевич И.К. Специфика водохранилищ и их морфометрия. Пермь, 1977, - 68 с.
59. Методические указания. Гидрологические наблюдения и работы на гидрометеорологической сети в устьевых областях рек. - СПб.: Гидрометеиздат, 1993. - 187 с.
60. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Бассейн реки Камы. Т. 1, вып. 25. Л.: Гидрометеиздат, 1988. - 707 с.
61. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т.1, М.:«Наука». -1965. - 639 с.
62. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 6. Часть I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. - Л.: Гидрометеиздат, 1978. - 74 с.
63. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 9. - Л.: Гидрометеиздат, 1990. - 206 с.
64. Носков В.М. Изменение условий рекреации при тепловом загрязнении Пермской ГРЭС / В.М. Носков, Г.А. Морозова // Естественные науки – народному хозяйству: тез. докл. Пермь, - 1988. - С. 136–137.
65. Одрова Т.В. Гидрофизика водоёмов суши. Л.:Гидрометеиздат.1979. - 311 с.
66. Опекунов А.Ю. Теория и практика экологического нормирования в России: учебное пособие / А.Ю. Опекунов, А.Г. Ганул. - СПб: Изд-во С.-Петербурб. ун-та, 2014. - 332 с.



67. Основные положения правил использования водных ресурсов Камского (Пермского) и Воткинского водохранилищ на р. Каме. М., 1965. - 42 с.
68. Перепелица Д.И. Разработка схемы оптимизации использования Юмагузинского и Нугушского гидроузлов / Д.И. Перепелица, Ю.С. Ляхин, А.П. Лепихин, А.А. Тиунов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2009. - N 2. - С. 34-48.
69. Проведение гидрохимических и гидродинамических изысканий с целью обоснования повторно-последовательного использования воды в существующих условиях: отчет о НИР «Разработка комплексной системы регламентации сточных вод ПАО "ММК"..."» / Ю.С. Ляхин, А.П. Лепихин и др. - Пермь: Западно-Уральский институт водных и экологических проблем, 2017. - 27 с.
70. Прандтль Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. - 576 с.
71. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации № 552 от 13.12.2016 "Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения" (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 №45203). - 153 с.
72. Проект правил использования водных ресурсов Верхне-Уралского, Магнитогорского и Ириклинского водохранилищ / Косолапов А.Е. - Екатеринбург: Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (РосНИИВХ), 2013. - 432 с.
73. Разработка и обоснование схемы движения водных потоков в Магнитогорском водохранилище, исследование уровня загрязнения его марганцем, выявление причин. Обоснование с учетом повторно-последовательного использования водных ресурсов и влияния метеорологических и климатических факторов: отчет о НИР /

- А.П. Лепихин, Ю.С. Ляхин и др. - Пермь: Камский филиал ФГУП «РосНИИВХ», 2013. - 55 с.
74. Разработка имитационной гидродинамической модели участка Магнитогорского водохранилища. Реконструкция системы оборотного водоснабжения ОАО «ММК» с расширением резервуара-охладителя: отчет о НИР/ Перепелица Д.И., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А. и др. - Пермь: Западно-Уральский институт водных и экологических проблем, 2015. - 48 с.
75. РД 153-34.2-21.144-2003 Методические указания по технологическим расчетам водоемов-охладителей. Разработано: ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». - СПб: ВНИИГ им. Веденеева, 2004. - 78 с.
76. РД 52.10.842-17 Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Часть 1. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах. - М.: Издательство ИТРК, 2017. - 313 с.
77. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 1. Кама. Л.: Гидрометеиздат, 1973. - 420 с.
78. Рид Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. 3-е издание, переработанное и дополненное. Перевод с английского под редакцией Б.И. Соколова. - Ленинград: «Химия», 1982. - 592 с.
79. Саминский Г.А. Моделирование термогидродинамического режима Иваньковского водохранилища / Г.А. Саминский // Вестник РУДН, секция Инженерные исследования, Издательство РУДН, Москва, - №1, - 2014. - С. 40-47.
80. Соколов А.С. Моделирование температурного режима водоемов-охладителей / А.С. Соколов // Теплоэнергетика. 1997. N12. - С. 51-56.
81. СанПиН 2.1.5.980-00 Гигиенические требования к охране поверхностных вод. - М.: Минздрав России, 2000. - 18 с.

82. СП-11-104-97 Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Часть III. Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства. - М.: Госстрой России, 2004. - 88 с.
83. Техничко-экономическое обоснование водоснабжения Свердловской, Челябинской, Тюменской и Курганской областей. - М: Союзгипроводхоз, 1983. - 135 с.
84. Трубина Е.К. Результаты модельных гидротермических исследований водохранилища-охладителя Ново-Прибалтийской ГРЭС / Е.К. Трубина // Тр. координац. совещ. по гидротехнике. - 1967. - Вып. 32. - С. 100-113.
85. Филатова Т.Н. «Тепловое загрязнение» водоемов и гидрологические аспекты проблемы / Т.Н. Филатова, М.Р. Ципперт, И.А. Зиар-Бек и др. // Тр. ГГИ. 1976. - Вып. 231. - С. 163-180.
86. Флейс М.Л. О влиянии сбросных подогретых вод Конаковской ГРЭС на температурный и гидрохимический режим Иваньковского водохранилища / М.Л. Флейс // Рыбное хозяйство Калининской области. Калинин, - 1974. - С. 108-124.
87. Шишкин Б.А. Физико-географическая характеристика озера Кенон (водоема-охладителя Читинской ГРЭС) / Б.А. Шишкин // Зап. Забайкал. фил. Геогр. об-ва СССР. - 1972. - Вып. 62. - С. 3-15.
88. Яковлев Б.В. Эффективность современных энергоустановок ТЭС / Б.В. Яковлев, А.С. Гринчук // Теплоэнергетика. - 2006. - 42 с.
89. Arukhtin A.A., Klevannaya M.K., Klevannyi K.A., Smirnova E.V. Computation of maximum water temperature in the Beloyarskoe Reservoir, Russ. Meteorol. Hydrol. 38 (12). - 2013.- P. 853-858.
90. Bengtsson L., Svensson T. Thermal regime of ice-covered Swedish lakes // Nordic Hydrology. - 1996. - Vol. 27 - P. 39-56.
91. Craya. Recherches theoretiques sur l'ecoulement obes couches supperposees de fluid de densite differente IV Congres International de la Mecanique. Appliquee. 1964.

92. Davidian J. and Crover. Development of the non circulatory Water Spout. Proc. ASCE, J. of Hydr. Div, - 1956. - 82 p.
93. Issakhov A., Mathematical modeling of thermal process to aquatic environment with different hydro meteorological conditions, Sci. World J. 2014 (2014) 678095. - 632-635 p.
94. Lale B., Asu I. & Asli N.G. Modelling of dilution of thermal discharges in enclosed coastal waters, 2013.
95. Ling F., Foody G.M., Du H., Ban X., Li X., Zhang Y., Du Y. Monitoring thermal pollution in rivers downstream of dams with Landsat ETM+ thermal infrared images, Rem. Sens. 9 (11): 1175. 2017.
96. Love R.V., Wüest A., Zappa M., Fink G., Bouffard D. Tributaries affect the thermal response of lakes to climate change, Hydrol. Earth Syst. Sci. 22 (1). 2018.
97. Lyubimova T, Lepikhin A, Konovalov V, Parshakova Ya, Tiunov A. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // Journal of Hydrology. Vol. 508, - 16 January 2014.- P.328–342.
98. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Lyakhin Yu., Tiunov A. The modeling of the formation of technogenic thermal pollution zones in large reservoirs. International Journal of Heat and Mass Transfer 126. 2018.-P. 342 .
99. Madden N., Lewis A., Davis M. Thermal effluent from the power sector: an analysis of once-through cooling system impacts on surface water temperature // Environmental Research Letters. 8. - 2013. - P. 2-8.
100. Parameters of water quality. Interpretation and Standards. Published by the Environmental Protection Agency. Ireland. 2001. - 57 p.
101. Prats J, Val R., Dolz J., Armengol J. Water temperature modeling in the Lower Ebro River (Spain): heat fluxes, equilibrium temperature, and magnitude of alteration caused by reservoirs and thermal effluent, Water Resour. Res. 48 (5). 2012.
102. Raptis C. E., van Vliet M. & Pfister S. Global thermal pollution of rivers from thermoelectric power plants. Environmental Research Letters 2016.

103. Smytek R. Vyzkum proudu vretev Kapaliny rurne teploty Ceskoslovenske Akademie Ved. 1955. Rocnik, 65, - N4.
104. Theil H. Applied Economic Forecasting. Amsterdam. 1971. 256 p.
105. UK Environmental Standards and conditions (Phaser) Final. UK Technical Advisory Group on the Water Framework Directive. April. 2008. - 73 p.
106. Wood J.R., Lai K.K. Flow of layered fluid over broddcresbed weir. J. Hydral. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. 1977, - N 98, - N1, P. 87-104.
107. Yih, Ch.-Sh Dynamics of Nonhomogeneous Fluids. N.-Y.-L. 1965.- 44 p.
108. Zdrovennova G. E. Spatial and temporal variations of the water-sediment thermal structure in shallow ice-covered Lake Vendyurskoe (Northwestern Russia) // Aquatic Ecology. 2009. Vol. 43 (3). P. 629-639.