

часть поля. Появились новые и совсем свежие провалы, найдены новые фрагменты полостей. Вероятно, при составлении схемы 2002 года, этот участок оказался недостаточно обследован. Его размер с плотно размещенными провальными формами примерно 50×40 м.

Время начала разработки каменоломен неизвестно. По крайней мере, никаких архивных материалов с упоминанием этих выработок пока не найдено. Судя по внешнему виду карьеров-врезок, работы в них велись с конца XIX в. Каменоломни, вероятно, принадлежали экономии Яныш-Такиль и являлись частными разработками. В статистические сборники Керчь-Еникальского градоначальства такие разработки, как мало значимые, не включались. Определенно можно говорить о том, что в первой трети XX в. каменоломни продолжали разрабатывать, в том числе и подземным способом. В фондах Восточно-Крымского историко-культурного заповедника (ВКИКМЗ, г. Керчь) хранится фотография карьера с устьем штольни, датированная 1929 г. и подписью: «*Такильские каменоломни в урочище Керменчик, возле городища Китей*»¹. Судя по виду местности и указанным географическим ориентирам, на фотографии, вероятно, изображен один из входов в подземную выработку северо-восточного шахтного поля (рис. 9).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сохин М.Ю. Типология и краткий обзор подземных выработок Керченского полуострова // Ученые записки Крымского фед. ун-та им. В.И. Вернадского. География. Геология. – 2020. – Т. 6, № 2 (72). – С. 264-293.
2. Сохин М.Ю. Результаты предварительного обследования северо-восточного шахтного поля Яныш-Такильских каменоломен // Пещеры. – Пермь, 2020. – Вып. 43. – С. 48-53.

УДК 556

DOI:10.7242/echo.2023.1.6

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ОБРАТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ВОТКИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (НИЖНИЙ БЬЕФ КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА)

А.А. Тиунов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: На основе вычислительного эксперимента дана численная оценка возможности формирования обратных течений в верхнем участке Воткинского водохранилища (в нижнем бьефе Камского водохранилища) вследствие неравномерности работы Камкой ГЭС. Вычислительный эксперимент был поставлен на разработанной гидродинамической модели рассматриваемого водного объекта в 2D постановке с помощью лицензированного программного продукта SMS v.11.1. В результате расчета получены картосхемы распределения векторного поля скоростей. Выполненный вычислительный эксперимент воспроизводит возникновение обратных течений при рассматриваемых гидрологических условиях на верхнем участке Воткинского водохранилища. Данное явление необходимо учитывать с целью минимизации как экологических, так и технологических последствий. Такие оценки необходимы для выработки мероприятий, направленных на минимизацию отрицательных последствий для работы водопользователей.

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, обратные течения, Воткинское водохранилище, река Кама, Камская ГЭС.

¹ Такильские каменоломни в урочище Керменчик, возле городища Китей. 1929 // ВКИКМЗ КП-196201. Номер в Госкаталоге: 18750706.

Введение

На верхней части Воткинского водохранилища, которая является нижним бьефом Камского водохранилища, расположен один из крупнейших промышленных узлов «Пермско-Краснокамский» с большим количеством водозаборов и водовыпусков. На основе оценки масштабов обратных течений и последствий для водопользователей устанавливаются водохозяйственные и экологические ограничения режима работы Камской ГЭС, в том числе, и размеры санитарных попусков.

Исследован вопрос формирования обратных течений в Воткинском водохранилище, которое является средним в каскаде Камских водохранилищ. Возникновение обратных течений определяется режимом сброса воды через Камскую ГЭС. Актуальность проблемы обратных течений обусловлена риском попадания загрязненных стоков в водозаборы, расположенные выше по течению относительно выпусков сточных вод.

Метод исследования

Для решения задачи по численной оценке возможных гидрологических изменений в случае образования обратных течений на верхнем участке Воткинского водохранилища (в нижнем бьефе Камского водохранилища) вследствие неравномерности работы Камской ГЭС использована двумерная гидродинамическая модель данного участка.

Двумерная (в горизонтальной плоскости) модель для участка водохранилища сделана с использованием специализированного гидрологического пакета SMS v.11.1 американской компании AQUAVEO LLC, разработанного по заказу и участию Центра гидравлических исследований США. В ее основе лежит несколько расчетных моделей: RMA2, RMA4, SRH, ADH, PTM, TUFLOW и другие, которые позволяют решать различные гидродинамические задачи.

Данный программный пакет SMS v.11.1 нами неоднократно использовался для решения самых актуальных задач, таких как оценка зон затопления, скоростного и уровня режимов при добыче нерудных строительных материалов (в реках Вятка [1], Сытва [2], в водохранилищах Воткинское и Нижнекамское); распространение загрязнения (в реках Вятка [1], Амур [3], в водохранилищах Камское [4-7], Клязьминское [8, 9], Учинское, Воткинское, Магнитогорское [10]); распространение теплового поля (Исетское водохранилище); изменение гидродинамики потока (слияние рек Чусовая и Сытва [11-12]); по защите берегов (р. Дон в районе г. Павловска [13]); транспорт наносов (р. Кама – г. Пермь [14]). Достаточно детальное описание рассматриваемого программного продукта и опыт его использования также приводится в работах [15, 16].

Описание модели RMA2 в программном комплексе SMS v11.1

Модель RMA2 это двухмерная, усредненная по глубине, конечно элементная гидродинамическая численная модель. Она позволяет вычислять возвышения водной поверхности и горизонтальные компоненты скорости течения со свободной поверхностью в двумерных областях.

Модуль RMA2 решает методом конечных элементов уравнения в форме Рэйнолдса для турбулентных течений, полученных из уравнений Навье-Стокса. Трение вычисляется по формуле Маннинга, а коэффициенты турбулентной вязкости используются, чтобы определить особенности турбулентности. Одинаково могут быть проанализированы как стационарные, так и нестационарные задачи [17].

Применение модели RMA2

Программа применяется для вычисления уровней воды и распределения потока вокруг островов, потока в мостах, имеющих одно или более выпускных отверстий, в

сужающихся и местах, в подводящем и отводящем каналах ГЭС, в местах слияния рек и в подводящем и отводящем каналах насосных станций, циркуляции и транспортировки в водоемах с заболоченными местами и произвольного уровня воды и режима течения в реках, бассейнах и устьях.

Характеристика модели RMA2

RMA2 – модель общего назначения, разработанная для большой области задач, в которых вертикальное ускорение незначительно и векторы скорости, как правило, указываются в том же самом направлении по всей глубине в толще воды в любой момент времени. Это предполагает вертикально гомогенную жидкость со свободной поверхностью.

Ограничения модели RMA2

Модель RMA2 работает согласно предположению гидростатики; означающему, что ускорение в вертикальном направлении незначительно. Она является двумерной в горизонтальной плоскости. Она не предназначена для использования в задачах смежных областей, где вихри, колебания, или вертикальное ускорение представляют первичный интерес. Вертикально стратифицированные эффекты потока находятся за пределами способностей модели RMA2.

RMA2 – это расчетная модель со свободной поверхностью для задач ламинарного движения. Более сложные потоки, где важны вертикальные изменения переменных, могут быть оценены с использованием трехмерной модели.

Определяющие уравнения модели RMA2

Универсальная компьютерная программа модели RMA2 решает уравнения движения и сохранения количества движения в двух направлениях горизонтальной плоскости, проинтегрированные по глубине. Решаемые уравнения имеют вид:

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

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

где h – глубина потока,

x, y, t – координаты и время,

u, v – скорости по координатам x и y соответственно,

ρ – плотность воды,

E – коэффициент вязкости при турбулентном течении,

g – ускорение свободного падения,

a – возвышение основания (дна),

n – шероховатость по Маннингу,

ζ – эмпирический коэффициент горизонтального отклонения ветра,

V_a – скорость ветра,

ψ – направление ветра,

ω – коэффициент угла вращения Земли,

Φ – широта.

Уравнения 1-3 решаются методом конечных элементов с использованием метода 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 интегрированием по Гауссу. Вторые по времени производные заменены нелинейной аппроксимацией конечной разности. Предполагается что переменные, дифференцируемые по времени, заменены в форме конечной разности и изменяются по каждому временному интервалу по формуле

$$f(t) = f(t_0) + at + bt^c \quad t_0 \leq t < t_0 + \Delta t \quad (4)$$

где a, b и c – константы.

Заметим, основываясь на экспериментах, что лучшее значение для константы c равно 1,5 (Нортон и Кинг, 1977).

Решение полностью неявно и система уравнений решается нелинейной итерационной схемой Ньютона-Рафсона. Компьютерная программа осуществляет решение посредством стандартной подпрограммы решения, которая собирает часть матрицы и решает ее прежде, чем собрать следующую часть матрицы.

Вычислительный эксперимент по моделированию обратных течений в нижнем бьефе Камской ГЭС

Моделирование осуществляется на участке от Камской ГЭС до пос. Уральский (вниз по р. Кама (Воткинское водохранилище): от 2187 км до 2271 км судового хода по «Атласу единой глубоководной системы европейской части России, Том 9, Часть 1, «Камское и Воткинское водохранилища от поселка Керчевский до города Чайковский») протяженностью 84 км (рис. 1).

Ранее в работе [18] были выполнены вычислительные эксперименты по моделированию обратных течений в одномерной модели для всего Воткинского водохранилища, также в ней приводятся данные экспериментальных измерения обратных течений в районе г. Краснокамска и мкр. Закамск.

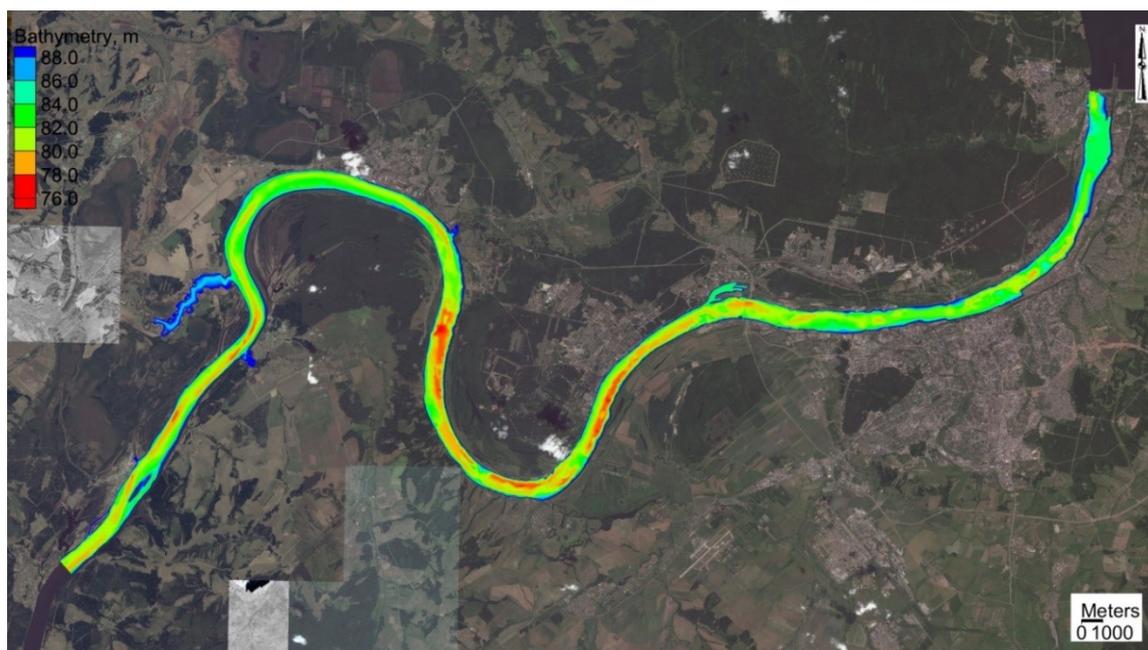


Рис. 1. Морфометрия моделируемого участка

Для корректного задания морфометрии рассматриваемого водного объекта была использована цифровая модель рельефа (ЦМР), сделанная по материалам детальной эхолотной съемки, лидарной съемки и обработки карт, данные материалы предоставлены заказчиком. Обработка первичных материалов осуществлялась в программном комплексе ArcGIS v.10.4. Производилась доработка полученных векторных данных (берегов, изолиний и точек глубин водного объекта) в виде ЦМР и шейп-файлов.

В программном комплексе SMS v.11.1 в специальном модуле «Мар» произведена конвертация полученных ранее шейп-файлов во внутренний формат программы для дальнейшего использования при создании модели.

Далее для наиболее полного и эффективного задания особенностей морфометрии моделируемого объекта на расчетной области построена прямоугольно-треугольная сетка, состоящая из 50899 элементов, со средней длиной ребра элемента 50 метров. Основные характерные размеры моделируемого объекта: в длину 84 км, по ширине изменяется от 650 до 1350 м.

В модуле RMA2 проводится расчет гидродинамических характеристик, в первую очередь распределение глубин (уровней водной поверхности) и скоростей потока.

Результаты вычислительного эксперимента

Расход сбрасываемой воды с Камской ГЭС изменяется по графику, представленному на рисунке 2. Это стандартные усредненные суточные изменения работы Камской ГЭС, при которых расход сброса в течение суток изменяется от минимального, санитарного попуска 300 м³/с в ночное время суток, до осредненного значения в дневное время суток – 1700 м³/с.

Уровень воды в Воткинском водохранилище (р. Кама) в районе пос. Уральский принимался равным 89,11 м БС.

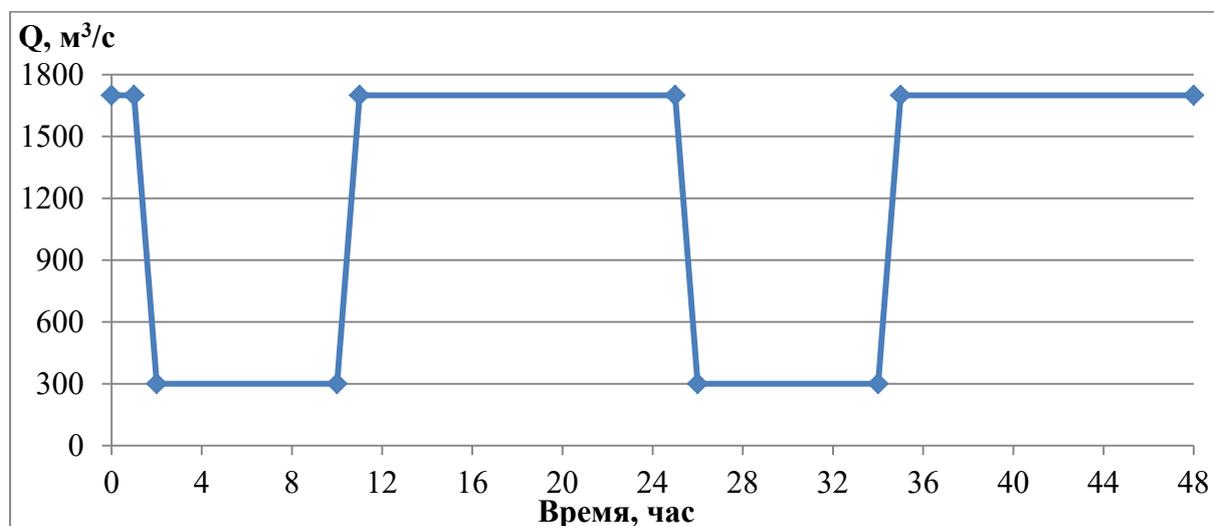


Рис. 2. График изменения расхода сброса воды с Камской ГЭС по времени

На рисунках 3 и 4 представлены рассчитанные распределения векторного поля скорости течения во временные промежутки 1 ч и 6 ч 30 мин, соответственно, в районе г. Краснокамска.

На рисунках 5 и 6 представлены рассчитанные распределения векторного поля скорости течения во временные промежутки 1 ч и 7 ч, соответственно, в районе р. Мулянка и Закамска.

На рисунках 7 и 8 представлены рассчитанные распределения векторного поля скорости течения во временные промежутки 1 ч и 7 ч 15 мин, соответственно, в районе железнодорожного и автомобильного мостов г. Перми.

В районе г. Краснокамска максимальная скорость обратного течения отмечается у левого берега р. Кама $V_{max} = 0,143$ м/с, при расчетном времени 6 ч 30 мин, средняя скорость обратного течения $V_{cp} = 0,075$ м/с и время обратного течения составляет примерно 5 ч (с 4 ч 45 мин до 9 ч 45 мин расчетного времени), то есть вода за данный промежуток времени может преодолеть расстояние в обратном направлении примерно в 1350 м.

В районе р. Мулянка и Закамска максимальная скорость обратного течения отмечается у правого берега на повороте р. Кама – $V_{max} = 0,113$ м/с, при расчетном времени 7 ч, средняя скорость обратного течения $V_{cp} = 0,056$ м/с, и время обратного течения составляет примерно 3 ч 30 мин (с 5 ч 30 мин до 9 ч расчетного времени), то есть вода за данный промежуток времени может преодолеть расстояние в обратном направлении примерно в 700 м.

В районе железнодорожного и автомобильного мостов г. Перми максимальная скорость обратного течения отмечается у берегов р. Кама – $V_{max} = 0,071$ м/с, при расчетном времени 7 ч 15 мин, средняя скорость обратного течения $V_{cp} = 0,035$ м/с и время обратного течения составляет примерно 2 ч (с 6 ч 15 мин до 8 ч 15 мин расчетного времени), то есть вода за данный промежуток времени может преодолеть расстояние в обратном направлении примерно в 250 м.

При данных расчетных характеристиках в районе г. Краснокамска, р. Мулянка, Закамска и в районе железнодорожного и автомобильного мостов г. Перми обратное течение происходит по всей ширине р. Кама.

Отметим, что на участке уже выше автомобильного моста г. Перми наблюдается незначительное обратное течение и только вдоль берегов, а далее оно резко угасает, так как на данном участке р. Кама начинают преобладать речные условия течения и сброс воды на Камской ГЭС идет постоянный, хотя и минимальный.

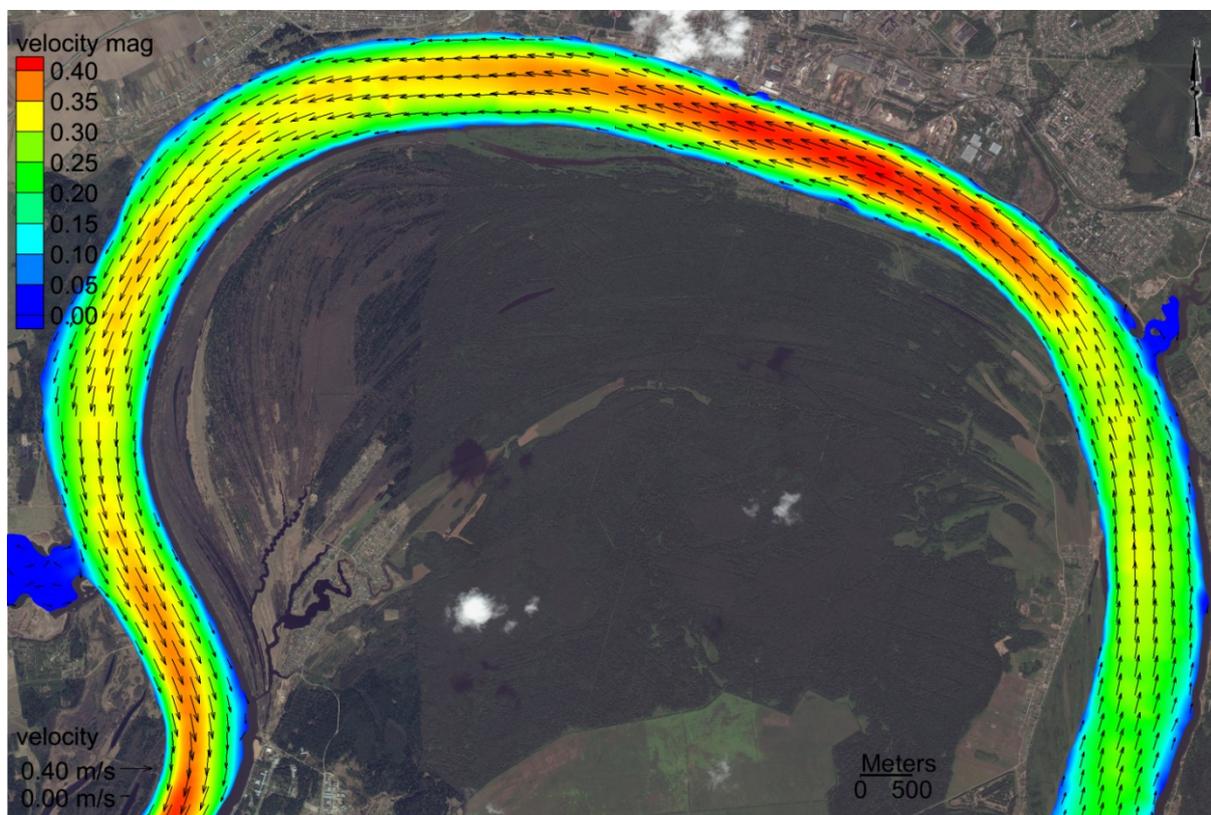


Рис. 3. Распределение векторного поля скорости в районе г. Краснокамска, расчетное время 1 ч

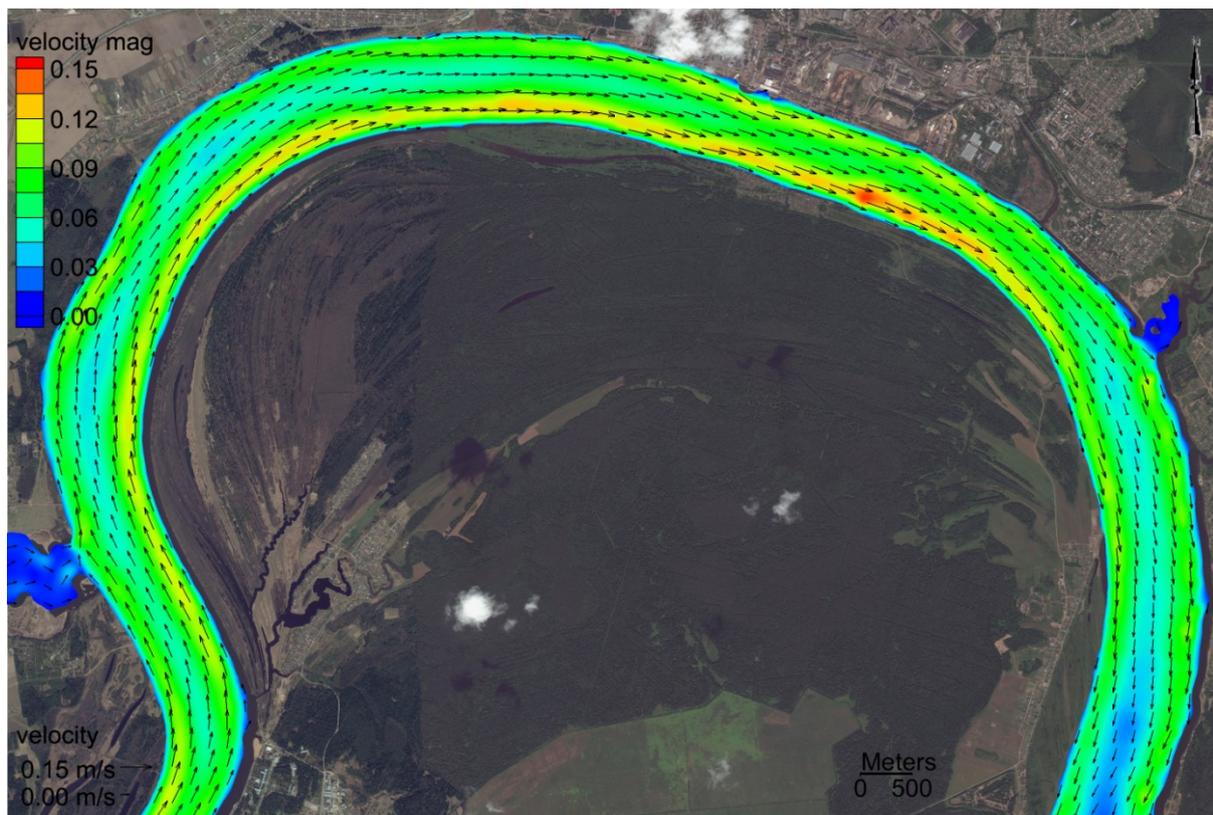


Рис. 4. Распределение векторного поля скорости в районе г. Краснокамска, расчетное время 6 ч 30 мин

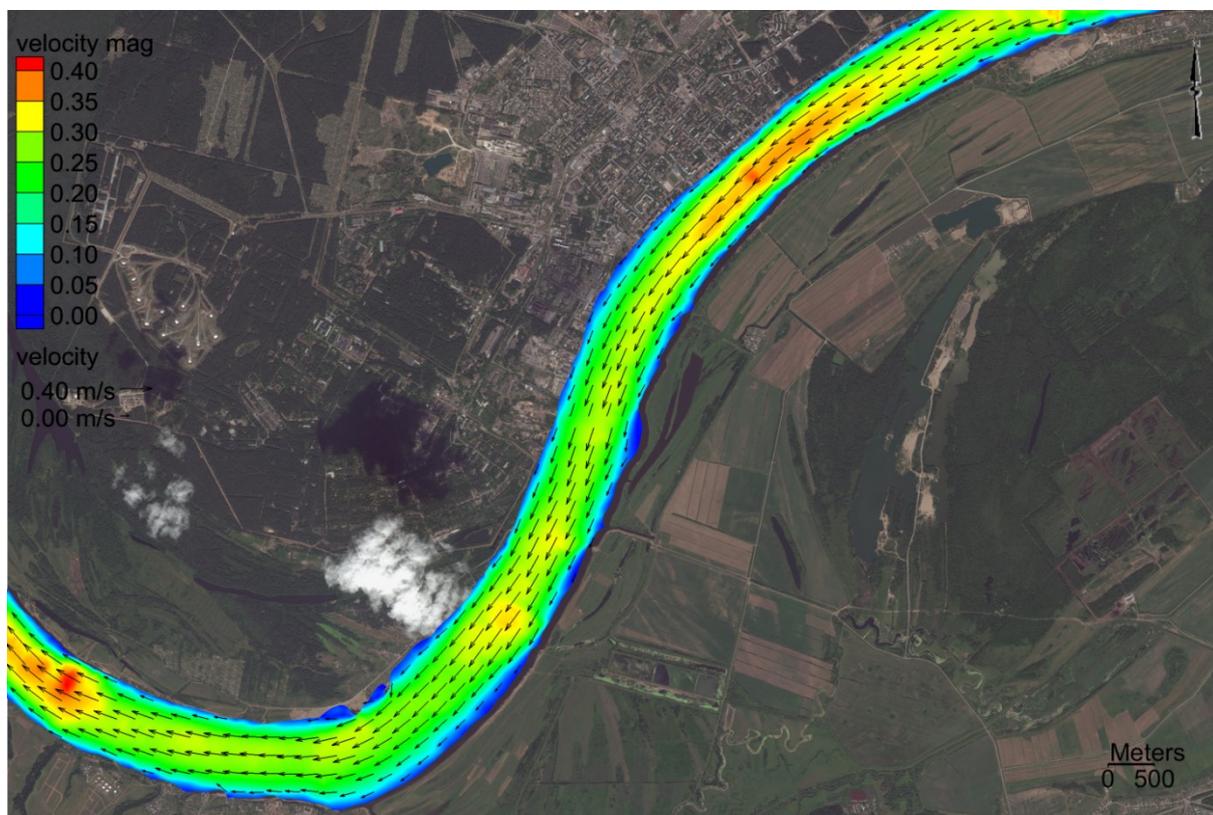


Рис. 5. Распределение векторного поля скорости в районе р. Мулянка и Закамска, расчетное время 1 ч



Рис. 6. Распределение векторного поля скорости в районе р. Мулянка и Закамска, расчетное время 7 ч

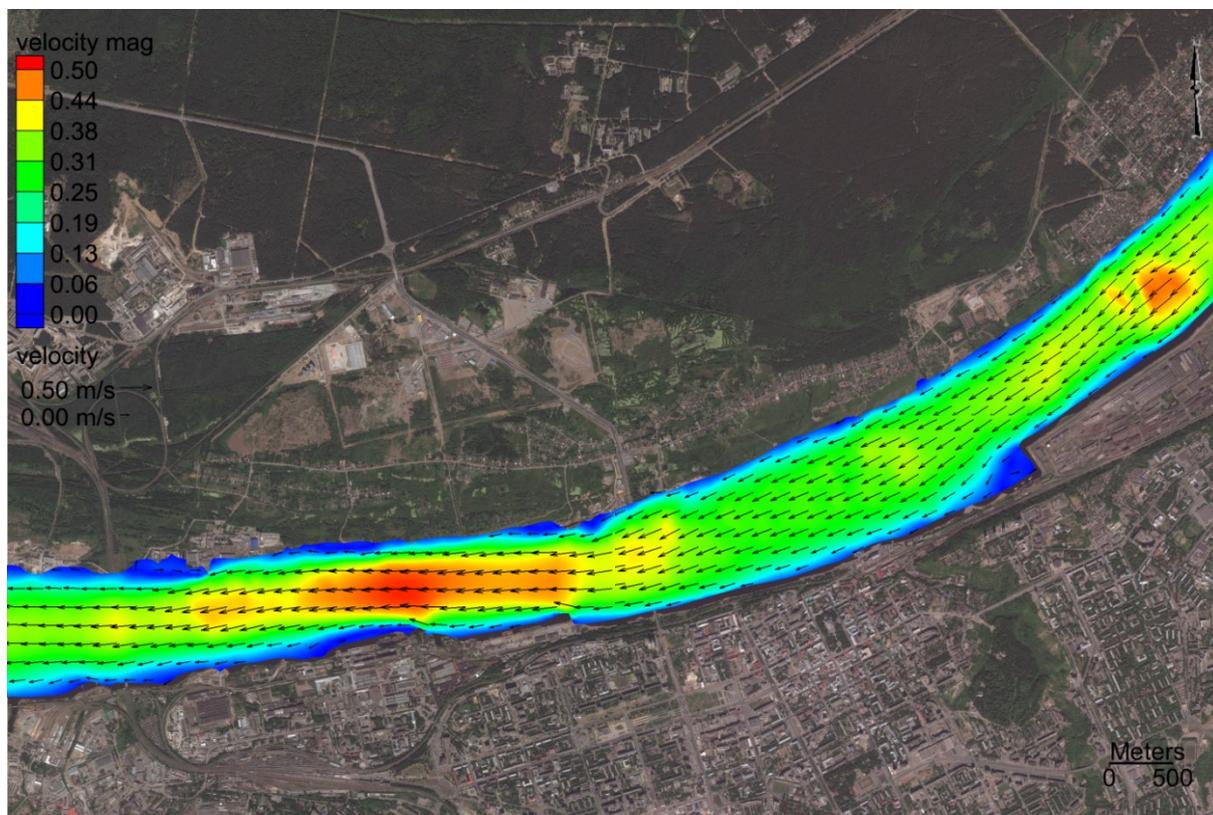


Рис. 7. Распределение векторного поля скорости в районе железнодорожного и автомобильного мостов г. Перми, расчетное время 1 ч

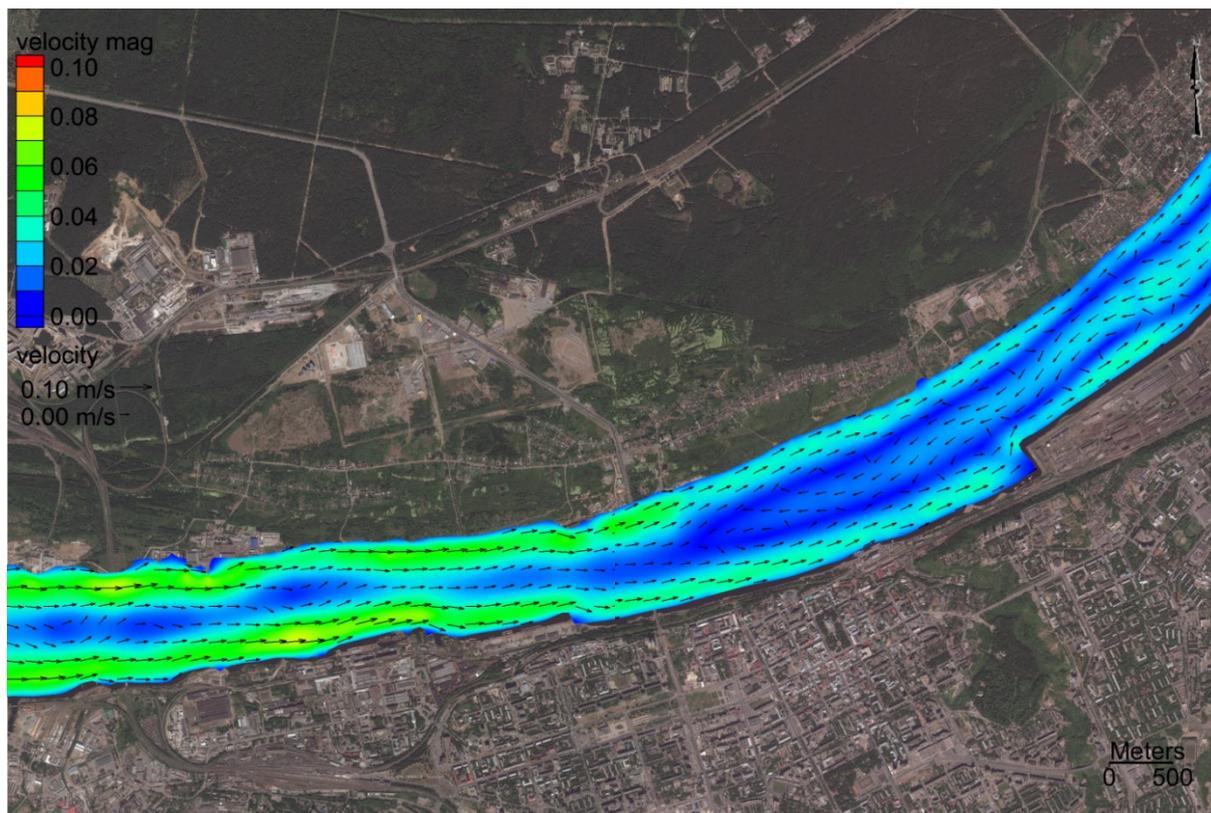


Рис. 8. Распределение векторного поля скорости в районе железнодорожного и автомобильного мостов г. Перми, расчетное время 7 ч 15 мин

Заключение

Таким образом, выполненный вычислительный эксперимент воспроизводит возникновение обратных течений при стандартных условиях работы Камской ГЭС в верхнем участке Воткинского водохранилища. Данные явления необходимо учитывать с целью минимизации как экологических, так и технологических последствий при работе водозаборов, расположенных в районах г. Краснокамска и г. Перми, особенно если непосредственно ниже располагаются значительные выпуски сточных вод.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Богомолов А.В., Перепелица Д.И., Паршакова Я.Н. Гидродинамическое моделирование реки Вятки в среднем течении: постановка задачи, результаты расчетов // Водное хоз-во России: проблемы, технологии, управление. – 2013. – № 3. – С. 16-32.
2. Лепихин А.П., Перепелица Д.И., Тиунов А.А. Анализ и обоснование возможных схем защиты г. Кунгура от наводнений // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. – 2007. – № 2. – С. 80-94.
3. Лепихин А.П., Тиунов А.А. Разработка гидродинамической модели для прогнозирования развития и распространения зон загрязнения в бассейне р. Амур / Лепихин А.П., Тиунов А.А. // Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях: сб. докл. Междунар. конф. – М., 2008. – С. 138-142.
4. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А. К проблеме отведения избыточных рассолов в водные объекты предприятиями калийной промышленности // Водное хоз-во России: проблемы, технологии, управление. – 2010. – № 3. – С. 57-74.
5. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А. Численное моделирование разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов в турбулентных потоках // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – № 4. – С. 68-79.

6. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А. Комбинированный подход к описанию плотностных эффектов разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов в водных объектах // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2011. – Вып. 5 (9). – С. 130-134.
7. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А. К проблеме утилизации избыточных рассолов предприятиями калийной промышленности в водные объекты // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 2. – С. 185-193.
8. Тиунов А.А. Разработка гидродинамической модели и модели распространения загрязнений Клязьминского водохранилища // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2013. – С. 27-29.
9. Веницианов Е.В., Лепихин А.П., Кирпичникова Н.В. Разработка гидродинамической модели и модели формирования загрязнений равнинного водохранилища (на примере Клязьминского водохранилища) // Водное хоз-во России: проблемы, технологии, управление. – 2013. – № 2. – С. 96-107.
10. Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Дробный О.Ф., Вахромеев И.Е. Отработка возможных схем снижения воздействия ОАО «ММК» на магнитогорское водохранилище на основе вычислительных экспериментов // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 5. – С. 85-96
11. 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. – 2014. – V. 508. – P. 328-342. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.041.
12. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Y., Tiunov A., Konovalov V., Shumilova N. Numerical modelling of admixture transport in a turbulent flow at river confluence // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – V. 416, № 1. – doi:10.1088/1742-6596/416/1/012028.
13. Богомолов А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А. Использование численных гидродинамических моделей для оценки эффективности проектных решений по защите берегов (на примере реки Дон в районе города Павловска) // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 1. – С. 50-57.
14. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Лепешкин С.А., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н., Перепелица Д.И. К проблеме оценки последствий крупномасштабной добычи нерудных строительных материалов на поверхностные водные объекты // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 3. – С. 108-119.
15. Lepikhin A.P., Lyubimova T.P., Parshakova Ya.N., Tiunov A.A. Discharge of excess brine into water bodies at potash industry works // Journal of Mining Science. – 2012. – V. 48, № 2. – P. 390-397.
16. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Tiunov A. Effect of flooding waves on a removal of pollutants from underwaterquarries // Geophysical Research Abstracts: 10th EGU General Assembly. – Viena. – 2013. – V. 15. – P.13577.
17. Users Guide for RMA2 Version 4.5. [09 Sept] 2009. – Текст электронный – URL: [http://chl.wes.army.mil/software/tabs/docs.htm]. (дата обращения: 30.03.2023).
18. Лепихин А.П., Тиунов А.А., Возняк А.А. Особенности формирования и расчета обратных течений в Воткинском водохранилище (1D-постановка) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2018. – № 5. – С. 21-36. – DOI: 10.35567/1999-4508-2018-5-2.