



Член СРО Ассоциация «Объединение проектных организаций  
"Энергетическое Сетевое Проектирование" (СРО-П-093-18122009)

Протокол Совета № 311 от 11.01.2018

Член СРО Ассоциация «Саморегулируемая организация Некоммерческое партнерство  
инженеров-изыскателей «ГЕОБАЛТ» (СРО-И-038-25122012)

Пер. № ГБ-7805528029 от 12.01.2018

Сертификат ГОСТ Р ИСО 9001-2015 № СМК.РТС.RU.03121.17 от 09.01.2017г

**Разработка проектной и рабочей документации  
по строительству объекта "Водовыпуск после 3 этапа очистных  
сооружений сточных вод АО «МЦБК»**

**ПРОЕКТНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ**

**Раздел10. «Иная документация в случаях, предусмотренных  
федеральными законами»**

**Часть2.Отчет по моделированию распространения взвешенных  
веществ при проведении гидротехнических работ. Моделирование  
разбавления сточных вод в акватории**

**3-R-PR-01-20-ИД2**

**Том 10.2**

Инв. № подл.	Подп. И дата	Подп. И дата

Изм.	№ док.	Подп.	Дата



Член СРО Ассоциация «Объединение проектных организаций  
"Энергетическое Сетевое Проектирование" (СРО-П-093-18122009)

Протокол Совета № 311 от 11.01.2018

Член СРО Ассоциация «Саморегулируемая организация Некоммерческое партнерство  
инженеров-изыскателей «ГЕОБАЛТ» (СРО-И-038-25122012)

Пер. № ГБ-7805528029 от 12.01.2018

Сертификат ГОСТ Р ИСО 9001-2015 № СМК.РТС.RU.03121.17 от 09.01.2017г

**Разработка проектной и рабочей документации  
по строительству объекта "Водовыпуск после 3 этапа очистных  
сооружений сточных вод АО «МЦБК»**

**ПРОЕКТНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ**

**Раздел 10. «Иная документация в случаях, предусмотренных  
федеральными законами»**

**Часть 2. Отчет по моделированию распространения взвешенных  
веществ при проведении гидротехнических работ. Моделирование  
разбавления сточных вод в акватории**

**3-R-PR-01-20-ИД2**

**Том 10.2**

Инв. № подл.	Подп. И дата

Генеральный директор

А.В. Щукин

Главный инженер проекта

К.А. Некрасов



Общество с ограниченной ответственностью

«КАРДИНАЛ софт»

(ООО «КАРДИНАЛ софт»)

Арх. № 146

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

----- Е.В.Смирнова

10 октября 2021

**ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

**Расчет распространения сточных вод и взвешенных частиц грунта при реализации проекта "Строительство водовыпуска после 3 этапа очистных сооружений сточных вод АО «конфиденциально»"**



Руководитель темы,  
д.ф.-м.н.

К.А. Клеванный

Санкт-Петербург  
Октябрь 2021

**Продолжение титульного листа  
Отчет о научно-исследовательской работе:  
Расчет распространения сточных вод и взвешен-  
ных частиц грунта при реализации проекта  
"Строительство водовыпуска после 3 этапа  
очистных сооружений сточных вод АО «конфи-  
денциально»**

Исполнители:

## Оглавление

1. Введение.....	4
2. Исходные уравнения.....	5
3. Характеристика участка .....	9
4. Описание моделей .....	10
5. Расчет мощностей источников загрязнения .....	13
6. Результаты расчетов .....	14
Список использованных источников .....	18
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Техническое задание .....	19
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Свидетельство об официальной регистрации ПК CARDINAL.....	20

# 1. Введение

Настоящая работа выполнена по договору № 6/21 от 16 августа 2021 г. с ООО «Регион» по теме: «Расчет распространения сточных вод и взвешенных частиц грунта при реализации проекта «Строительство водовыпуска после 3 этапа очистных сооружений сточных вод АО «конфиденциально».

Целью данной работы было получение с помощью математического моделирования различных характеристик загрязнения водной среды взвешенными частицами грунта, поступающими в воду при отсыпке прорези щебнем и расчет разбавления сточных (сбросных) вод. Техническое задание приведено в Приложении А.

Использовались две модели: модель участка р. Волга и вложенная локальная модель участка Лопатинской воложки в районе проектирования (ЛОК 1). По модели участка р.Волги расчеты велись в двумерной постановке. Расчеты по модели ЛОК 1 велись в трехмерной постановке.

Модели были созданы с помощью программного комплекса (ПК) CARDINAL (<http://cardinal-hydrosoft.ru>). ПК CARDINAL зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (Приложение Б). Программа использовалась для реализации около 250 различных проектов, связанных с расчетами гидродинамики поверхностных вод и, в том числе, распространения в них растворенных и взвешенных примесей.

## 2. Исходные уравнения

Исходная система гидродинамических уравнений решается в моделях численными конечно-разностными методами [1,2]. При решении используется переход к криволинейным гранично-зависимым координатам, что позволяет повысить точность решения задач в областях сложной формы и с резкими изменениями рельефа дна. Возможна осушка и заливание ячеек расчетной сетки.

В трехмерной постановке решались в приближении гидростатики следующие уравнения для скорости течения  $(u, v, w)$ , уровня воды  $(\zeta)$  и концентраций примесей  $(c)$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_o} \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P_a}{\partial x} + f_c v + K \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_T \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_o} \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P_a}{\partial y} - f_c u + K \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_T \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \omega_s \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = \varpi_s \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_0) \frac{\partial c}{\partial z} = \omega_s c_s - \lambda c + K_c \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_c \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

где

$g$  - ускорение свободного падения,  $\rho$  - плотность воды, определяемая в общем случае по зависимости UNESCO [3],  $\rho_o$  - среднее значение плотности воды,  $P_a$  - атмосферное давление,  $f_c = 2\omega \sin \varphi$  - параметр Кориолиса,  $\varphi$  - географическая широта,  $\omega$  - угловая скорость вращения Земли,  $K$  - коэффициент горизонтального турбулентного обмена импульсом,  $\nu_T$  - коэффициент вертикального турбулентного обмена,  $U$  и  $V$  - удельные расходы:

$$U = \int_{-h}^\zeta u dz, \quad V = \int_{-h}^\zeta v dz,$$

$h$  - невозмущенная глубина воды,  $w_0$  - скорость осаждения (гидравлическая крупность) или всплывания взвешенных примесей,  $\lambda$  - коэффициент неконсервативности примеси,  $K_c$  - коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии,  $\nu_c$  - коэффициент вертикальной турбулентной диффузии,  $\omega_s$  - расход сбросной воды из источников на единицу объема,  $\varpi_s$  - расход сбросной воды из источников на единицу площади поверхности,  $c_s$  - концентрация примеси в сбросной воде источников.

Координата  $z$  направлена вертикально вверх.

На дне при  $z = -h(x, y)$  задается касательное напряжение трения  $\tau_b = (\tau_{b(x)}, \tau_{b(y)})$  с помощью квадратичного закона

$$\begin{aligned}\tau_{b(x)} &\equiv \rho_o \nu_T \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=-h} = -\rho_o f_b u | \nabla | \\ \tau_{b(y)} &\equiv \rho_o \nu_T \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=-h} = -\rho_o f_b v | \nabla |,\end{aligned}\tag{2.6}$$

где  $f_b$  - коэффициент придонного трения.

Коэффициент придонного трения определялся по формуле Маннинга:

$$f_b = \frac{gn^2}{h^{1/3}},\tag{2.7}$$

где  $n$  - коэффициент шероховатости дна, который задавался равным 0.025.

На поверхности касательное напряжение трения  $\tau_s = (\tau_{s(x)}, \tau_{s(y)})$  также задается с помощью квадратичного закона

$$\begin{aligned}\tau_{s(x)} &\equiv \rho_o \nu_T \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=\zeta} = \rho_a C_D W_x | \bar{W} | \\ \tau_{s(y)} &\equiv \rho_o \nu_T \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=\zeta} = \rho_a C_D W_y | \bar{W} |,\end{aligned}\tag{2.8}$$

где  $C_D$  - коэффициент ветрового трения,  $\bar{W} = (W_x, W_y)$  - скорость ветра на высоте 10 м,  $\rho_a$  – плотность воздуха (1.225 кг/м<sup>3</sup>).

Для определения  $C_D$  использовалось формула Банке и Смита [4]:

$$C_D = (0.63 + 0.066|W|)10^{-3}.\tag{2.9}$$

На участках твердой границы нормальная и тангенциальная к границе компоненты скорости задавались нулевыми (условие прилипания).

На открытых боковых границах модели задается расход воды.

На дне и на поверхности для примеси ставится условие

$$\nu_c \frac{\partial c}{\partial z} = 0, \quad w_0 = 0\tag{2.10}$$

Для определения коэффициентов вертикального турбулентного обмена  $\nu_T$  и вертикальной турбулентной диффузии  $\nu_c$ , использовалась  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности [5,6], в которой они определяются из соотношений

$$\nu_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad \nu_c = \text{Pr} \nu_T,\tag{2.11}$$

где  $k$  - кинетическая энергия турбулентных пульсаций,  $\varepsilon$  - скорость диссипации этой энергии за счет внутреннего трения,  $c_\mu = 0.09$ ,  $\text{Pr} = 0.96$  – число Прандтля.

В ПК CARDINAL уравнения для  $k$  и  $\varepsilon$  решаются без учета адвективных членов, которые имеют второй порядок малости



$$\begin{aligned}\frac{\partial k}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_T \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \nu_T (P + N) - \varepsilon, \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} \nu_T (c_{1\varepsilon} P + c_{3\varepsilon} N) - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k},\end{aligned}\quad (2.12)$$

$$P = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (2.13)$$

$$N = \frac{g}{\text{Pr} \rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (2.14)$$

$$c_{1\varepsilon}=1.44, \quad c_{2\varepsilon}=1.92, \quad \sigma_\varepsilon=1.3.$$

Для коэффициента  $c_{3\varepsilon}$  при численных экспериментах были подобраны значения, обеспечивающие всплытие вод пониженной плотности и погружение вод с повышенной плотностью:  $c_{3\varepsilon}=0.001$  при устойчивой стратификации и  $c_{3\varepsilon}=2$  при неустойчивой.

Для энергии турбулентности и ее диссипации задаются следующие граничные условия на дне ( $b$ ) и на поверхности ( $s$ )

$$\begin{aligned}k_b &= \frac{u_*^2}{\sqrt{c_\mu}} = \frac{f_b u_b^2}{\sqrt{c_\mu}}, & k_s &= C_D \frac{\rho_a}{\rho_0} W^2, \\ \varepsilon_b &= \frac{u_*^3}{\kappa z_b} = \frac{c_\mu^{3/4} k_b^{3/2}}{\kappa z_b}, & \varepsilon_s &= \frac{u_*^3}{\kappa z_s} = \frac{c_\mu^{3/4} k_s^{3/2}}{\kappa z_s}\end{aligned}\quad (2.15)$$

где  $u_*$  – скорость трения,  $\kappa=0.4$  – постоянная Кармана,  $z_b$  и  $z_s$  – параметры шероховатости дна и поверхности, соответственно.

Коэффициент горизонтального турбулентного обмена импульсом определялся по закону «4/3» [7]:

$$K = \gamma_1 (\Delta S)^{4/3} \quad (2.16)$$

где  $\Delta S$  – площадь расчетной ячейки,  $\gamma_1$  – параметр.

Коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии определялся по формуле Смагоринского

$$K_c = \gamma_2 \Delta S \sqrt{\left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 0.5 \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} \quad (2.17)$$

где  $\gamma_2$  – параметр.

Турбулентные потоки примеси через твердые боковые границы считаются нулевыми:

$$K_c \frac{\partial c}{\partial n} \Big|_\Gamma = 0 \quad . \quad (2.18)$$

Представленные уравнения преобразовывались к криволинейным гранично-зависимым неортогональным координатам и к контравариантным составляющим скорости и решались полуняевным методом конечных разностей на криволинейной гранично-

зависимой С-сетке Аракавы (рисунок 2.1). Узлы для расчета уровня находятся внутри сетки, граница области проходит по граням, на которых заданы составляющие удельных расходов.

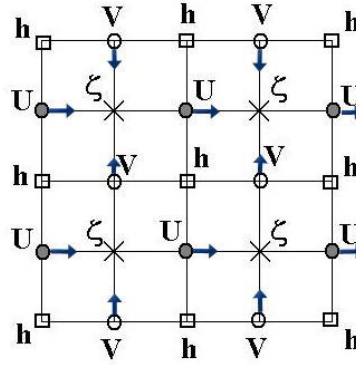


Рисунок 2.1 Расположение расчетных переменных на разнесенной С-сетке Аракавы

Сетка строилась с помощью эллиптического метода Томпсона.

По вертикали используется  $\sigma$  - преобразование, обеспечивающее сгущение сетки на мелководье

$$\sigma = \frac{z + \zeta}{h + \zeta} \quad (2.19)$$

Для решения уравнений движения применена полуневная схема, а для уравнения переноса примесей неявная гибридная схема повышенного порядка точности, в которой расчет адвекции осуществляется с помощью направленных разностей третьего и первого порядка точности, в котором схемная диффузия мала, а дисперсия (появление осцилляций) гасится направленными разностями первого порядка. Обе аппроксимации участвуют с весом, определяемым в процессе счета степенью гладкости решения. Схема третьего порядка точности для положительных значений скорости имеет вид

$$(uc)_x = \frac{1}{\Delta x} \left[ u_{i+1/2} \left( \frac{1}{3} c_{i+1} + \frac{5}{6} c_i - \frac{1}{6} c_{i-1} \right) - u_{i-1/2} \left( \frac{1}{3} c_i + \frac{5}{6} c_{i-1} - \frac{1}{6} c_{i-2} \right) \right] \quad (2.20)$$

Схема тестировалась на точных аналитических решениях.

Изменение концентрации в ячейке с источником рассчитывается на каждом временном полушаге по формуле

$$c^{n+1} = \frac{c^n V^n + c_s \varpi_s \frac{\Delta t}{2}}{V^{n+1}}, \quad (2.21)$$

где  $n$  – номер временного слоя,  $V$  – объем ячейки на соответствующем временном слое. В трехмерном случае для источников, расположенных в придонном и приповерхностном слоях, при расчете объема ячейки учитывается расстояние от данного узла сетки до дна или поверхности, а для остальных – до половины расстояния до соседнего узла

$$V_k = SH \begin{cases} (\Delta\sigma_{k-1} + \Delta\sigma_k)/2, & 2 < k < M-1 \\ \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2/2, & k = 2 \end{cases}, \quad (2.22)$$

где  $S$  – площадь ячейки,  $H$  – толщина слоя воды,  $\Delta\sigma_k$  – относительное расстояние между слоями  $k$  и  $k+1$ .

### 3. Характеристика участка

Промышленная площадка АО «МЦБК» расположена по адресу: Российская Федерация, Республика Марий Эл, город Волжск, улица Карла Маркса, дом 10. Промплощадка расположена на юго-западной окраине города, на территории Марийского целлюлозно-бумажного комбината, на левом берегу протоки Лопатинская Воложка река Волга.

Водный режим в исследуемом створе определяется Чебоксарским и Куйбышевским гидроузлами. Чебоксарский гидроузел введен в эксплуатацию осенью 1980 г., а весной 1981 г. водохранилище было наполнено до промежуточной отметки – 63 м. БС, при котором водохранилище функционирует по сегодняшний день, а отметка НПУ составляет 68 м БС.

Протока Лопатинская Воложка длиной 8 км расположена между 1820 и 1827 км от устья по фарватеру основного русла реки Волги на расстоянии 5 км от выхода ее в основное русло реки Волги и отделена от основного русла островом Лопатинским.

По функциональному назначению, проектируемый водовыпуск после третьего этапа очистных сооружений сточных вод АО «МЦБК» относится к канализационному коллектору, предназначенному для отвода очищенных производственных, а также поверхностного стока промплощадки ОС АО «МЦБК».

Исследуемый участок в границах проектирования водовыпуска протока Лопатинская Воложка – река Волга находится в режиме постоянного подпора на выгнутом, укрепленном бетонными плитами берегу.

Выпуск очищенных стоков проектируется ориентировочно в 130 м от левого берега верхней части Волжского плёса Куйбышевского водохранилища в протоку Лопатинская Воложка.

Гидрологические параметры в створе проектируемого выпуска очищенных стоков представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Расходы и уровни воды р. Волга в створе проектируемого выпуска очищенных стоков.

Характеристика	Значение
Минимальный среднемесячный расход воды (сброс Чебоксарской ГЭС) обеспеченностью 95% (1982-2018), м <sup>3</sup> /с	1430
Гарантированный расход воды (санитарный попуск Чебоксарской ГЭС в нижний бьеф), м <sup>3</sup> /с	600
Среднегодовой минимальный уровень воды, м БС	49.60
Минимальный навигационный, м БС	49.00
Абсолютно минимальный уровень воды (01.01.1989), м БС	47.81
Минимальный допустимый в зимний период (УМО), м БС	46.50
Среднегодовой расход воды (сброс Чебоксарской ГЭС) (1982-2018 гг.), м <sup>3</sup> /с	3490
Нормальный подпорный уровень (НПУ), м БС	53.00
Среднегодовой уровень воды, м БС	51.82
Абсолютно максимальный уровень воды (29-30.04.2005), м БС	55.50
Форсированный подпорный уровень, м БС	55.30
Максимальная толщина льда (1996), см	71

#### 4. Описание моделей

Для расчетов использовались две модели. Первая – модель участка р. Волга протяженностью 10 км. В верхнем створе задавался минимальный среднемесячный расход воды равный  $1430 \text{ м}^3/\text{с}$ . при среднемноголетнем минимальном уровне 49.6 м БС. Модель нужна для определения расхода воды в Лопатинской воложке. Согласно расчету по этой модели расход в Лопатинской воложке равен  $56 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Расчетная сетка модели приведена на рисунке 4.1. Пример поля течений в модели участка р. Волга приведен на рисунке 4.2.

Сетка модели LOK 1 приведена на рисунке 4.3.

Параметры моделей приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры моделей

Показатели	Модель участка р. Волга	Модель участка Лопатинской воложки
Площадь ( $\text{км}^2$ )	18.28	0.75
Объем воды (тыс. $\text{м}^3$ )	0.08	0.02
Средняя глубина (м)	4.4	2.8
Число расчетных узлов	10269	5445
Средний шаг сетки (м)	112	29
Число слоев по вертикали	1	15

Расчеты на модели LOK 1 выполнялись в трехмерной постановке. По вертикали задавалось 15 слоев. Параметр  $\gamma$  в формуле (2.16) для коэффициента горизонтального турбулентного обмена задавался равным  $0.05 \text{ м}^2/\text{с}$ , для коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии  $0.23 \text{ м}^2/\text{с}$ . Поле течений в срединном слое в модели участка Лопатинской воложки показано на рисунке 4.4.

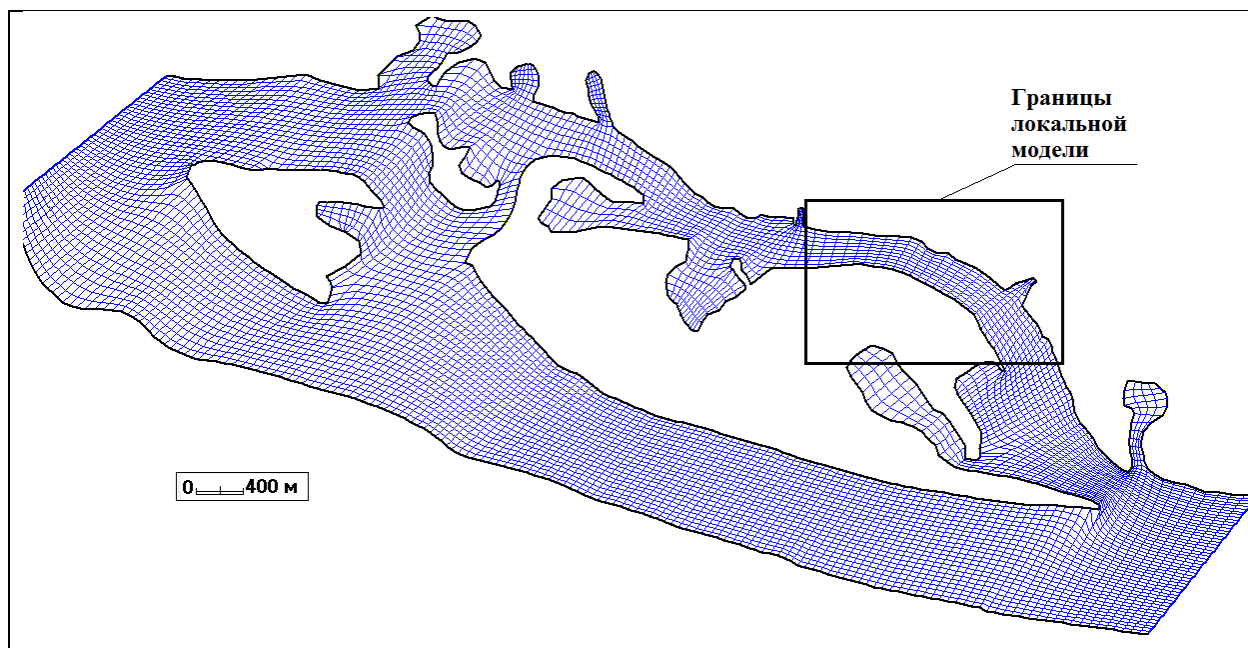


Рисунок 4.1 – Расчетная сетка модели участка р. Волги

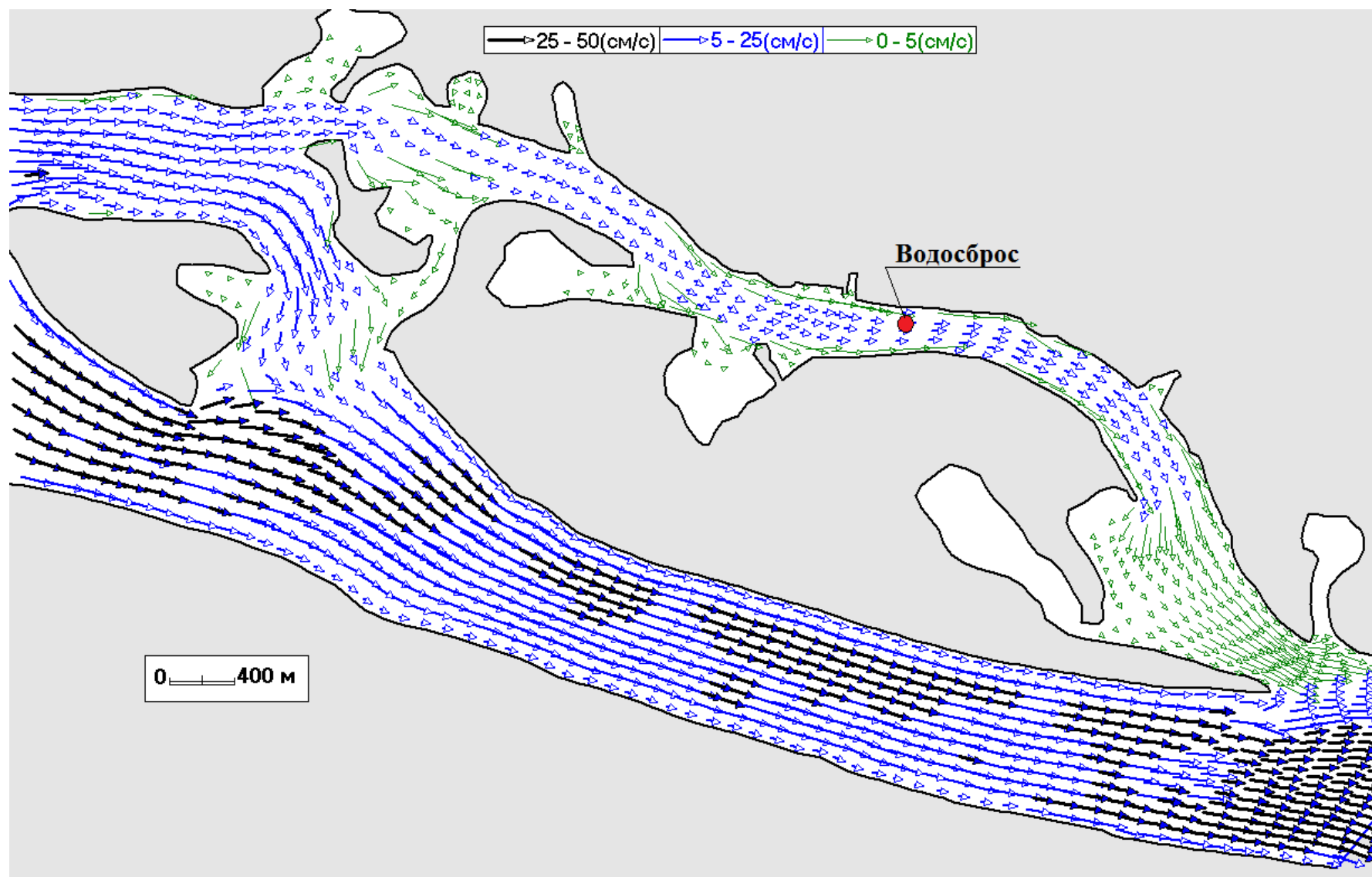


Рисунок 4.2 – Поле течений в модели участка р. Волга. Показано положение водосброса

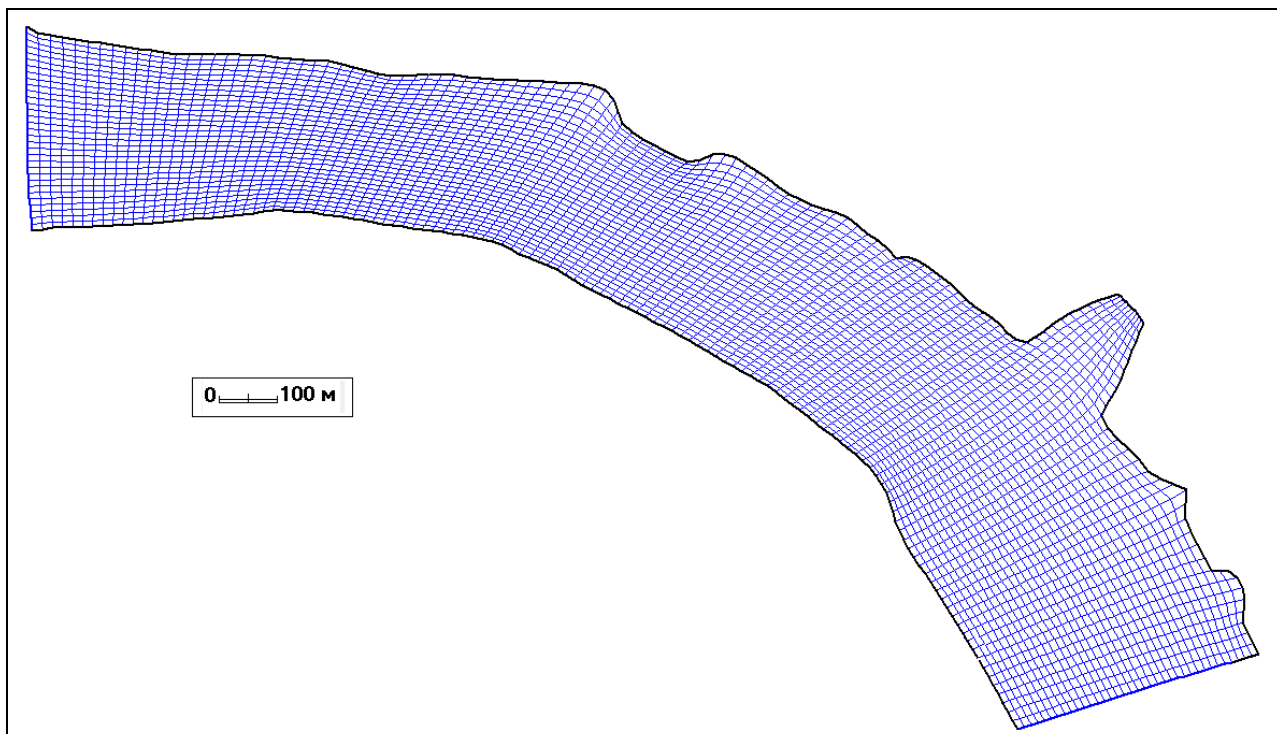


Рисунок 4.3 – Расчетная сетка модели участка Лопатинской воложки

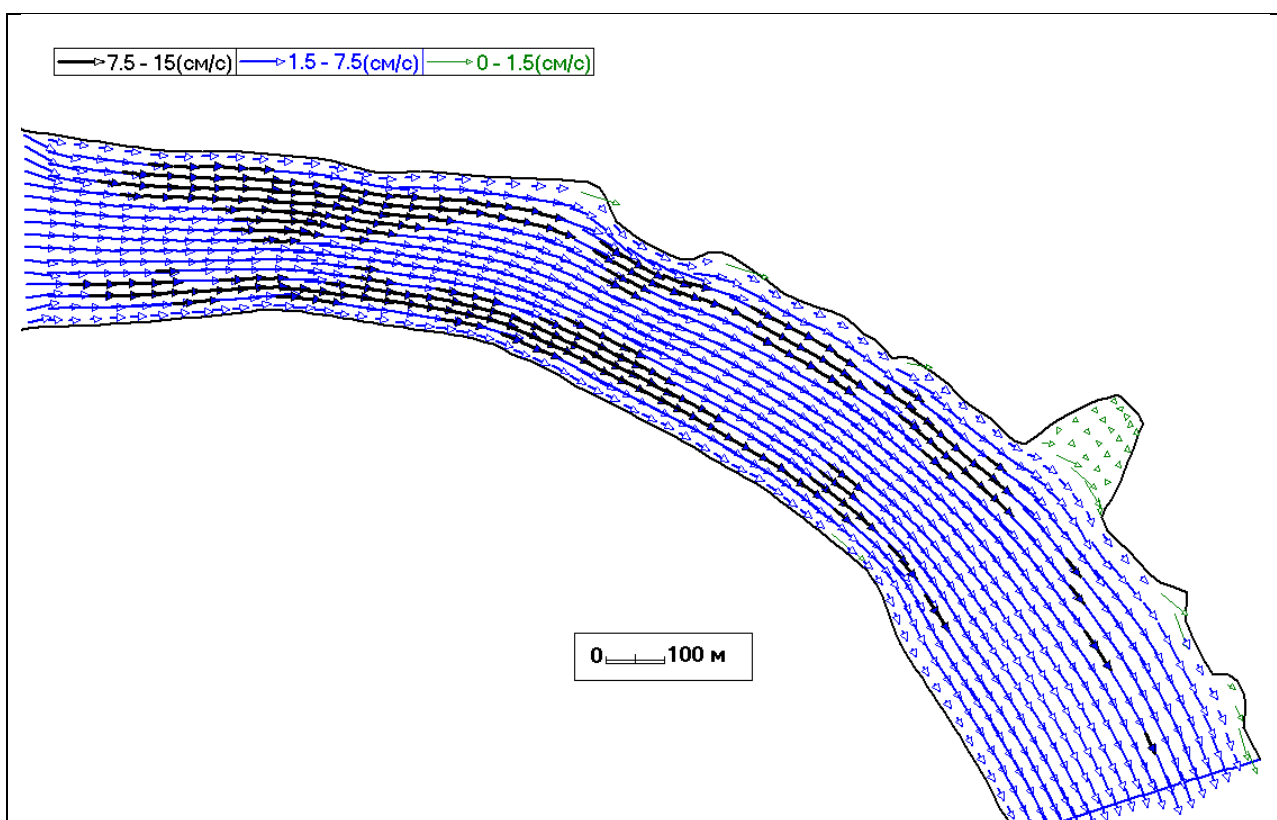


Рисунок 4.4 – Поле течений в срединном слое в модели участка Лопатинской воложки.  
Показано положение водосброса. Модель LOK 1

## 5. Расчет мощностей источников загрязнения

### 5.1 При отсыпке щебня

Проектом предусматривается выполнение следующих работ по прокладке сети в воде:

- дноуглубительные работы по созданию прорези с использованием земснаряда 1400/40 с перемещением пульпы в геотубы. Мутность при этом не образуется.

- обратная засыпка прорези щебнем объемом 5233 м<sup>3</sup>. Продолжительность работы - 1.63 дня в две смены по 8 часов.

Щебень должен отвечать требованиям ГОСТ 8267-93. Согласно этому ГОСТу содержание пылеватых частиц не должно превышать 1-3%.

Масса грунта, попадающего в воду при отсыпке щебня в единицу времени (мощность источника), определяется по формуле

$$Q = \rho_{\text{гр}} Q_{\text{с}} \sigma ,$$

где  $\rho_{\text{гр}}$  – плотность разрабатываемого грунта,  $Q_{\text{с}}$  – секундная расчетная производительность земснаряда по грунту ( $5233/31/3600 = 0.047$ ),  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий потери. Интервал между концом и началом работы – 8 часов.

Объем щебня, засыпаемого в траншею, по фракциям.

Щебень фракция 5- 20 - 1708.26 м<sup>3</sup> (1360 кг/м<sup>3</sup>)

Щебень фракция 40-70 – 169.50 м<sup>3</sup> (1320)

Щебень фракция 80- 120 - 3355.40 м<sup>3</sup> (1400)

$$(1708 \cdot 1360 + 170 \cdot 1320 + 3355 \cdot 1400) / 5233 = 1384$$

При средней плотности грунта равной 1384 кг/м<sup>3</sup> получаем мощность источника загрязнения при отсыпке щебня:

$$Q = 1384 \times 0.047 \times 0.03 = \mathbf{1.95 \text{ кг/с.}}$$

### 5.2 При разбавлении сточных вод

Очищенные стоки с третичной очистки направляются через измерительный колодец (где измеряется расход, pH и температура воды) и пробоотборник через выпуск №1 в водный объект - протоку Лопатинская Воложка (река Волга, Куйбышевское водохранилище). Тип выпуска – русловой, рассредоточенный, оголовок из 2 отверстий Ø 412 мм.

Средний объем сточных вод, поступающих на сброс – 60 000 м<sup>3</sup>/сутки. Задавался максимум сброса - 3000 м<sup>3</sup>/час. (0.83 м<sup>3</sup>/с). При общем диаметре сбросных труб 0.824 м начальная скорость в водовыпуске = 2,8 м/с.

На сбросе задавалась концентрация условной примеси равная 1.

Для правильного учета начального разбавления, объем ячейки сброса должен соответствовать объему зоны начального разбавления. Согласно [8] при диаметре труб 0.824 м и скорости на сбросе 1.53 м/с он равен 51 м<sup>3</sup>. В модели ячейка сброса имеет такой же объем.

## 6. Результаты расчетов

Работы по отсыпке щебня выполнялись в течение 16 ч в первые сутки и 15 ч – во вторые (1.63 дня). Интервал между сбросами щебня 8 ч. На рисунке 5.1 показаны графики хода накопительных объемов и площадей загрязненной воды при отсыпке щебня. Временной ход объемов загрязненной воды за этот же период приведен на рисунке 5.2.

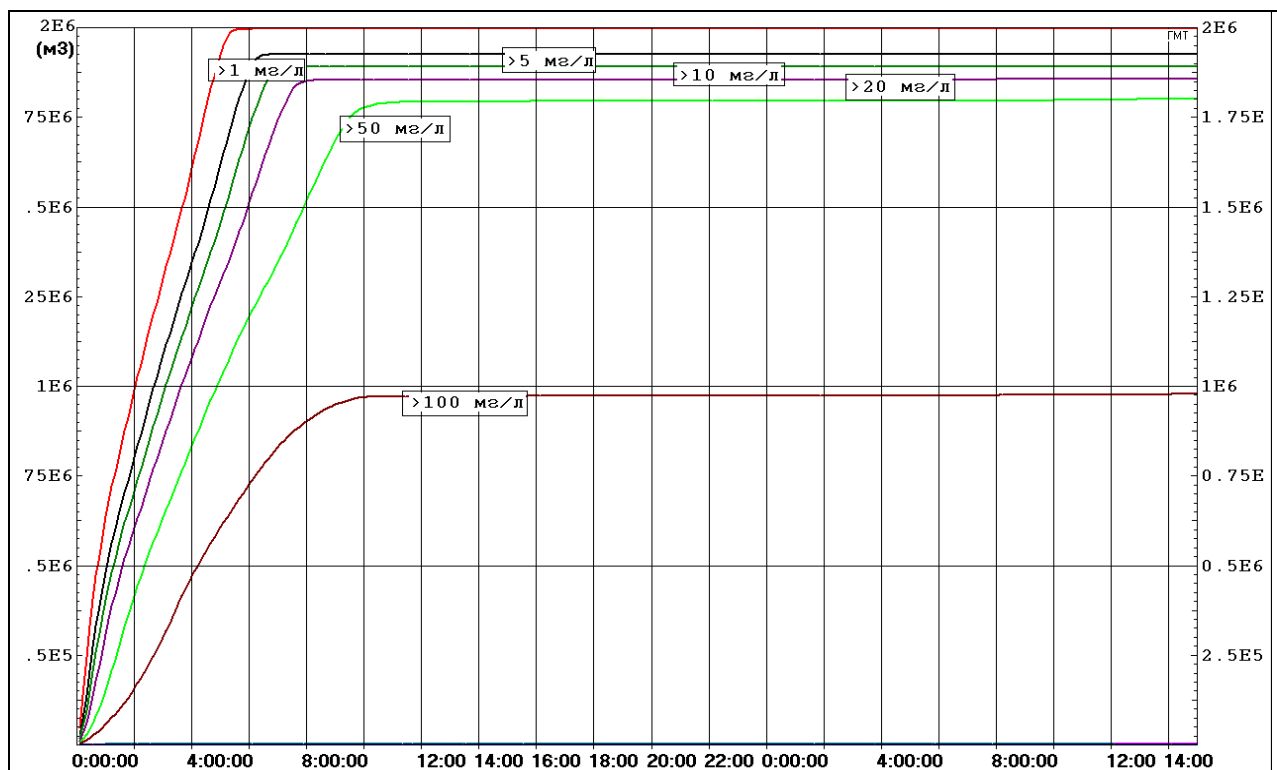


Рисунок 5.1 – Накопительные графики временного хода загрязненного водного пространства (м³) с заданными минимальными концентрациями при отсыпке щебня

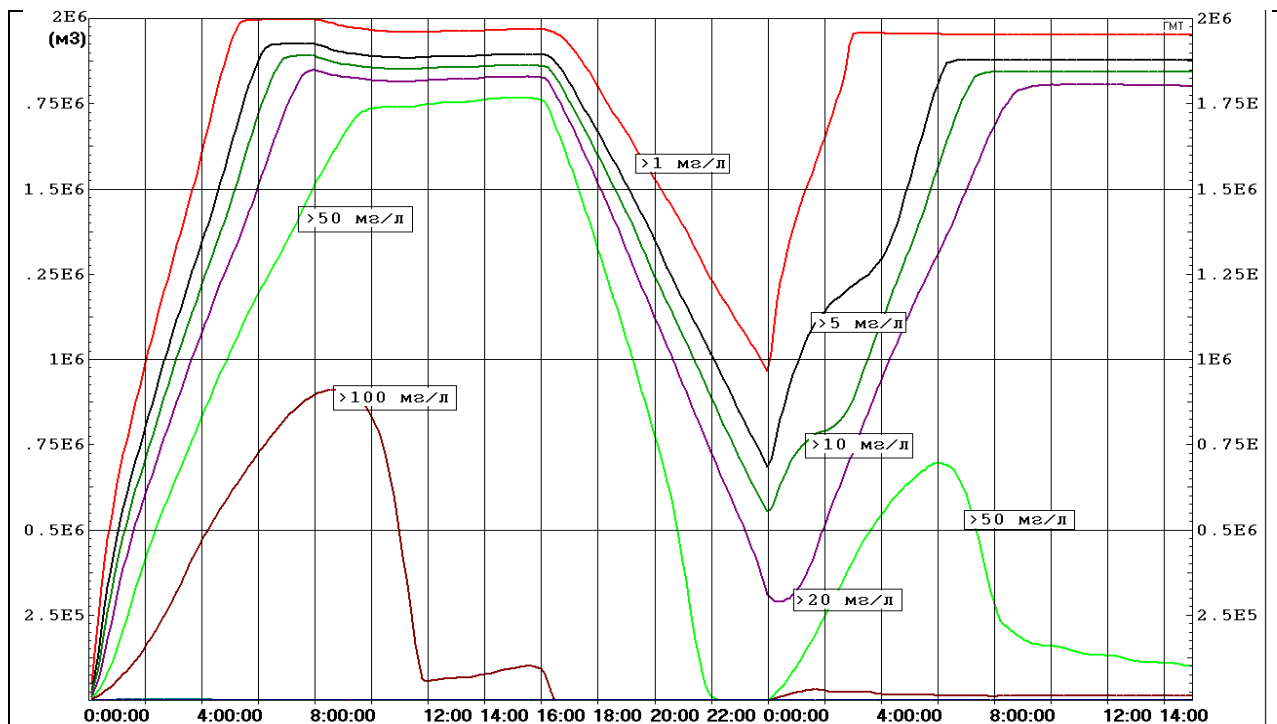


Рисунок 5.2 – Временной ход загрязненного водного пространства (м³) с заданными минимальными концентрациями при отсыпке щебня



Изолинии концентрации взвешенных частиц грунта в срединном слое к моменту конца отсыпки щебня показаны на рисунке 5.3.

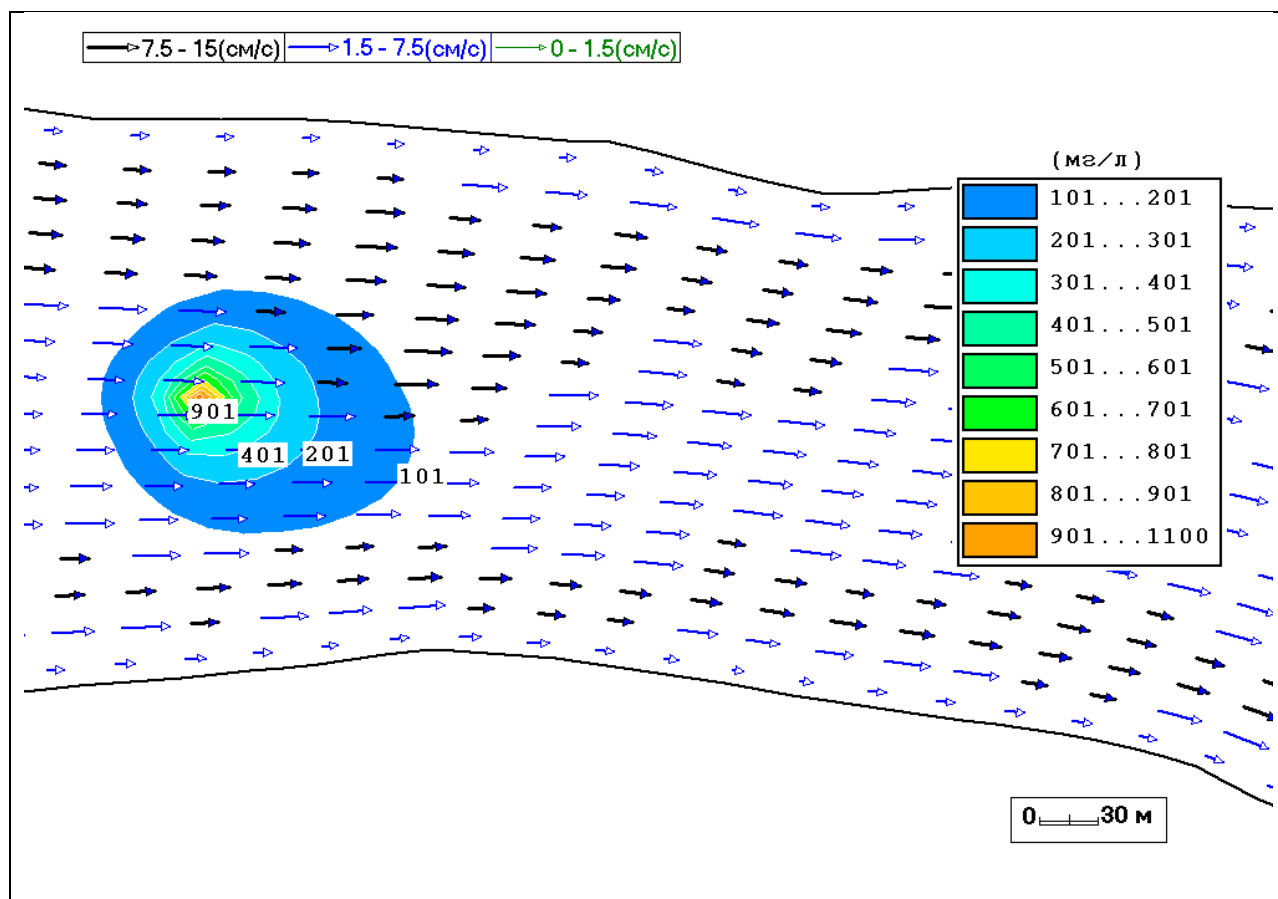


Рисунок 5.3 – Изолинии концентраций взвеси (мг/л) и векторы скорости в срединном слое в момент конца отсыпки щебня

В таблицах 5.1 – 5.5 представлены данные о средних мгновенных объемах и площадях облаков с различными минимальными концентрациями и накопительных объемах и площадях загрязненного водного пространства и времени существования облаков при работах по отсыпке щебня.

Таблица 5.1 - Средние мгновенные значения объемов загрязненной воды (тыс.м<sup>3</sup>) с заданными минимальными концентрациями (мг/л) при отсыпке щебня

№ пп	Виды работ	>1	>5	>10	>20	>50	>100	>500	>1000
1	Отсыпка щебня	<b>1726.81</b>	<b>1544.46</b>	<b>1446.49</b>	<b>1329.11</b>	<b>784.64</b>	<b>175.86</b>	<b>0.42</b>	<b>0.06</b>

Таблица 5.2 - Средние мгновенные значения площадей загрязненной воды (тыс.м<sup>2</sup>) с заданными минимальными концентрациями (мг/л)

№ пп	Виды работ	>1	>5	>10	>20	>50	>100	>500	>1000
1	Отсыпка щебня	<b>614.88</b>	<b>549.20</b>	<b>514.65</b>	<b>474.23</b>	<b>295.4</b>	<b>75.11</b>	<b>1.20</b>	<b>0.26</b>

Таблица 5.3 - — Площади заилиения (тыс.м<sup>2</sup>) с заданными минимальными значениями толщины слоя наилка (мм)

№ пп	Виды работ	>1	>5	>10	>20	>50	>100	>500	>1000
1	Отсыпка щебня	<b>157.27</b>	<b>54.52</b>	<b>7.27</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Таблица 5.4 - Время существования облаков загрязненной воды с заданными минимальными концентрациями (час), общее/после окончания работ

№ пп	Виды работ	>1	>5	>10	>20	>50	>100	>500	>1000
1	Отсыпка щебня	<b>53.7/14.7</b>	<b>50.0/11.0</b>	<b>48.5/9.5</b>	<b>46.4/7.4</b>	<b>37.5/0.5</b>	<b>31.8/0.2</b>	<b>31.0/0</b>	<b>0</b>

Таблица 5.5 – Объем воды (тыс. м<sup>3</sup>), протекшей через загрязненное облако с концентрациями выше заданной

№ пп	Виды работ	>1	>5	>10	>20	>50	>100	>500	>1000
1	Отсыпка щебня	<b>8335.82</b>	<b>8576.76</b>	<b>8280.47</b>	<b>7943.01</b>	<b>6327.1</b>	<b>3015.0</b>	<b>61.0</b>	<b>1.16</b>

На рисунке 5.4 показаны изолинии коэффициента разбавления сбросных вод по отношению к начальному ( $k=c_0/c$ ) в срединном слое на момент стационарирования концентраций  $c_0=0.35$ .

На рисунке 5.5 - изолинии коэффициента разбавления сбросных вод на вертикальном разрезе на расстоянии 500 м от сброса

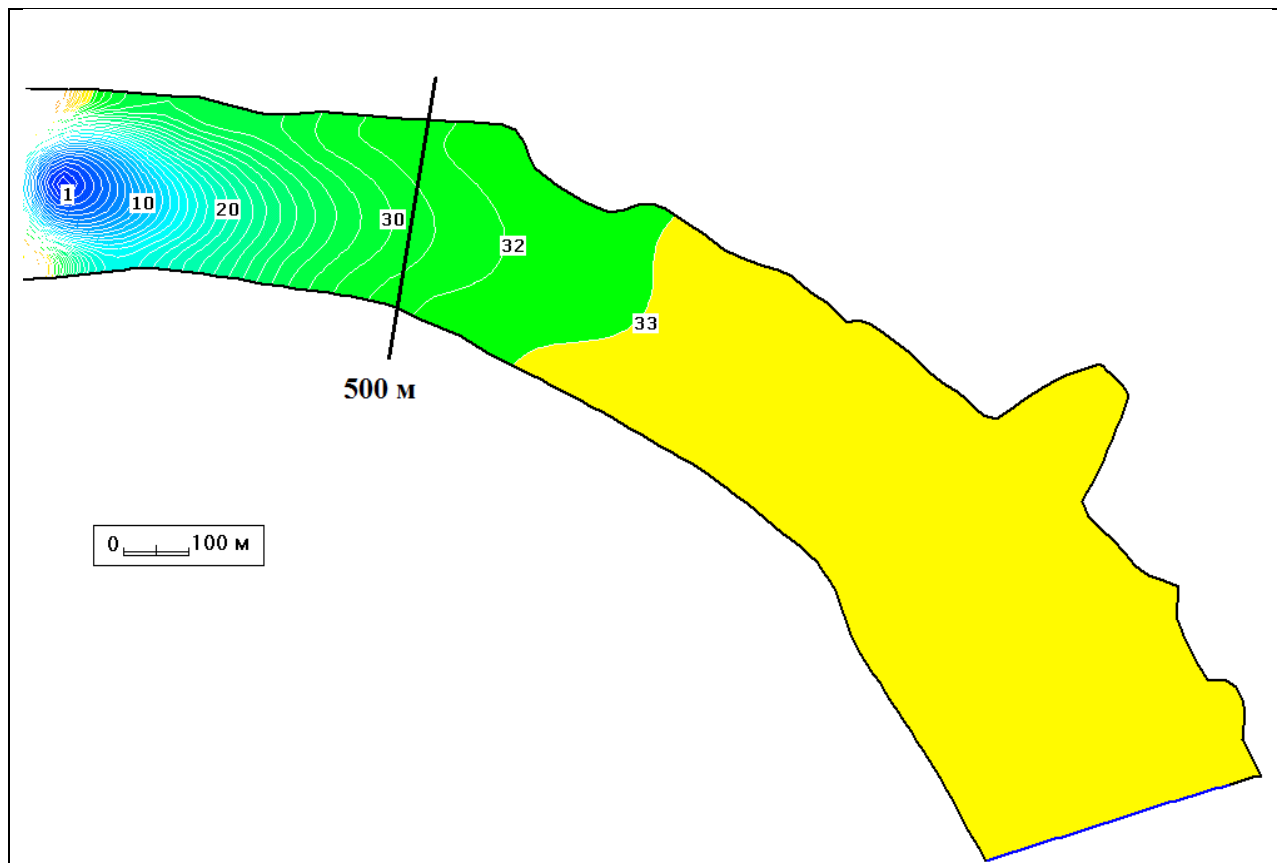


Рисунок 5.4 – Изолинии коэффициента разбавления сбросных вод в срединном слое на момент стационарирования концентраций

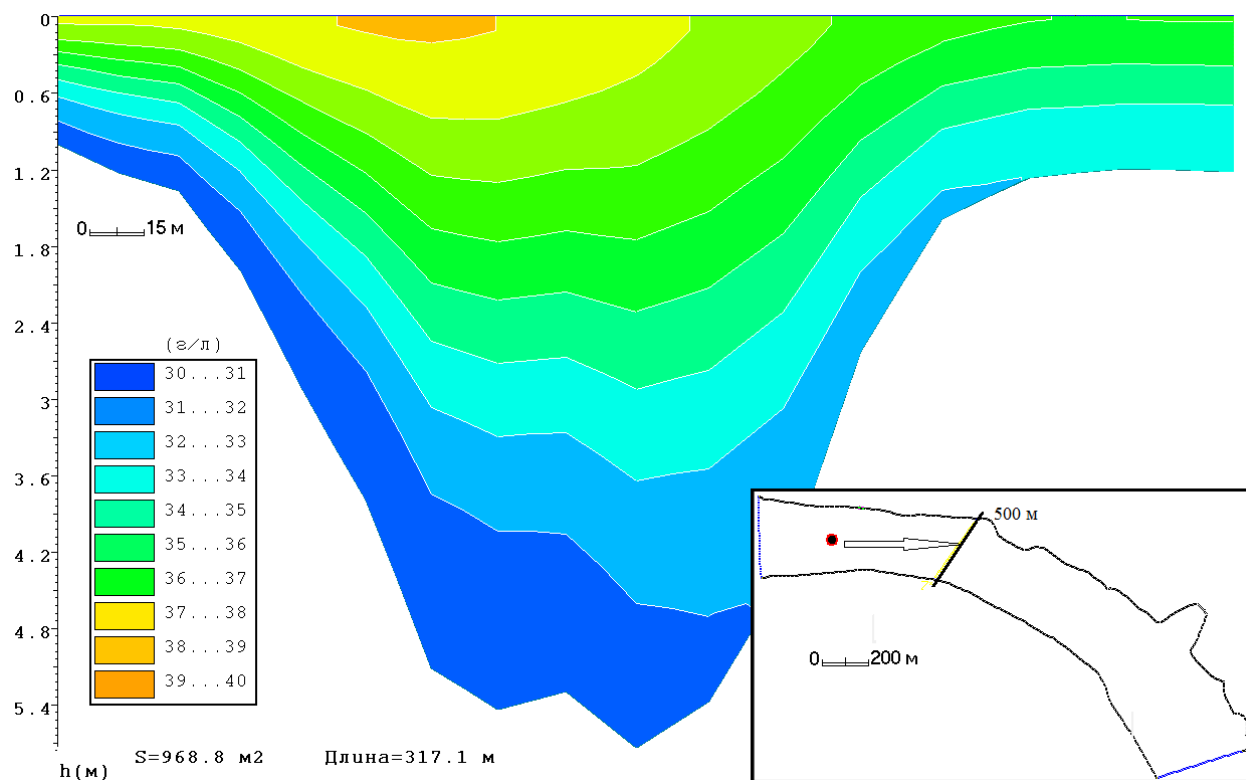


Рисунок 5.5 – Изолинии коэффициента разбавления сбросных вод на вертикальном разрезе на расстоянии 500 м от сброса

## Список использованных источников

1. Klevanny K.A., Matveyev G.V., Voltzinger N.E. Integrated modelling system for coastal area dynamics. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1994, v.19, N.3, p.181-206.
2. Клеванный К.А. Моделирование длинноволновых процессов в геофизической гидродинамике. Диссертация, Российский государственный гидрометеорологический университет, 1999, 313 с.
3. Мамаев О.И., Миллард Р. Международные океанографические таблицы, т.4. Свойства, основанные на Международном уравнении состояния морской воды, 1980. - ЮНЕСКО, 1987, Техн. документ по морским наукам, 40, 195 с.
4. Smith S.D., Banke E.G. Variation of sea-surface drag coefficient with wind speed. Quart. J. Royal Meteorolog. Soc., 1975, v.101 (429).
5. Роди В. Модели турбулентности окружающей среды. Методы расчета турбулентных течений, М., Мир, 1984, с.227-322.
6. Launder B.E., Morse A., Rodi W., Spalding D.B. Prediction of free shear flows - a comparison of the performance of six turbulence models. Free Turbulent Shear Flows, Conf. Proc., v.1, NASA Rep. # SP-321, 1973, p. 361-422.
7. Окубо А., Озмидов Р.В. Эмпирическая зависимость коэффициента горизонтальной диффузии в океане от масштаба явления. ФАО, 1970, т. VI, №5, с.534-536.
8. Лапшев Н.Н. Расчеты выпусков сточных вод, Стройиздат, 1977

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. Техническое задание

Приложение № 1  
к договору № 6/2021  
от 16.08.2021 г.

СОГЛАСОВАНО

Генеральный директор  
ООО «КАРДИНАЛ софт»  
  
Е.В. Смирнова



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
ООО «Регион»  
  
А.В. Жукин



### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на выполнение работ по моделированию по теме:

«Расчет распространения сточных вод и взвешенных частиц грунта при реализации  
проекта "Строительство водовыпуска после 3 этапа очистных сооружений сточных вод  
АО «конфиденциально»

№ п/п	Перечень основных данных и требований	Основные данные и требования
1	Наименование объекта	"Строительство водовыпуска после 3 этапа очистных сооружений сточных вод АО «конфиденциально»
2	Местоположение объекта	
3	Заказчик	ООО «Регион»
4	Исполнитель	ООО «КАРДИНАЛ софт»
5	Состав и объем Работ	Проведение математического моделирования переноса сточных вод и взвешенных частиц грунта в водной среде и распределения донных отложений.
6	Перечень предоставляемых Заказчиком исходных данных	
7	Сроки разработки документации	В соответствии с п. 7.1 Договора

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Свидетельство об официальной регистрации ПК CARDINAL

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
об официальной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2006612750**

**Coastal Area Dynamics Investigation Algorithm  
(CARDINAL)**

Правообладатель(ли): **Клеванный Константин Алексеевич (RU)**

Автор(ы): **Клеванный Константин Алексеевич (RU)**

Заявка № **2006612558**  
Дата поступления **24 июля 2006 г.**  
Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ  
**3 августа 2006 г.**



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов