5 [2025]
ISBN 978-5-901722-00-8
ТРАНСПОРТ. ГОРИЗОНТЫ РАЗВИТИЯ

УДК 004.942

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВОДНОГО ПОТОКА И ИЗМЕНЕНИЯ РУСЛА В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗРАБОТКИ КАРЬЕРА «ЧЕРМУШИНСКОЕ» НА 1185-1207 КМ Р. ВОЛГА НА ОСНОВЕ ИМЕЮЩИХСЯ НАВИГАЦИОННЫХ КАРТ, РУСЛОВЫХ И СПУТНИКОВЫХ СЪЕМОК

Решетников Максим Алексеевич[1], доцент, кандидат технических наук
e-mail: serfskiwind@gmail.com
Воронина Юлия Евгеньевна[1], доцент, кандидат технических наук
e-mail: yulez@ya.ru

[1] Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. На основании результатов математического моделирования участка руслового карьер «Чермушинский» в естественном и проектном состояниях при различных уровнях воды проведен детальный анализ русловых деформаций на участке нижнего бьефа Чебоксарского гидроузла. Исследование кинематической структуры потока, выявление ее связи с размывающими, неразмывающими и средними скоростями течения, позволяет спрогнозировать последующие после разработки месторождения русловые переформирования.

Ключевые слова: русловой карьер, моделирование, речной поток, русловые деформации, условия судоходства.

MATHEMATICAL MODELING OF WATER FLOW DYNAMICS AND CHANNEL CHANGES AS A RESULT OF THE DEVELOPMENT OF THE CHERMUSHINSKOYE QUARRY ON 1185-1207 KM OF THE VOLGA RIVER BASED ON AVAILABLE NAVIGATION MAPS, CHANNEL AND SATELLITE SURVEYS

Maksim A. Reshetnikov[1], Associate Professor, Candidate of Technical Sciences
e-mail: serfskiwind@gmail.com
Yulia E. Voronina[1], Associate Professor, Candidate of Technical Sciences
e-mail: yulez@ya.ru

[1] Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Based on the results of mathematical modeling of the Chermushinsky channel quarry section in natural and design conditions at various water levels, a detailed analysis of channel deformations in the lower reaches of the Cheboksary hydroelectric complex was carried out. The study of the kinematic structure of the stream, revealing its relationship with the eroding, non-eroding and average flow velocities, allows us to predict subsequent channel transformations after the development of the deposit.

Keywords: channel quarry, modeling, river flow, channel deformations, navigation conditions.

Разработка руслового карьера, как правило, оказывает разного рода негативные воздействия на состояние речного участка. В данной статье рассматривается моделирование речного потока в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС, в районе месторождения «Чермушинское» на участке 1191-1202 км судового хода. Анализ влияния карьера рассмотрен в одной из предыдущей публикации авторов [1]. Схема расположения карьера представлена на рисунке 1.

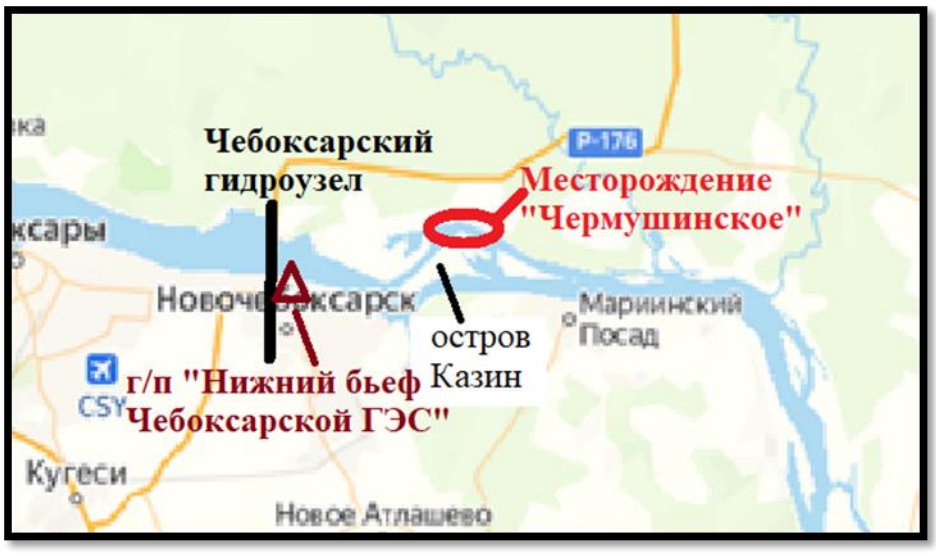


Рисунок 1 – Схема расположения карьера

Разработка руслового карьера, как и любое инженерное воздействие на речную систему, связано с возможными техногенными рисками и последствиями для окружающей среды. Разработка руслового карьера приводит к изменению кинематической структуры потока и, как результат, изменению режима русловых процессов. Для оценки влияния карьера на русловые деформации и судоходные условия в настоящее время широко применяется математическое моделирование.

В настоящее время широкое распространение получили одномерные, двухмерные и трехмерные математические модели. Трехмерные модели, основанные на уравнении Навье-Стокса, показывают наиболее точные результаты по моделированию структуры потока и его «отклик» на разработку руслового карьера.

Отправной точкой создания компьютерных математических моделей является решение полной системы гидродинамических уравнений Навье-Стокса. В общем виде трехмерная система гидродинамических уравнений движения вязкой жидкости в форме, предложенной Навье и Стоксом, дополняется уравнением неразрывности (1). Для учета турбулентных процессов используется k-e модель [2, 3].

На первом этапе моделирования необходимо создать детальную трехмерную модель участка реки. Создание такой модели выполняется на основе данных о рельефе дна и береговой полосы в САПР. В качестве исходных данных для создания трехмерной геометрии участка реки используется атлас ЕГС, данные промеров глубин, спутниковые снимки участка. Необходимо отметить, что для удобства выполнения расчетов и создания модели, построение цифровой модели рельефа дна реки ведется не в глубинах, а в отметках.

$$\begin{gathered}\frac{dV_x}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2}\right) = F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}; \\ \frac{dV_y}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2}\right) = F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}; \\ \frac{dV_z}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}\right) = F_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}; \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt},\end{gathered} \quad (1)$$

где t – время;

V_x, V_y, V_z – компоненты абсолютной скорости движения жидкости;

F_x, F_y, F_z – компоненты массовых сил;

p – пьезометрическое давление;

ρ – плотность;

ν – эффективная вязкость.

После создание ЦМР дна реки, триангуляционная поверхность дна закрывается сверху плоскостью на расчетную отметку уровня воды. Таким образом, получается трехмерная объемная модель исследуемого участка реки в естественном состоянии (рис. 2). Для создания модели в проектном состоянии (с учетом полностью разработанного карьера) к геометрии в естественном состоянии добавляется геометрия карьера. Все данные операции выполняются в САПР штатными командами. Твердотельная модель на данном этапе экспортируется в формате *stl.

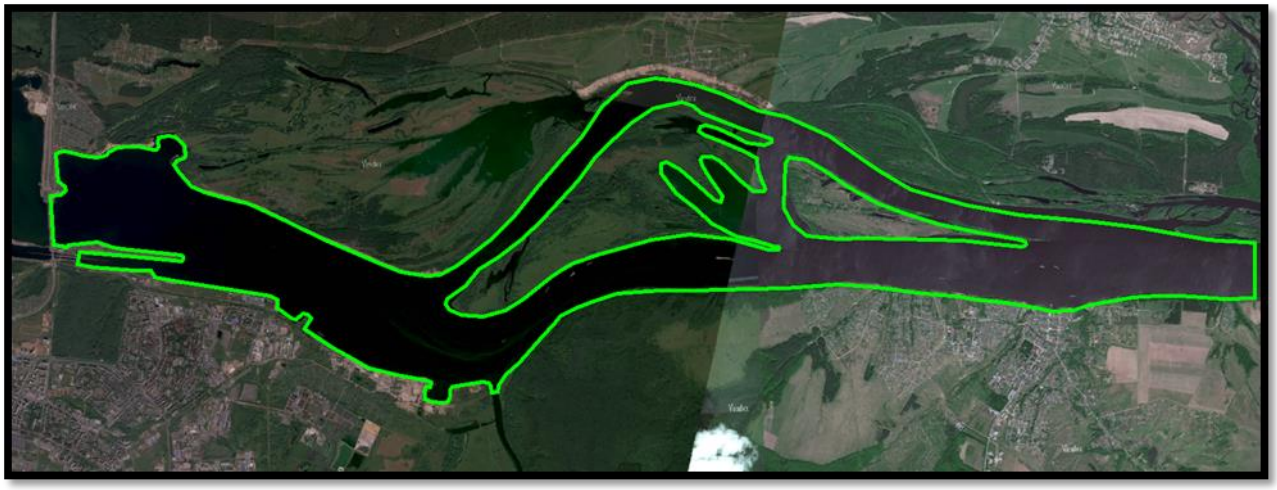


Рисунок 2 – Граница цифровой модели рельефа дна исследуемого участка наложенная на спутниковый снимок

Назначение граничных условий на геометрию участка реки представлено на рисунке 3.

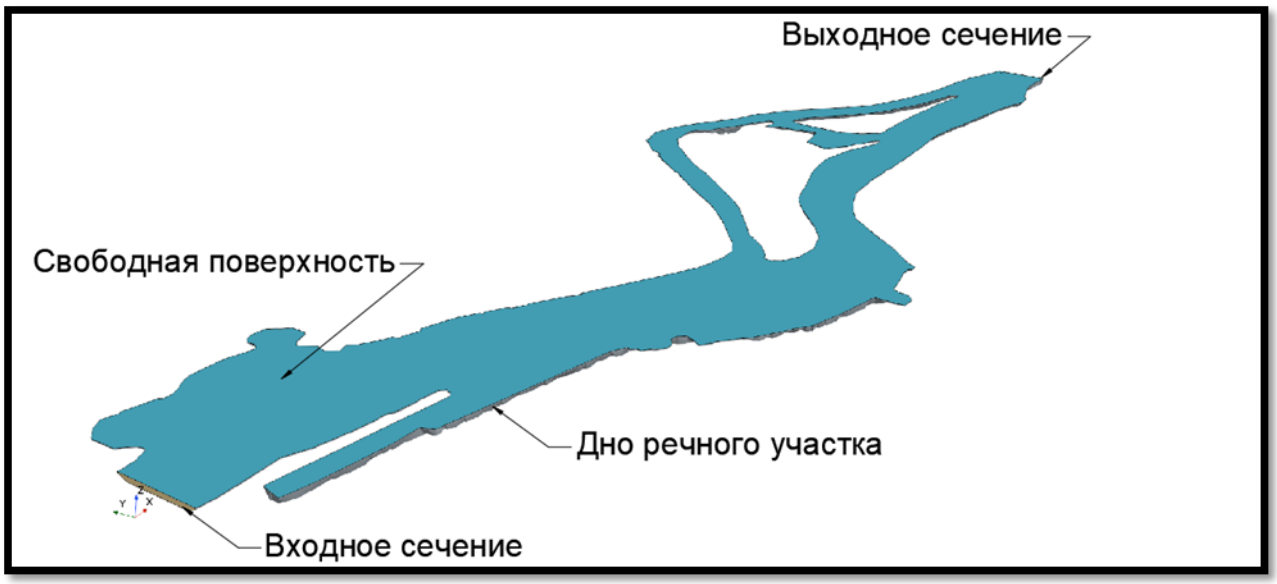


Рисунок 3 – Назначение граничных областей на расчетную геометрию

Для рассматриваемой задачи достаточно задание четырех граничных областей:

1. Входное сечение – массовый расход на входе;
2. Дно реки – условие стенки с тангенциальной скоростью потока равной нулю относительно соответствующей системы отсчета;
3. Свободная поверхность реки – плоскость симметрии с касательными напряжениями равными нулю;
4. Выходное сечение – развитый поток.

На основе созданной трехмерной геометрии речного потока создается сначала качественная поверхностная триангуляционная сетка, а затем разбивается объемная. Пример разбитой объемной сетки в районе выходного участка представлен на рисунке 4. В целях сокращения количества расчетных ячеек, а следовательно, и трудоемкости решения (времени решения) на участках реки со спокойным равномерным течением ячейки объединяются. Пример объединенных ячеек в середине толщи потока представлен на рисунке 5. В целях снижения количества расчетных ячеек используется отношение плановых размеров ячейки к ее высоте в соотношении 10:1. При таком основном условии создании расчетной сетки общее количество расчетных ячеек для всех расчетных случаев не превышало 1,5млн ячеек. Применение расчета на графическом процессоре вычислительной задачи позволило получить стабильное решение уже через 20 минут при стационарной постановке задачи.

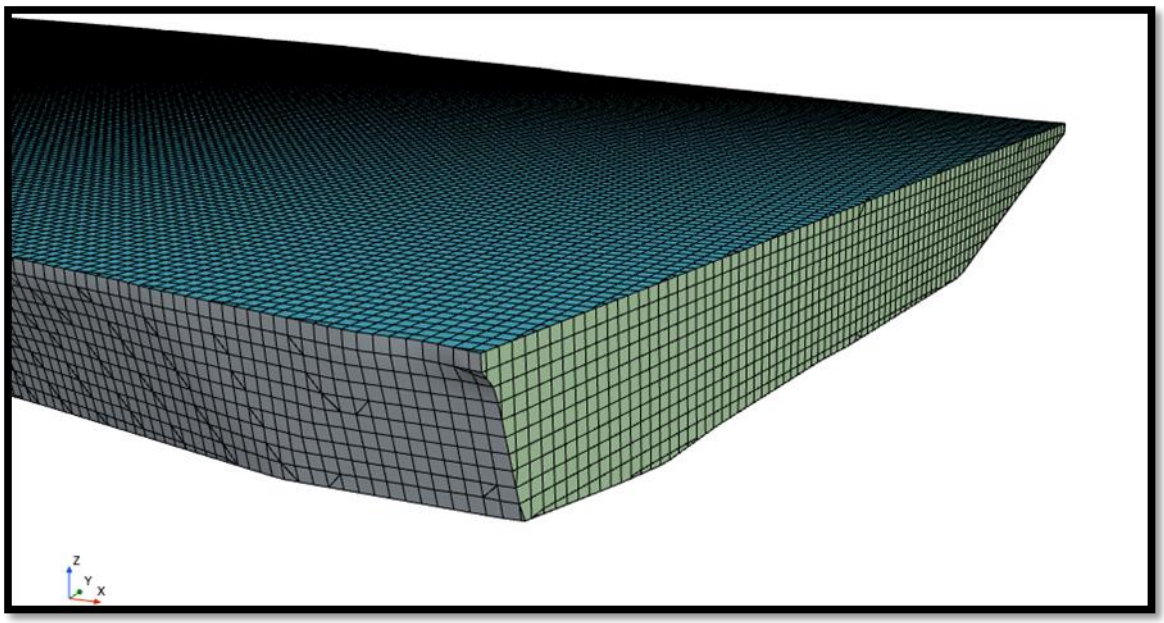


Рисунок 4 – Расчетная объемная сетка в районе выходного сечения

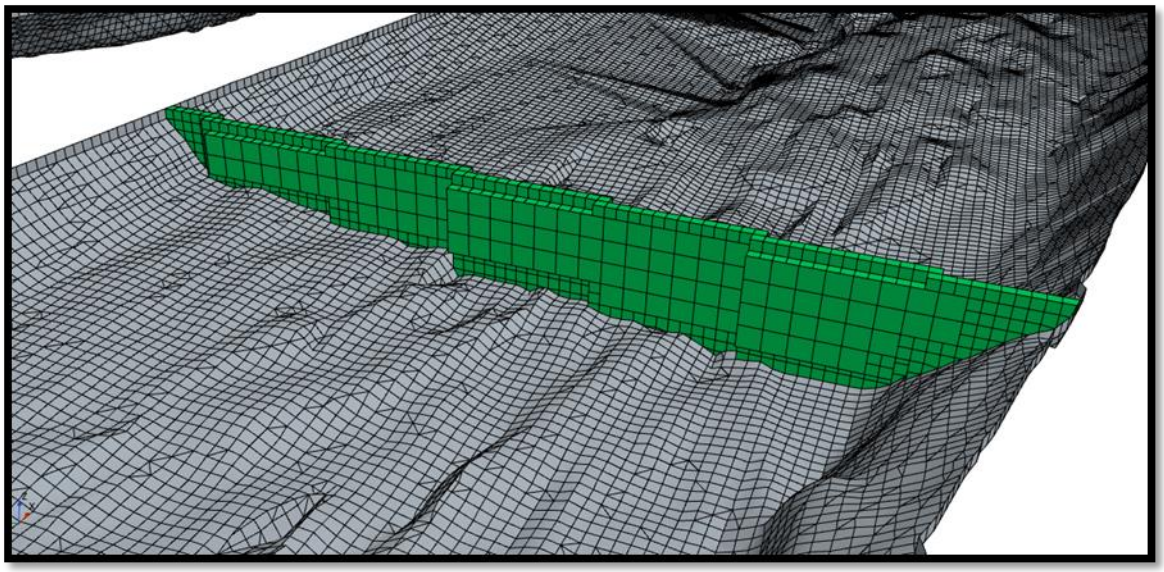
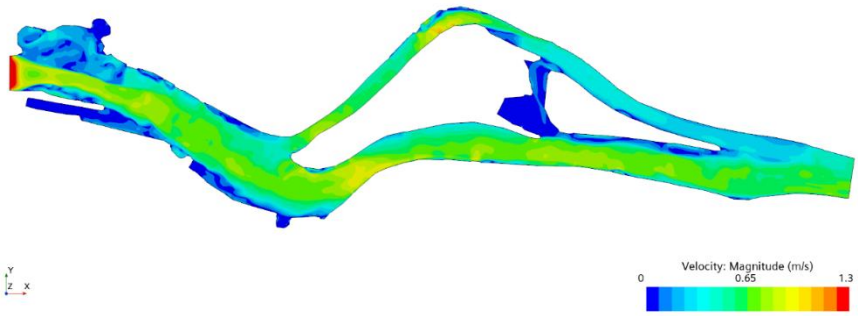


Рисунок 5 – Пример увеличенного размера ячеек в середине толщи потока

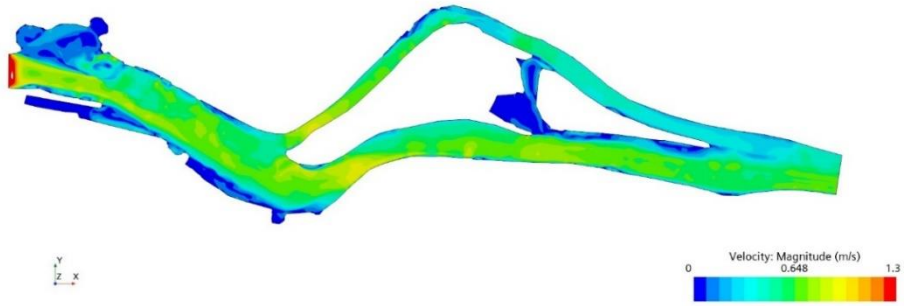
Моделирование выполняется для 4 расчетных вариантов:

- естественное состояние участка реки при расходе 1900м3/с;
- проектное состояние участка реки при расходе 1900м3/с;
- естественное состояние участка реки при расходе 4400м3/с;
- проектное состояние участка реки при расходе 4400м3/с.

Для исследования изменения структуры потока, вызванного разработкой карьера, используется информация о векторном поле скоростей потока, распределение давления, линии тока и др. Пример сравнения скалярного поля поверхностных скоростей представлен на рисунке 6.



а)



б)

Рисунок 6 – Распределение поверхностных скоростей при отметке поверхности воды 53м БСВ а) – естественное состояние, б) – с учетом полной разработки карьера

Построение линий тока позволяет визуально выявить особенности движения потока, в частности на рисунке 7 показано циркуляционное движение потока в карьере после поворота.

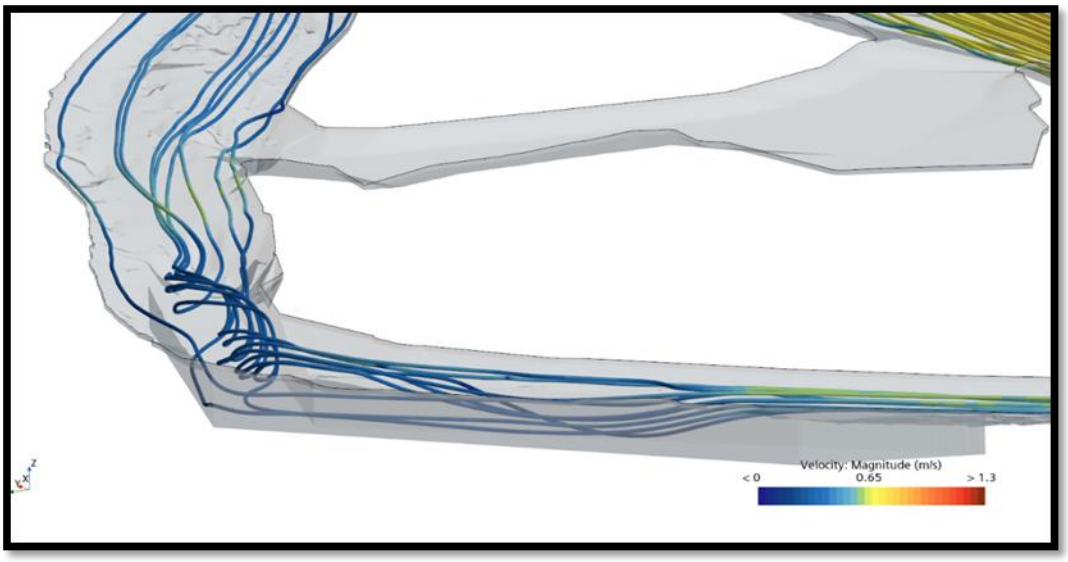


Рисунок 7 – Линии тока в районе карьера выявляющие циркуляционное движение потока

Применение математического моделирование позволило выявить особенности влияния от разработки карьера на естественную структуру речного потока. Можно сделать вывод, что разработка карьера в несудоходном рукаве Старой Волги не окажет существенного влияния на условия судоходства по основному судовому ходу. Карьер не создает существенного перераспределения расходов между судоходным и несудоходным рукавами. Соединяющая протока практически не влияет на поведение рукавов и является отдельным русловым элементом данного участка.

Список литературы:

1. Влияние "Чермушинского" карьера на деформационное состояние несудоходного рукава в русле Р. Волги по результатам математического моделирования / Ю. Е. Воронина, М. В. Шестова, А. Н. Ситнов, М. А. Решетников // Тридцать девятая Всероссийская с международным участием межвузовская научная конференция по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов : доклады и сообщения, Чебоксары, 07–11 октября 2024 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2024. – С. 78-81. – EDN HWEKJU.

2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

3. EL TAHRY, S. H. (1983). k-epsilon equation for compressible reciprocating engine flows. Journal of Energy, 7(4), 345–353. doi:10.2514/3.48086