

УДК 627.131

## ПРИМЕНЕНИЕ ОДНОМЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ УРОВЕННОГО РЕЖИМА РЕЧНЫХ УЧАСТКОВ

**Решетников Максим Алексеевич**<sup>1</sup>, кандидат технических наук, старший преподаватель  
*e-mail:* [serfskiwind@gmail.com](mailto:serfskiwind@gmail.com)

**Матюгин Михаил Александрович**<sup>1</sup>, доцент  
*e-mail:* [mihasan10@yandex.ru](mailto:mihasan10@yandex.ru)

<sup>1</sup> Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** Положение кривой свободной поверхности воды речных участков является одним из основных показателем антропогенного воздействия на реку. При разработке русловых карьеров, дноуглубительных прорезей происходит посадка уровня воды. Существуют различные подходы к расчету кривой свободной поверхности воды, основанные на численном моделировании потока. Одна из наиболее простых является одномерная энергетическая модель речного потока. В статье выполнено сравнение натуральных данных, полученных во время изысканий 2023 г. на р. Верхняя Белая с данными математического моделирования. Анализ показал сопоставимость полученных данных моделированием с натурными. Рассмотренный подход к исследованию положения свободной поверхности воды на основе одномерной энергетической модели может применяться при исследованиях уровня режима речных участков.

**Ключевые слова:** гидравлика потока, река, моделирование потока, свободная поверхность воды.

## APPLICATION OF A ONE-DIMENSIONAL ENERGY MODEL IN STUDIES OF THE LEVEL REGIME OF RIVER SECTIONS

**Reshetnikov Maksim Alekseevich**<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer  
*e-mail:* [serfskiwind@gmail.com](mailto:serfskiwind@gmail.com)

**Matyugin Mikhail Aleksandrovich**<sup>1</sup>, Associate Professor  
*e-mail:* [mihasan10@yandex.ru](mailto:mihasan10@yandex.ru)

<sup>1</sup> Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The position of the curve of the free water surface of river sections is one of the main indicators of anthropogenic impact on the river. During the development of channel quarries, dredging slots, the water level is lowered. There are various approaches to calculating the curve of the free surface of water based on numerical flow modeling. One of the simplest is a one-dimensional energy model of a river flow. The article compares the field data obtained during the 2023 surveys on the Upper Belaya River with mathematical modeling data. The analysis showed the comparability of the obtained data by modeling with natural ones. The considered approach to the study of the position of the free water surface based on a one-dimensional energy model can be used in studies of the level regime of river sections.

**Keywords:** flow hydraulics, river, flow modeling, free water surface.

Исследование положения кривой свободной поверхности воды на речных участках является одной из основных задач при исследовании речного потока в общем. В частности, положение кривой свободной поверхности исследуется при разработке русловых карьеров и оценке их влияния [1, 2]. В настоящее время существуют различные подходы к исследованию положения кривой свободной поверхности воды на речных участках. Наиболее часто используемыми являются методы основанные на математической постановке задачи. В частности, такие методы подразделяются на одномерную, двухмерную, трёхмерную задачи. Соответственно, с увеличением числа размерностей пространств многократно усложняются и расчеты, что требует значительное количество ресурсов (вычислительных мощностей, трудоемкости, времени и т.д.). Наиболее быстрым и менее затратным, а также сопоставимым с натурными данными являются одномерные математические модели.

Постановка одномерной модели сводится к разбивке реки на поперечные сечения, между которыми решается уравнение. Положение свободной поверхности воды рассчитывается от нижнего поперечного сечения к верхнему итерационным подходом. Схема постановки задачи между сечениями представлена на рисунке 1.

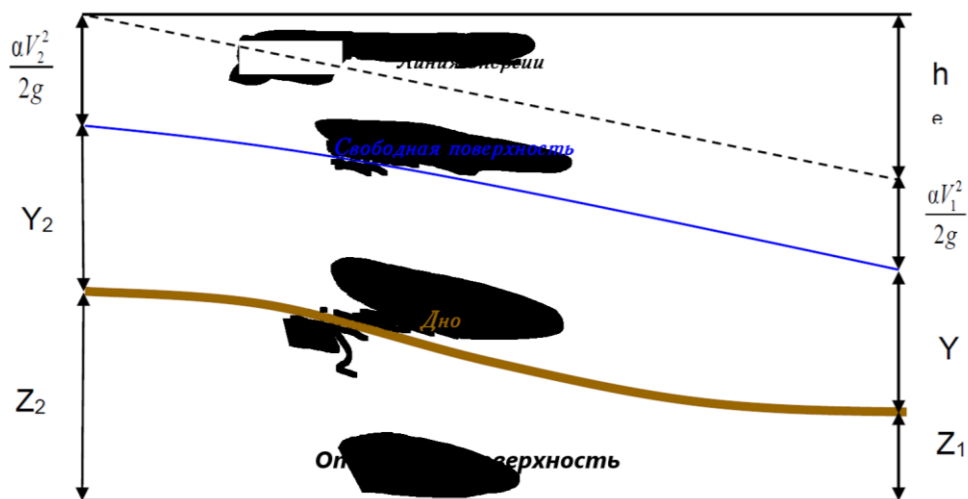


Рисунок 1 – Схема постановки модели между двумя сечениями

Для одномерной энергетической модели уравнение записывается в следующем виде:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

где  $Z_1, Z_2, \text{ м}$  – отметка дна;

$Y_1, Y_2, \text{ м}$  – отметка свободной поверхности воды;

$V_1, V_2, \text{ м/с}$  – средняя скорость в сечениях;

$\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты (по скоростному потоку)

$g, \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$h_e, \text{ м}$  – потери энергии речного потока между сечениями.

Таким образом, уравнение (1) представляет собой уравнение Бернулли для вязкой жидкости. Потери энергии потока  $h_e$  между двумя сечениями определяется суммой потерь на трение и изменением скоростного режима потока (изменение геометрии русла):

$$h_e = L\bar{S}_f + C\left(\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}\right) \quad (2)$$

где  $L$ , м – расстояние между сечениями,

$\bar{S}_f$  – уклон,

$C$  – коэффициент, учитывающий изменение геометрии русла.

Для определения потери энергии потока на трение используется уравнение Маннинга определяющее средняя скорость речного потока (безнапорный режим). Умножив уравнение Маннинга на площадь живого сечения, получается уравнение, определяющее расход воды в сечении. Добавив итерационный подход к данным уравнениям, можно выполнить вычисления между двумя расчетными сечениями, а затем передавать решения на вышерасположенные сечения и повторять итерации. Исходные данные к расчету должны содержать следующее:

- геометрические параметры расчетных сечений;
- гидрологические характеристики:
  - а) расход воды;
  - б) коэффициент шероховатости для участков;
  - в) гидравлический уклон.
- данные натурных изысканий.

Следует отметить, что наличие данных по натурным изысканиям позволяет выполнить верификацию получаемого решения и внести необходимые изменения в модель. Летом 2023 г. были выполнены гидрографические изыскания на реке Верхняя Белая от устья р. Сим до устья р. Уфа (рис. 2). Полученные данные позволяют проверить получаемое решение для данного участка на основе математического моделирования.

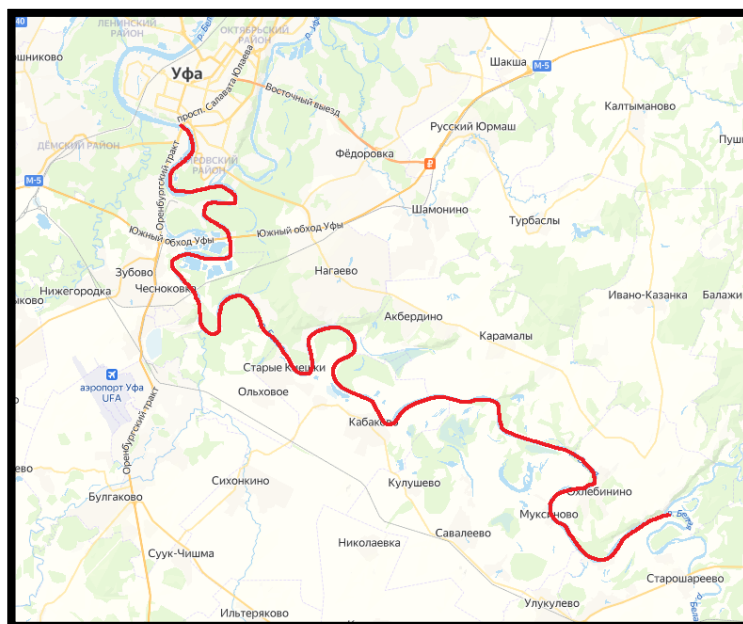


Рисунок 2 – Участок выполненных изысканий на р. Белая (красная линия)

Шаг расчетных сечений по длине реки выбирается исходя из особенностей потока реки и поставленной задачи. При наличии натурных данных легко выявить основные ошибки, которые допускают при расчетах. Одной из основных ошибок является отсутствие учета приточности от впадающих в реку других малых рек и водных потоков. Второй часто встречающейся ошибкой является неправильно заданные коэффициенты шероховатости для сечений или участков реки (завышенное или заниженное значение). Последняя ошибка сильно сказывается на положении кривой свободной поверхности воды для данного участка. Только имея результаты натурных изысканий, можно выявить такую ошибку.

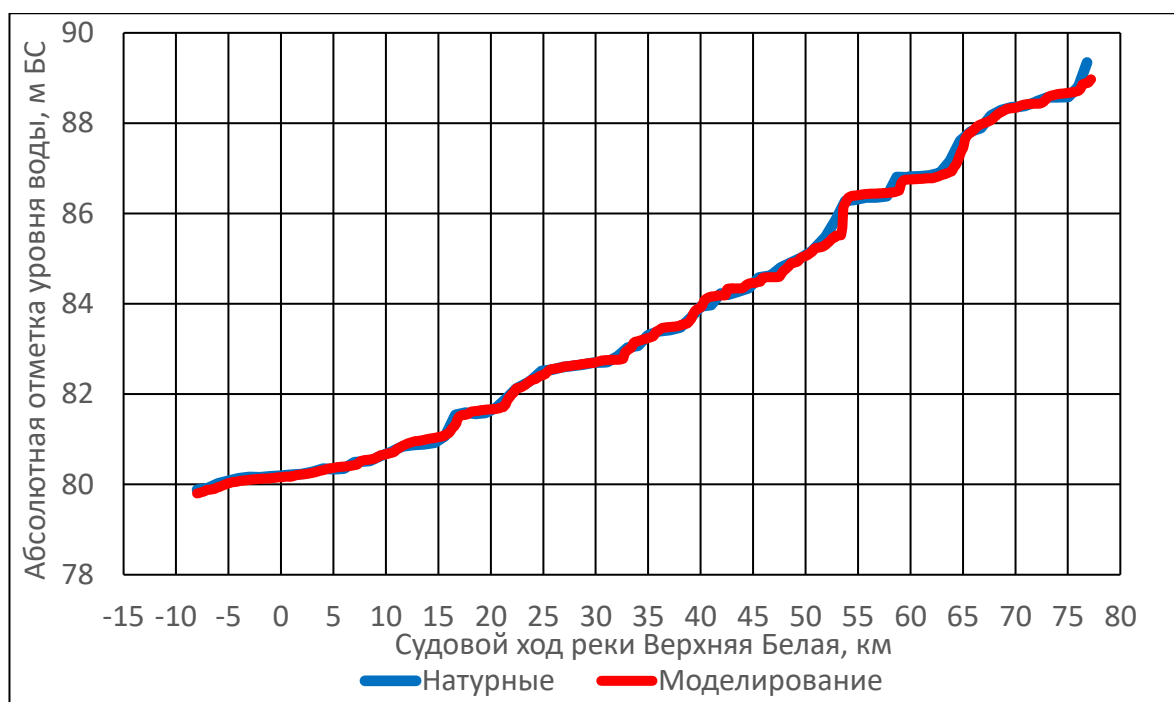


Рисунок 3 – Положение свободной поверхности воды на исследуемом участке по результатам натуральных изысканий и моделирования

Как можно увидеть из рисунка 3 по результатам моделирования свободная поверхность практически совпадает с натурными данными, однако имеются небольшие участки, где они не совпадают. В данном случае несовпадение можно объяснить наличием сильно развитой подводной растительности на участках, которая создает дополнительное сопротивление для потока, что вызывает подъем свободной поверхности воды на данных участках.

Таким образом, одномерная энергетическая модель одна из наиболее простых моделей, решение по которой не занимает большого объема времени. Сопоставимость результатов моделирования с натурными данными зависит от точности задания исходных данных. В любом случае необходимо иметь минимальный набор значений по результатам натуральных изысканий для контроля решения и своевременного обнаружения допущенных ошибок при моделировании. Применение рассматриваемой модели позволяет выполнять подход «обратного решения», когда ищется какая-либо неизвестная гидравлическая характеристика реки (коэффициент шероховатости участка, расход воды).

#### Список литературы:

1. Учет русловых процессов при размещении обводненного одиночного карьера / В.В. Агеева, Д.А. Кожанов, Е.А. Люкина, М.А. Решетников // Приволжский научный журнал. – 2023. – № 1(65). – С. 104 – 111. – EDN CIUBRW.
2. Матюгин, М.А. Определение положения кривой свободной поверхности на Казанцевском перекатном участке реки Белой / М.А. Матюгин, М.А. Решетников // Транспорт. Горизонты развития : Труды 3-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород, 14 – 16 июня 2023 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2023. – С. 67. – EDN PZLSJC.