

УДК 627.4, 574.65

**Ситнов Александр Николаевич**<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры Водных путей и гидротехнических сооружений

e-mail: stnv1952@rambler.ru

**Воронина Юлия Евгеньевна**<sup>1</sup>, доцент кафедры Водных путей и гидротехнических сооружений

e-mail: yulez@yandex.ru

**Шестова Марина Вадимовна**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры Водных путей и гидротехнических сооружений

e-mail: shestowam@yandex.ru

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

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА НИЖНЕЙ ВЯТКЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

*Аннотация.* На участке р.Вятка от гидрологического поста Вятские Поляны до ее устья располагается восемь затруднительных для судоходства участков, где перекаты будут лимитировать судоходство при возобновлении движения круизных судов. Оценка резерва роста судоходных глубин, а также изменение гидравлических условий в русле реки после выполнения значительного объема дноуглубительных работ зависит от особенностей уровня режима реки, наличия подпора от нижерасположенного Куйбышевского водохранилища, а также протяженности участка реки в свободном состоянии. Ограничение роста глубин на бесподпорных участках рек связано с возможным понижением уровня воды в результате дноуглубления русла, а возможности русла в поддержании заданных габаритов пути определяются значениями гидравлически допустимой глубины.

*Ключевые слова:* судовой ход, дноуглубительные работы, гарантированные габариты, гидравлически допустимая глубина, обеспеченность уровней, проектный уровень воды.

В связи с возможным возобновлением на р. Вятка судоходства с гарантированными габаритами судового хода, для обоснования требуемой глубины на участке необходимо определить ее допустимую с точки зрения гидравлики величину. Последняя зависит от гидрологических условий участка. Так, нижний участок р.Вятка (0-46,8 км) находится в постоянном подпоре Куйбышевского водохранилища и достижение увеличенных габаритов судового хода на нем через выполнение дноуглубительных работ не вызовет существенных изменений в уровнях воды в силу несопоставимости объемов извлекаемого грунта на участке и полного объема воды в водохранилище. Иное дело с участком на р.Вятка выше 46,8 км включительно до г/п Вятские Поляны (102-й км). Он в период глубокой летне-осенней межени находится в естественном бесподпорном состоянии и на его глубины влияют объемы извлекаемого из русла грунта. Однако и на нем также имеются определенные резервы для роста судоходных глубин. Для их выявления требуется обосновать максимально возможные по гидравлическим условиям потока судоходные глубины.

Существует ограничение на рост глубин на свободных реках в связи с посадками уровня воды при углублении русла. Поэтому увеличивать глубины целесообразно лишь

до тех пор, пока снижение уровня на опорном гидрологическом посту какого-либо плеса не превзойдет некоторой малой величины, например, средней ошибки при промерах (около 0,1 м). Транзитная глубина на плесе, при которой наблюдается такая посадка уровня, получила название гидравлически допустимой глубины (ГДГ).

Расчет глубины водного пути основан на применении уравнений гидравлики, по одному из которых средняя в сечении русла глубина на участке ( $T$ ) определена как (уравнение А. Шези) [1]:

$$T = \left( \frac{Qn}{B\sqrt{I}} \right)^{3/5}, \text{ м} \quad (1)$$

где  $Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с, который соответствует низкому проектному уровню;  
 $B$  – ширина русла, м (средненное значение на исследуемом участке р.Вятка, равное 330 м);

$n$  – коэффициент шероховатости (на устьевом участке р. Вятка преобладает песок средней крупности, для которого принят осредненный коэффициент 0,026);

$I$  – уклон водной поверхности.

Таким образом, значение средней глубины  $T$  по формуле (1) на исследуемом участке составляет 2,09 м.

Глубина по всей длине участка значительно меняется, при этом средние глубины на наиболее мелководных перекатах составляют 1,36 м, в том числе наименьшая глубина на участке 0,6 м, а максимальная 7,2 м. Расчетная средняя глубина на оси судового хода по материалам [2] составила 3,03 м.

Полученное в сечениях русла по длине участка расчетное значение средней глубины  $T=2,09$  м меньше осредненных глубин по судовому ходу (3,03 м) и для ее достижения требуется проведение меньшего объема дноуглубительных работ по возможности с «разведением» судоходных прорезей по длине участка на рекомендуемые расстояния для снижения посадки уровня воды. С определенным допущением полученная средняя глубина  $T=2,09$  м для естественных условий может считаться гидравлически допустимой. Однако ее величина требует уточнения и сопоставления с результатами расчетов по существующим методикам определения гидравлических возможностей русла.

Так, подход к расчету максимально возможной глубины на основе уравнения Маннинга разработан в Новосибирской государственной академии водного транспорта (НГАВТ). В этом подходе к уравнению Маннинга [3] добавлена гидравлическая характеристика поперечного сечения русла с учетом его асимметрии, для чего предложена специальная функция, зависящая от параметра формы поперечного сечения в части отношения средней глубины  $T$  к максимальной  $T_{max}$ . Исследуемая зависимость между факторами записывается в виде [3]:

$$(B_{cx} \cdot T_{cx}^{5/3})_{max} = \frac{k_{AC}^{5/3} \cdot Q \cdot n}{\theta(\sigma, \beta) \cdot \sqrt{I}} \quad (2)$$

Индексы  $B_{cx}, T_{cx}$  обозначают ширину и глубину судового хода,  $K_{ac}$  – коэффициент асимметричности поперечных сечений русел ( $K_{ac} \approx 0,8$ ).

Данный метод предполагает, что русло реки недеформируемое, а его ширина равна ширине судового хода. В современных условиях проектный расход составляет по гидропосту Вятские Поляны 376 м<sup>3</sup>/с. Максимально возможная глубина судового хода при его ширине 60 м составит, согласно расчету, 3,2 м, что является значительно большей по отношению к средней глубине, полученной по формуле (1). Данный метод дает завышенные результаты, поэтому глубины от 2,09 до 3,2 м лежат в диапазоне значений, на границах которого находятся экстремальные ГДГ.

Иной метод расчета максимально допустимых по гидравлическим условиям глубин предложен в Государственном университете морского и речного флота (г.Санкт-Петербург) [4]. Он основан на полученном К.В. Гришаниным так называемом инварианте

подобия – безразмерной глубине. Его значение по натурным данным рекомендовано  $M_{пред}=0,92$ , считается действительным для устойчивых прямолинейных участков всех равнинных рек при любых наполнениях, не выходящих за бровки русла, а средняя глубина плесовых лощин равнинных рек с песчаными наносами линейно связана по зависимости  $\frac{Q^{0.5}}{(gB)^{0.25}}$  и составляет 2,57 м.

Тогда средняя глубина на плесе составит:

$$T_{cp} = \frac{M}{M_{пред}} \cdot \frac{Q^{0.5}}{(gB)^{0.25}} = 2,095 м. \quad (3)$$

Метод Гришанина учитывает условия и особенности протекания речного потока после увеличения глубин, а также возможное повышение устойчивости русла после проведения дноуглубительных работ. Полученное значение гидравлически допустимой глубины сопоставимо со значением средней глубины на участке, рассчитанной по формуле Шези (формула (1)).

Еще один способ расчета максимально возможных глубин разработан в Университете Дружбы Народов под руководством Н.А. Ржаницына [5]. Этот метод основан на методике Х.М. Полина с учетом показателя руслового режима  $K_p$ .

Коэффициент  $K_p$  достаточно полно учитывает особенности гидравлического и руслового режима рек, поэтому он принят в качестве интегрального показателя руслового режима для сравнительной оценки морфометрических, морфологических и русловых характеристик рек разного типа руслового режима. Его значение определяется методом, предложенным Х.М. Полиным [6].

$$K_p = \frac{100 \cdot \left( 4 \frac{Q_{меж}}{Q'_{меж}} + \Delta H \right)}{Q'_{cp}} \quad (4)$$

Применительно к исследуемому участку р. Вятка были приняты следующие исходные данные для расчета:

- средненавигационный период по г/п Вятские Поляны продолжается с мая по октябрь;
- среднемеженный расход (сентябрь – октябрь) 450 м<sup>3</sup>/с;
- среднемесячный расход в период половодья (май) 3775 м<sup>3</sup>/с;
- отметки уровней  $H_{меж}$  и  $H_{пол}$  определялись непосредственно по кривой связи расходов и уровней воды.

Средняя интенсивность увеличения расходов воды в пределах уровней от  $H_{МЕЖ}$  до  $H_{ПОЛ}$  при  $\Delta H=4,71$  м составляет 3325 м<sup>3</sup>/с. Тогда показатель руслового режима  $K_p$  будет равен 1,4. По полученному значению  $K_p=1,4$  согласно [5] русло характеризуется, как менее устойчивое. Полученный результат лежит в интервале значений  $K_p=1,1-1,8$  и характерен для рек переходного типа руслового процесса (от свободного меандрирования к многорукавности), каким и является рассматриваемый участок реки Вятки.

Применительно к определению гидравлически допустимой глубины при разработке судоходных прорезей на перекатах совершенствование рассмотренной выше методики предложил Ф.М. Чернышов [4]. Как показал анализ, проведенный в лаборатории гидротехники новосибирского вуза, на перекате преобладает параболическая форма поперечного сечения русла.

Следует иметь в виду, что максимальная преобладающая глубина плесовых лощин не может полностью быть использована для судоходства. Поэтому ее максимальная величина  $T_{сх}^{max}$  будет меньше, чем максимальная глубина в плесе  $T_{max}$ , и степень этого уменьшения определяется формой русла плесовой лощины и шириной судоходной прорези. При этом предполагается, что выправительные работы в пределах плесовых лощин проводиться не будут. Отсюда,

$$T_{сх}^{max} = C \cdot T_{max}, \quad (5)$$

где  $C$  — коэффициент снижения максимальной глубины, равный 0,92 [3].

Х.М. Полиным [3], согласно натурным данным, достаточно точно описана связь  $K_p$  с максимальной глубиной в русле.

$$T_{max} = 0,44(K_p Q_{пр})^{1/3} \quad (6)$$

где  $Q_{пр}$  — проектный расход воды, отвечающий проектному уровню воды,  $м^3/с$ ;

По расчету для участка р. Вятка 46,8-102 км судового хода при проектных уровнях воды и, соответственно, расходах с учетом степени снижения максимальной глубины получено  $T_{сх}^{max} = 3,27$  м.

Что касается малых и средних по габаритам рек, таких как Вятка, то создание максимально возможных судоходных глубин связано со значительным понижением отметки гребня переката, на котором может потребоваться глубина, в 1,5÷2 раза больше естественной с созданием соответствующей ширины судоходной прорези. Это обусловит общую посадку уровня воды на плесе и на перекате. Поэтому при определении перспектив судоходного освоения рек необходимо в расчетную величину  $T_{сх}^{max}$  вносить поправку на снижение уровня  $\Delta h_{снж}$ , которая определяется, как:

$$\Delta h_{снж} = (\alpha_{прив} - \alpha) \cdot T_{прк}^{ест}, м \quad (7)$$

где  $\alpha = \frac{T_{пр}}{T_{прк}^{ест}}$  — проектная относительная глубина разработки переката, или степень судоходного освоения реки;

$\alpha_{прив} = \frac{T_{пр} + \Delta h_{снж}}{T_{прк}^{ест}}$  — приведенная относительная глубина разработки с учетом снижения уровня;

$\tilde{B} = \frac{B_{пр}}{B_{прк}}$  — относительная ширина разработки прорези;

$T_{прк}^{ест}$  — глубина на перекате до разработки прорези.

Таким образом, с учетом расчетного снижения  $\Delta h_{снж}$ , равного 0,2 м, значение максимальных глубин составит  $T_{сх}^{max} = 3,07$  м.

Рассмотренная методика учитывает гидрологию участка за многолетний период без учета маловодных лет, а также степени разработанности русла. Последнее обстоятельство указывает на возможность достижения расчетного параметра глубины 3,07 м лишь после длительного периода разработки русла с постепенным наращиванием судоходной глубины на участке.

Таким образом, полученные расчетом предельно максимальные судоходные глубины показали различные результаты, их значения варьируются от 2,1 м до 3,07 м. Такой значительный разброс в результатах объясняется различными подходами в методах и начальных исходных данных.

Выдерживание гидравлически допустимой глубины при создании судового хода с потерянными ранее гарантированными габаритами является сложной поэтапной задачей. Если проектный уровень в течение многих лет оставался неизменным, то это может позволить достичь роста глубин. Однако, при одномоментном значительном увеличении гарантированной глубины проявится локальное понижение уровня воды на отдельных перекатах участка с распространением вверх по течению практически на пять длин судоходных прорезей. Тогда для нормализации соотношения «глубина-проектный уровень с нормируемой обеспеченностью», появится необходимость понижения проектного уровня. В итоге, понижение отметки дна позволит увеличить транзитную глубину лишь в части от заявленной. Кроме того, в маловодные годы выдерживание достигнутой глубины будет проблематично. Минимальная из расчетных гидравлически допустимых глубин (2,1 м) учитывает маловодность лет, в то время как значение 3,07 м может быть достигнуто для осредненных по водности лет последовательным углублением

русла в течение длительного порядка 10 лет периода (исходя из практики дноуглубления судоходных рек).

С учетом этого может быть рекомендовано поэтапное углубление судового хода на р.Вятка с постепенным нарастанием глубины. Без значительных последствий, с восстановлением уровня после дноуглубительных работ, можно достичь лишь глубину 2,1 м, а на будущее, после «привыкания» русла к достигнутой глубине (с постепенным проведением работ в течение нескольких лет), на реке можно будет незначительно увеличить габариты. В любом случае задача о целесообразности достижения максимально возможной глубины решается путем экономической оценки мероприятий по производству путевых работ на участке и технических возможностей хозяйствующих подразделений Администрации бассейна.

#### **Список литературы:**

1. Гришанин К.В. Водные пути.// Учебник для ВУЗов/ К.В. Гришанин, В.В. Дегтярев, В.М. Селезнев – М.: Транспорт, 1986. – 400 с.
2. Карта реки Вятка от города Киров до устья, изд. 1993 г. (с корректурой на 22.02.2022 г.).
3. Чернышов Ф.М. Пути повышения эффективности дноуглубительных и выправительных работ на судоходных реках.// Труды гидротехники, вып. XXVIII./ Ф.М. Чернышов – Новосибирск, 1968. – С. 122–142.
4. Руководство по улучшению судоходных условий на свободных реках.// С. Петербург, 1992. – 312 с.
5. Руководство по методам расчета планирования и оценки эффективности путевых работ на свободных реках.// М.: Транспорт, 1978. – 104 с.
6. Маккавеев Н.И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. / Н.И. Маккавеев. – М.: Речиздат, 1949 г. – 202 с.

### **INVESTIGATION OF CHANGES IN HYDRAULIC CONDITIONS ON THE LOWER VYATKA DURING DREDGING OPERATIONS**

Aleksandr N. Sitnov, Yulia E. Voronina, Marina V. Shestova

*Abstract.* On the section of the Vyatka River from the Vyatka Polyana hydrological post to its mouth, there are eight sections difficult for navigation, where the rifts will limit navigation when cruise ships resume movement. The assessment of the reserve for the growth of navigable depths, as well as the change in hydraulic conditions in the riverbed after a significant amount of dredging work is carried out depends on the characteristics of the river level regime, the presence of backup from the downstream Kuibyshev reservoir, as well as the length of the river section in a free state. The limitation of the depth growth on unsupported sections of rivers is associated with a possible decrease in the water level as a result of dredging of the channel, and the channel's ability to maintain the specified dimensions of the path is determined by the values of the hydraulically permissible depth.

*Keywords:* ship's course, dredging, guaranteed dimensions, hydraulically permissible depth, level security, design water level.

