

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАЛОМОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКИХ ПАВОДКОВ

А.П. Лепихин<sup>1, 2, 3</sup>, А.А. Возняк<sup>1, 2, 3</sup>

E-mail: lepihin49@mail.ru

<sup>1</sup> ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь, Россия

**АННОТАЦИЯ:** Рассмотрены механизмы образования мостовых заломов при прохождении высоких паводков, способных значительно повысить уровень воды в предмостовой зоне. Проведен анализ зарубежных исследований, поскольку в отечественной литературе нет отработанных схем численной оценки влияния заломов мостов на повышение уровня воды проходящих паводков. Показано, что для образования заломов наибольшую опасность представляет наличие в потоке крупной карчи – поваленных деревьев с развитой кроной и корневой системой. Линейные объекты – плывущие бревна –ных размерах, представляют из-за особенностей гидродинамики русловых потоков значительно меньшую опасность. Доказательства проверены теоретически на основе общепринятых уравнений гидравлики.

Предложены соотношения для оценки возможного повышения уровня воды при образовании мостовых заломов. Даны рекомендации по снижению рисков образования мостовых заломов и их негативных последствий. Показано, что данная задача не только гидрологическая, техническая, но, в первую очередь, экономическая.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** наводнения, заломы мостов, карчеход, гидравлические оценки повышения уровня воды, снижение рисков образования мостовых заломов.

Как показывает анализ прохождения экстремально высоких паводков, которые имели катастрофические последствия для населенных территорий, генезис их формирования обуславливается не только комплексом гидрометеорологических факторов, но и резким снижением пропускной способности мостовых переходов вследствие закупоривания их пролетов древесиной и другим плавающим мусором. Данное явление, получившее название залама моста (рис. 1), сыграло существенную роль при формировании катастрофических уровней затопления как в г. Крымске, так и в г. Тулуне [1–3].

© Лепихин А.П., Возняк А.А., 2020

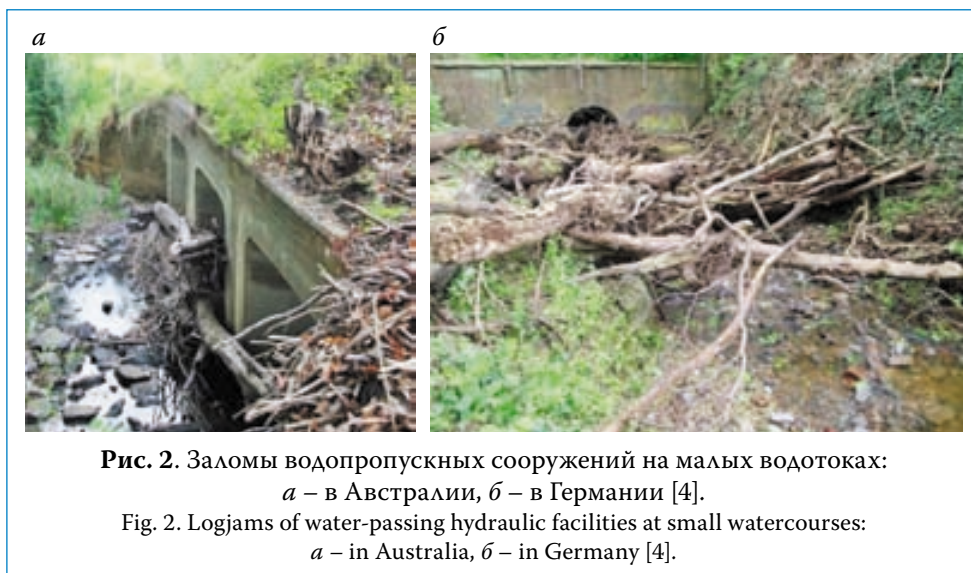


**Рис. 1.** Характерный вид заломов моста [2].  
**Fig. 1.** Characteristic view of the bridge logjams [2].

Особую опасность заломы представляют для малых водотоков, на которых расположены относительно небольшие водопропускные сооружения, причем не только на территории РФ, но и во всем мире (рис. 2) [4]. К сожалению, в настоящее время нет отработанных схем численной оценки влияния заломов мостов на повышение уровня воды проходящих паводков.

Прибрежная затапливаемая полоса практически любой реки, расположенной в лесной зоне, характеризуется наличием древесных остатков, поваленных и засохших деревьев, способных попадать в реку при подъеме уровня воды. В отечественной литературе для обозначения этих древесных остатков используется термин «карча», их перенос потоками воды в реках обозначается как карчеход. За рубежом также принято устойчивое обозначение для этих древесных остатков – large woody debris (LWD) – крупные древесные обломки. Проведены серьезные исследования по анализу состава, размерам, особенностям транспортировки крупных древесных обломков, рассмотрены особенности их скопления на отдельных участках водотоков, поведения при прохождении паводков. Сделан вывод о том, что они не только могут создавать угрозу мостам и другим гидротехническим сооружениям, расположенным ниже по течению реки, но и играют важную роль в формировании экологической устойчивости прибрежных территорий [5].

Детальный анализ попадания деревьев в водный поток и их транспортировки в зависимости от начальной ориентации, размеров, плотности на основе 46 натуральных экспериментов представлен в [6]. В отечественной литературе заломы мостов, образование в реках заторов, завалов проносимыми водными потоками деревьями и другим крупногабаритным мусором также давно является предметом изучения [7–9]. Однако традиционно за-



**Рис. 2.** Заломы водопропускных сооружений на малых водотоках:

*а* – в Австралии, *б* – в Германии [4].

Fig. 2. Logjams of water-passing hydraulic facilities at small watercourses:

*a* – in Australia, *b* – in Germany [4].

ломы мостов исследовались с позиции их устойчивости при прохождении высоких паводков [7–9], а карчеход, являющийся определяющим фактором формирования заломов, – с позиций влияния на формирование русловых процессов [9–11]. Вопросы оценки экономического ущерба, обусловленного заломами мостов на Сахалине, рассмотрены в [12].

### МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На территории практически любого расположенного вблизи реки крупного населенного пункта есть мосты, являющиеся важнейшими компонентами транспортной инфраструктуры. Рассмотрим условия формирования мостовых заломов с позиции речной гидравлики. Для этого введем обозначения: пусть мосты характеризуются линейными размерами пролетов  $L_{\text{мос}}$ , высотой расположения проезжего полотна над дном водотока  $H$  и длиной моста (шириной реки)  $B$ . При формировании и прохождении паводка на лесном водосборе в водоток могут попадать карчи с характерной плотностью распределения размеров их длины  $P_A(K)$ . Задерживаясь в мостовых пролетах вместе с другим транспортируемым мусором, они могут резко снижать пропускную способность мостовых пролетов. При этом возникает своеобразная поровая структура, способная при достаточной «мощности» оказывать значительное сопротивление потоку.

В общем случае данная задача в достаточно строгой постановке может быть решена на основе системы уравнения Сен-Венана в 1D и 2D постановке при заданном сценарии прохождения паводка и морфометрии водного объекта, позволяющего надежно оценить гидродинамические характери-

стики потока [13]. Однако данный подход весьма громоздкий и требует значительных затрат трудовых ресурсов. В ряде случаев можно получить вполне приемлемое оценочное соотношение в значительно более простой квазистационарной постановке задачи.

Учитывая существенную неопределенность в оценке исходных параметров, определяющих интенсивность карчехода, а также в размерах отдельных переносимых объектов для модельных оценочных расчетов высоту залома моста условлено принимать равной высоте моста, а протяженность залома – длине моста (ширине реки).

Принимая в первом начальном приближении поток установившимся, можно получить определенные оценки масштаба данного процесса. При наличии залома одна часть потока будет проходить через залом, вторая – над заломом. При этом суммарно эти два потока должны быть равны расходу воды перед заломом.

Введем следующие характеристики водотока и залома:  $Q$  – расход водотока;  $h$  – характерная глубина водотока (до образования залома) при прохождении рассматриваемого расхода воды;  $V$  – средняя скорость течения в водотоке без залома;  $H_{зал}$  – высота залома;  $L_{зал}$  – мощность, толщина залома;  $m$  – характерная «пористость» залома,  $0 \leq m \leq 1$ ;  $d$  – характерный размер «пор» в формируемом заломе. Так как размеры «пор» в заламах определяются, в первую очередь, характерным диаметром транспортируемой карчи, как правило, существенно больше 0,1 м (при этом число Рейнольдса в данных условиях  $Re_{пор} = \frac{d \cdot V_{пор}}{\nu} \geq 2500$ , поток воды через залом проходит в режиме турбулентной фильтрации. В этом случае для описания скорости течения в режиме турбулентной фильтрации  $V_{ф.т.}$  предлагается следующее соотношение [14, 15]:

$$V_{ф.т.} \approx C_{\phi} m (i_{\phi} \cdot d)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $C_{\phi} \approx 20,4 \cdot (m^{2/3}/(1 - m))$  – коэффициент турбулентной фильтрации;  $i_{\phi} = \frac{\Delta Z}{L_{зал}}$  – уклон в режиме турбулентной фильтрации;  $\Delta Z$  – перепад уровня воды выше и ниже залома.

Протяженность залома  $L_{зал}$  в общем случае определяется насыщенностью потока карчами и продолжительностью активной фазы проходящего паводка. В первом оценочном приближении может приниматься  $L_{зал} \approx B_{мос}$ , где  $B_{мос}$  – ширина моста. Размеры в формуле (1) даны в см, а скорости, соответственно, в см/с.

Рассмотрим абсолютное  $\Delta Z$ , а также относительное  $\overline{\Delta Z}$  повышение уровня в водотоке, призванное компенсировать снижение пропускной способности. При этом

$$\Delta Z = Z_{зал} - Z_0, \quad (2)$$

$$\overline{\Delta Z} = \frac{Z_{\text{зал}} - Z_0}{Z_0}, \quad (3)$$

где  $Z_{\text{зал}}$  и  $Z_0$  – уровень воды в водотоке, соответственно, при заломе и при его отсутствии.

Введем коэффициент снижения пропускной способности водотока при образовании заломы на фиксированной глубине

$$\varepsilon \approx \frac{h_{\text{зал}}}{h} \left( 1 - \frac{v_{\text{фг}}}{v} \right), \quad (4)$$

где  $h_{\text{зал}}$  – высота заломы над дном водотока;  $h$  – характерная глубина водотока при прохождении рассматриваемого расхода воды без заломы.

Из-за значительной неопределенности оценки исходных данных, связанной как с формированием экстремально высоких паводков, так и состоянием прибрежной затопляемой при прохождении паводка полосы, первая задача может решаться только в сценарной постановке. При этом наибольший интерес представляет возможное повышение уровня, когда высота заломы сопоставима с высотой мостового перехода. В этом случае задача значительно упрощается.

Расход воды, проходящий через залом, составит:

$$Q_{\text{зал}} = h \cdot V_{\text{ф.т.}} \cdot B, \quad (5)$$

при этом сам залом можно рассматривать как водослив с широким порогом, т. е.

$$Q_{\text{слив}} = K_{\text{вод}} \cdot \Delta^{3/2} \cdot B \cdot \sqrt{2g}, \quad (6)$$

где  $K_{\text{вод}}$  – коэффициент водослива.

Как отмечалось выше,

$$Q_{\text{зал}} + Q_{\text{слив}} = Q, \quad (7)$$

где  $Q = V \cdot h \cdot B$ .

Деля правую и левую часть уравнения (7) на  $Q$  и учитывая (1), (2) и (8), имеем

$$P_1 \cdot \Delta Z^{1/2} + P_2 \cdot \Delta Z^{3/2} = 1, \quad (9)$$

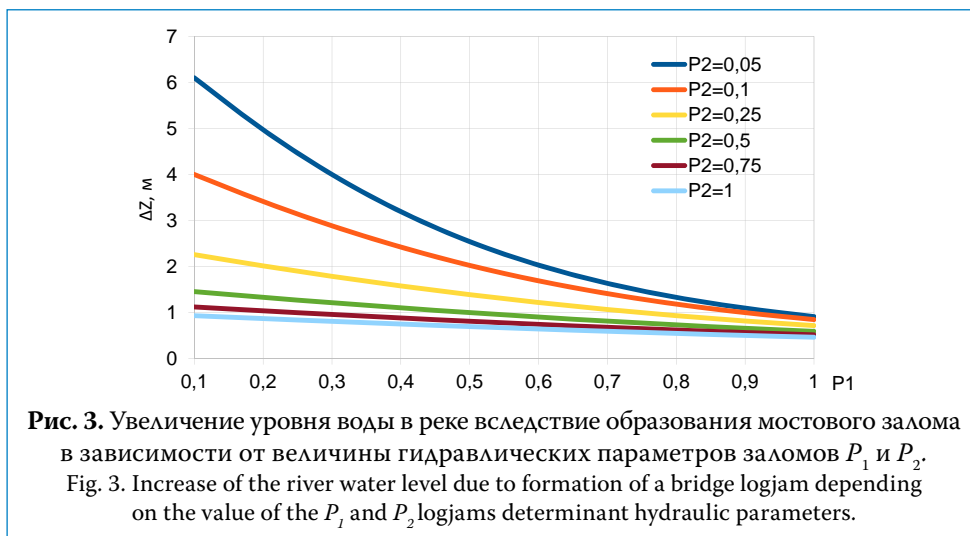
где  $P_1$  и  $P_2$  – гидравлические параметры заломы. При этом

$$P_1 = 0,01 \cdot (20,4 \cdot \frac{m^{2/3}}{1-m} \cdot \sqrt{d}) / (V \cdot \sqrt{L_{\text{зал}}}), \quad (10)$$

а в первом приближении удобно принимать  $L_{\text{зал}} \approx B$ ,

$$P_2 = \frac{K_{\text{вод}} \cdot \sqrt{2g}}{v \cdot h}. \quad (11)$$

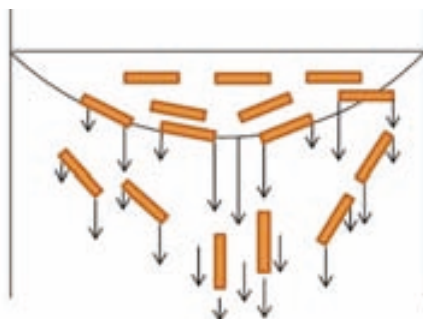
К сожалению, данное уравнение не имеет аналитических решений в радикалах, однако оно достаточно легко решается численно. Результаты численного решения представлены на рис. 3.



Оценивая на основе соотношения (10) и (11) параметры  $P_1$  и  $P_2$  для конкретного залома, используя рис. 3, несложно оценить возможное повышение уровня воды.

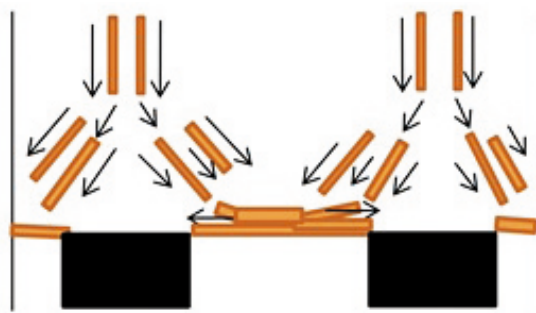
Рассмотрим сам механизм образования залома. В начальный период принципиально важно формирование ядер. Если транспортируемые объекты представлены только плывущими бревнами, то они характеризуются одним критическим размером  $l$  и в этом случае для образования ядра необходимо, чтобы их линейные размеры были больше минимальной ширины мостового пролета  $L_{мос}$ . Для оценки вероятности образования залома принципиально важен не только размер плавающих деревьев, но и их ориентация в потоке. Для образования залома необходимо, чтобы плавающие бревна были ориентированы по длине перпендикулярно к течению потока. Однако такая начальная ориентация может сохраняться на достаточно протяженных участках только относительно нешироких рек, для которых  $B \leq l$ . В крупных водотоках, вследствие неравномерности распределения скорости потока по ширине, линейные объекты (деревья, бревна) вынуждены перестраиваться по потоку (рис. 4).

При подходе к мосту, вследствие обтекания потоком мостовых опор, происходит определенный разворот деревьев поперек потока (рис. 5), что увеличивает вероятность образования залома. Однако, для того чтобы этот эффект сработал, необходимо чтобы мостовые опоры были очень широкие, сопоставимые с шириной самих пролетов и с максимальной длиной бревен. Выполнение данных условий весьма проблематично, поэтому на крупных водотоках весьма маловероятно, чтобы линейные объекты (бревна) могли формировать первичные ядра залома.



**Рис. 4.** Трансформация ориентации плавающих бревен вдоль потока вследствие неоднородности поля скоростей по ширине реки.

Fig. 4 Transformation of orientation of the logs floating along the flow due to the speed field heterogeneities across the river.



**Рис. 5.** Трансформация поля скоростей и ориентация плавущих бревен вблизи широких мостовых опор.

Fig. 5. Transformation of speed fields and the floating logs orientation near wide bridge piers.

Однако находящиеся на затопляемых прибрежных полосах крупные древесные обломки, как правило, представлены не только линейными, но и геометрически более сложными трехмерными объектами, представляемыми, в первую очередь, поваленными деревьями с развитой кроной и корневой системой (карчей). Если их характерные максимальные размеры составляют  $R$  (радиус кроны), то для образования первичного ядра залома вполне достаточно, чтобы выполнялись условия

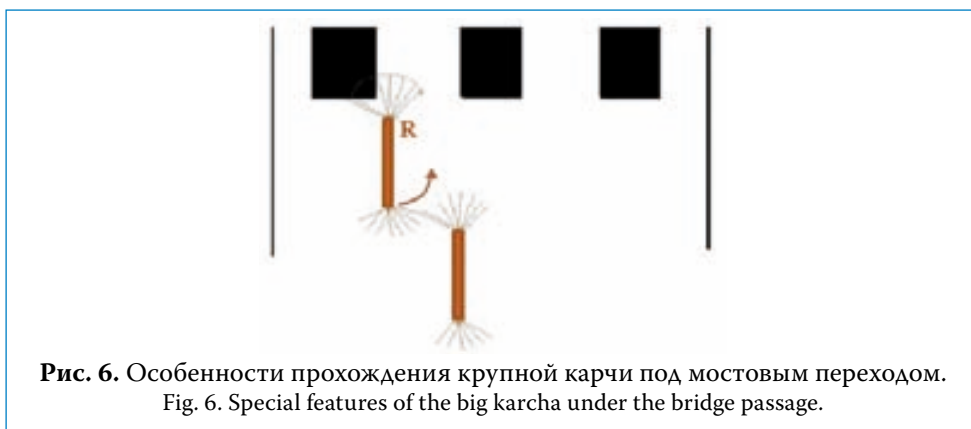
$$R/2 > Z_0 \text{ или } R/2 > Z_B - Z_0, \quad (12)$$

где  $Z_B$  – расстояние от дна потока до мостового перекрытия.

В первом случае транспортируемый объект будет тормозиться за счет взаимодействия с дном потока, во втором – с мостовым перекрытием.

Прохождение деревьев с развитой кроной и корневой системой – карчей – принципиально отличается от прохождения линейных объектов. При упо-

ре ветками или корнями в мостовые опоры происходит разворот дерева перпендикулярно к потоку вследствие гидравлического напора (рис. 6). Существенная трехмерность, значительные размеры кроны и корневой системы делают возможным и достаточно устойчивым их взаимодействие с параллельно плывущими подобными объектами, а также с опорами и мостовым полотном. При выполнении неравенства (12), если при этом наблюдается достаточно высокая упругость и механическая прочность ветвей и корней, в условиях значительных динамических воздействий, т. е. при  $F \sim \rho \cdot S_{\text{фр}} \cdot V^2$  (где  $\rho$  – плотность воды;  $S_{\text{фр}}$  – суммарная поверхность плывущего дерева, фрактальная к потоку воды;  $V$  – скорость потока), возникают достаточно устойчивые ядра заломов.



**Рис. 6.** Особенности прохождения крупной карчи под мостовым переходом.  
Fig. 6. Special features of the big karcha under the bridge passage.

Оценим вероятность образования первичных мостовых заломов при наличии только линейных объектов  $P_{1l}$ :

$$P_{1l} = \int_L^{\infty} P_{\Delta}(l) \cdot P_0(l) \cdot dl, \quad (13)$$

где  $P_{\Delta}(l)$  – плотность распределения размеров деревьев с размером  $l$ ;  $P_0(l)$  – вероятность ориентации линейного объекта перпендикулярно скорости потока.

При прохождении существенно трехмерных объектов ситуация принципиально меняется. Их ориентация в потоке перестает играть принципиальную роль в формировании ядер, поэтому вероятность образования первичных мостовых заломов при наличии данных объектов  $P_{2l}$  определится как

$$P_{2l} = \int_{R_{\text{кр}}}^{\infty} P_{\Delta}(R) \cdot dR, \quad (14)$$

где  $P_{\Delta}(R)$  – плотность распределения размеров кроны и корневой системы  $R$ .



При подъеме паводка уровень воды в центре потока несколько выше, чем у берегов [16], и возникающая на этом фоне поперечная циркуляция отводит плавающий мусор к береговым зонам. Вследствие подъема уровня деревья не остаются на берегах, а имеют неравномерное распределение  $v_N$  по ширине потока. Первыми начинают забиваться ближайшие к берегам проемы моста, а затем и центральные мостовые проемы.

После формирования первичных ядер рост залома будет определяться следующими параметрами:  $\omega - \frac{1}{\text{сек}}$  – частотой наблюдения в реке при прохождении паводка плавающих древесных остатков и их относительным объемом  $W_{\text{отн}}$ :

$$W_{\text{отн}} = \frac{W_{\text{кр}}}{W_{\text{мс}}}, \quad (15)$$

где  $W_{\text{кр}}$  – объем карчи среднего размера с учетом пористости, м<sup>3</sup>;  $W_{\text{мс}}$  – объем подмостового пространства, м<sup>3</sup>.

При равномерном их распределении по ширине реки для одного мостового пролета будем иметь  $\omega_N = \frac{\omega}{N}$ , где  $N$  – количество мостовых пролетов.

При образовании первичного залома значительно увеличивается вероятность захвата им плавающих древесных обломков, в то же время рост залома приводит к росту воздействия на него динамических нагрузок, и, соответственно, к замедлению роста коэффициента  $\varepsilon$ .

Исходя из этих положений, в первом приближении получим:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = W_{\text{отн}} \cdot \omega_N \cdot \varepsilon \cdot (1 - \varepsilon). \quad (16)$$

Решение уравнения (16) имеет следующий вид

$$\varepsilon(T) = \frac{\exp(T) - 1}{1 + \exp(T)}, \quad (17)$$

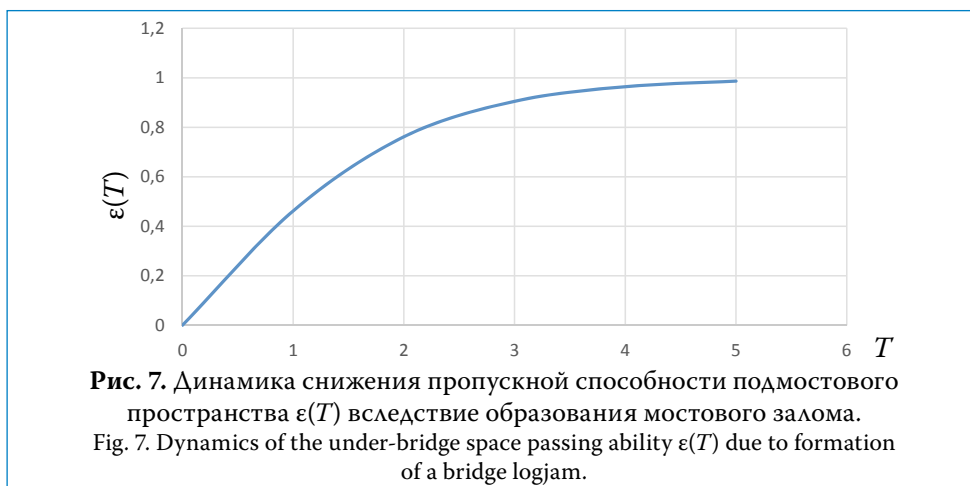
где  $T = W_{\text{отн}} \cdot \omega_N \cdot t$  – безразмерное время.

Графически данная зависимость представлена на рис. 7.

Данные оценки показывают, что традиционные подходы к анализу уровней паводков, без учета заломов мостов, не эффективны и дают парадоксальные результаты в части оценки повторяемости экстремальных уровней паводков, т. к. базисным положением, определяющим применение статистических методов в решении гидрологических задач, является условие стационарности рассматриваемых процессов, которое подразумевает устойчивость, стабильность гидрологических факторов на водосборах. При этом чем выше расчетная обеспеченность, тем более жесткие требования должны предъявляться к условиям стационарности.

Принимая во внимание современные тенденции изменения климата, в условиях активного хозяйственного освоения территорий только в лучшем случае можно рассматривать стационарность метеорологических

факторов, но никак не уреченный режим водотоков. Поэтому при существенной трансформации не только прибрежных полос, но и самого русла, изменения его пропускной способности, анализ вероятностей повторяемости определенных уровней воды совершенно не корректен. В связи с этим представляется весьма актуальной постановка и проведение специальных исследований по вопросам формирования заломов и их влияния на повышение уровня воды при экстремальных паводках. Данные исследования должны включать как комплекс экспериментальных исследований, так и теоретический анализ с целью выработки рекомендаций предотвращения с минимальными затратами образования таких, крайне опасных, явлений.



Необходимо отчетливо различать следующие, хотя и тесно связанные между собой, но различные задачи:

- прогнозирование, оценка возможного повышения уровня воды при прохождении волны паводков вследствие образования заломов;
- разработка и реализация наиболее эффективного, оптимального комплекса мероприятий по минимизации образования заломов.

Определяющие параметры при оценке повышения уровня воды вследствие образования заломов можно разделить на три группы:

- линейные размеры мостовых пролетов;
- максимальные расходы паводков;
- характеристики поступающих в водоток древесных остатков.

Если с заданием параметров первой группы нет проблем, то ситуация с оценкой экстремальных расходов паводков значительно более сложная. Однако имеется большое количество методик, зачастую взаимно противоречивых, по оценке их характеристик [17, 18] и др. Наибольшая неопределенность связана с параметризацией третьей группы факторов, связанных с состояни-

ем прибрежной полосы. В связи с этим возникает вопрос: какой характерный размер переносимого древесного мусора в наибольшей степени способствует повышению уровня воды при прохождении экстремальных паводков?

Как показано выше, для формирования залома критически важно формирование первичных ядер, условия образования которых определяются соотношениями (12), (13) и (14). Увеличение линейных размеров плавающий древесины, или параметра  $R$  для поваленных деревьев с развитой кроной и корневой системой, приводит к увеличению вероятности образования заломов, его интенсивному росту. В то же время, чем меньше размеры переносимого мусора, тем плотней может быть их «упаковка» при образовании залома, тем меньше его пористость, тем меньше его пропускная способность при прочих равных условиях. Поэтому наибольшую опасность образования залома и связанного с ним повышения уровня воды при прохождении экстремально высоких паводков представляет высокая дисперсность, неоднородность переносимого древесного мусора. Чем больше значения параметра  $R$ , чем больше отношение  $\frac{\sigma}{l}$  для линейных объектов (где  $l$  – характерные линейные размеры отдельных экземпляров плавающей древесины,  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение размеров линейных объектов), тем выше вероятность дополнительного критического повышения уровня воды при прохождении высоких паводков.

В теории фильтрации подчеркивается, что увеличение дисперсности частиц, слагающих несвязанный грунт, приводит к резкому снижению значений их коэффициентов фильтрации [19].

Задавая характерные линейные размеры плавающей древесины, можно в первом приближении оценить скорость турбулентной фильтрации  $V_{тф}$ , а затем и возможное повышение уровня воды вследствие формирования мостовых заломов. Если данные превышения оказываются неприемлемо высокими, необходимо проведение комплекса мероприятий по минимизации рисков образования заломов. При этом мероприятия могут быть как пассивные, направленные на обустройство ловушек для плавающего древесного мусора, так и активные, направленные на очистку затопляемой прибрежной полосы от крупных деревьев и на недопустимость образования эффекта домино, когда затопление и разрушение вышерасположенных жилых и хозяйственных построек формируют материал для образования заломов на расположенных ниже мостах.

Вопросы защиты мостов от карчехода путем создания специальных ловушек рассмотрены в [7, 8]. В этих работах, как уже отмечалось, рассматривается борьба с карчеходом не как с фактором формирования мостовых заломов, а как защита деревянных мостов от разрушения вследствие динамического воздействия карчи. С переходом на значительно более прочные

бетонные конструкции мостов эта проблема трансформировалась в формирование заломов и существенное дополнительное повышение уровня воды при прохождении экстремально высоких паводков.

Защита территории от наводнения и в целом от негативного влияния вод – задача не только гидрологическая или техническая, но, в первую очередь, экономическая. Поэтому в каждом случае необходимо рассматривать комплекс мероприятий по минимизации рисков, связанных с образованием заломов. Диапазон мероприятий может быть очень широкий: от зачистки прибрежных полос до инженерно-технической подготовки территории, в первую очередь, в пределах населенных пунктов с повышенным уровнем затопления. В то же время необходимо понимать, что риски повышения уровней затопления прямо пропорциональны захламленности прибрежной полосы, наличию на ней поваленных или слабо устойчивых деревьев с развитой кроной и корневой системой, и обратно пропорциональны размерам мостовых проемов и расстоянию от водной поверхности до мостового перекрытия при прохождении экстремально высоких паводков. Профилактические мероприятия, направленные на очистку прибрежной полосы от мусора и карчи, рассматриваются как наиболее эффективные в обеспечении нормативного функционирования водопропускных устройств [4]. Необходимо также учитывать, что мостовые заломы, повышая уровень воды в предмостовом пространстве, оказывают значительную динамическую нагрузку на всю мостовую конструкцию. Поэтому при образовании заломов возникает вопрос устойчивости мостов – важнейших элементов транспортной сети.

### **ВЫВОДЫ**

В рамках данной работы рассмотрены механизмы образования мостовых заломов при прохождении высоких паводков. Показано, что с позиции образования заломов наибольшую опасность представляет крупная карча – поваленные деревья с кроной и корневой системой. Линейные объекты – плывающие бревна, даже при их значительных размерах, из-за особенностей гидродинамики русловых потоков представляют значительно меньшую опасность.

Предложены соотношения для оценки возможного повышения уровня воды при образовании мостовых заломов: т. к. они не имеют аналитических решений, результаты численных расчетов представлены в виде соответствующих расчетных графиков. Сформулированы рекомендации по снижению как рисков образования мостовых заломов, так и их негативных последствий. Показано, что данная задача не только гидрологическая, техническая, но, в первую очередь, экономическая. Поэтому в каждом случае необходимо рассматривать комплекс мероприятий по минимизации рисков, связанных с образованием заломов. Диапазон мероприятий мо-

жет быть очень широкий: от зачистки прибрежных полос до инженерно-технической подготовки территории, в первую очередь, в пределах населенных пунктов с повышенным уровнем затопления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Титов Е.* Что стало причиной Крымского наводнения, и кто несет ответственность за смерть более 170 человек // Новая газета. № 16 от 11 июля 2012 г.
2. *Днестрянский И.Н., Лобановский Ю.И.* Наводнение в Крымске: причины и механизмы затопления города // Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/266457152\\_Navodnenie\\_v\\_Krymske\\_priciny\\_i\\_mehanizmu\\_zatoplenia\\_goroda](https://www.researchgate.net/publication/266457152_Navodnenie_v_Krymske_priciny_i_mehanizmu_zatoplenia_goroda) (дата обращения: 24.02.2020).
3. *Шаликовский А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А., Курганович К.А., Морозов М.Г.* Наводнения в Иркутской области 2019 года // Водное хозяйство России. 2019. № 6. С. 48–64. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-6-4.
4. *Chanson H., Leng X.* There is Something Fishy about Turbulence – Why Novel Hydraulic Engineering Guidelines can assist the Upstream Passage of Small-Bodied Fish Species in Standard Box Culverts // Civil Engineering Research Bulletin. 2019. No. 26, School of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia, 224 p.
5. *Richardson J.J., Moskal M.L.* An Integrated Approach for Monitoring Contemporary and Recrutable Large Woody Debris // Remote Sens. 2016. No. 8 (778). DOI: 10.3390/rs8090778.
6. *Chen S.C., Tfwala S.S., Wang, Kuo Y.M., Chao Y.C.* Incipient motion of large wood in river channels considering log density and orientation // Journal of Hydraulic Research. 2019. Vol. 57. No. 6. P. 1–14.
7. *Труфанов А.А.* Теория расчета давления бревенного залома на запани. М. Гослестехиздат, 1933. 55 с.
8. *Лебедев Н.И.* Водный транспорт леса. М.: Гослестехиздат, 1939. 368 с.
9. *Домогашев В.Н.* Разработка метода проектирования мостовых переходов в условиях карчехода: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск, 1984. 182 с.
10. *Догомашев В.Н., Сергунов В.Е.* Карчеход и русловой процесс // Геоморфология. 1987. № 2. С. 54–56.
11. *Таукенов Т.Р., Ержанова Ж.С.* Формирование заломов на реках бассейна Буктырмы и их геоморфометрические функции // Гидрометеорология и экология. 2018. № 2. С. 118–128.
12. *Мурашева А.А., Вдовенко А.В., Басова И.А., Столяров В.М.* Экологический ущерб и природоохранные мероприятия на мостовых переходах острова Сахалин // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2018. Вып. 1. С. 316–326.
13. *Лепихин А.П., Любимова Т. П., Паршакова Я.Н., Тиунов А. А., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С.* Гидродинамическое моделирование реки Вятки в среднем течении: постановка задачи, результаты расчетов // Водное хозяйство России. 2013. № 3. С. 16–32.
14. *Избаш С.В.* О фильтрации в крупнозернистых материалах // Известия НИИГ. 1931. Т. 1. С. 120–122.
15. Руководство по расчету фильтрации в каменно-набросных гидросооружениях. Л.: Энергия, 1975.

16. Аполлов Б.С. Учение о реках. М.: Изд-во МГУ, 1952. 521 с.
17. НИМП-72 Наставление по изысканию и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов. М.: Транспорт, 1972.
18. Пособие к СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы». По изысканию и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки ПМП-92.
19. Kango R., Shankar V., and Alam M.A. Evaluation of hydraulic conductivity based on grain size distribution parameters using power function model // Water Supply. 2019. Vol. 19. No. 2. P. 596–602.

*Для цитирования:* Лепихин А.П., Возняк А.А. Гидравлические аспекты образования заломов при прохождении экстремально высоких паводков // Водное хозяйство России. 2020. № 5. С. 24–39.

**Сведения об авторах:**

**Лепихин Анатолий Павлович**, д-р геогр. наук, профессор, директор Камского филиала, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; заведующий лабораторией проблем гидрологии суши, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; профессор, кафедра гидрологии и охраны водных ресурсов, ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ), Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: lepin49@mail.ru

**Возняк Анна Анатольевна**, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; старший научный сотрудник, лаборатория проблем гидрологии суши, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; доцент, кафедра гидрологии и охраны водных ресурсов, ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ), Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: aavoznyak@gmail.com

---

**HYDRAULIC ASPECTS OF LOGJAM FORMATION DURING EXTREME HIGH FLOODS**

**Andrey P. Lepikhin<sup>1,2,3</sup>, Anna A. Wozniak<sup>1,2,3</sup>**

<sup>1</sup>Perm State National Research University, Perm, Russia

<sup>2</sup>Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

<sup>3</sup>Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Kama Branch, Perm, Russia

**Abstract:** The article discusses the mechanisms of formation of congestion of trees in front of the bridge during high floods that can significantly increase the water level in the pre-bridge zone. The analysis of foreign studies is carried out, since in the domestic literature there are no proven schemes for numerically assessing the effect of congestion of trees in front of the bridge on increasing the level of water in passing floods. It is shown that for the formation of congestion of trees, the greatest danger is the presence in the stream of Large woody debris – trees with a developed crown and root system. Linear objects – floating logs, even with their considerable size, pose significantly less danger due to the features of the hydrodynamics of channel flows. The proofs are carried out theoretically based on the generally accepted equations of hydraulics.

Relationships are proposed for assessing a possible increase in water level during the formation of congestion of trees in front of the bridge. The results of numerical calculations are presented in the form of corresponding calculation graphs, since the developed relations do not have analytical solutions.

Recommendations are given on reducing both the risks of formation of congestion of trees in front of the bridge and their negative consequences. It is shown that this task is not only hydrological, technical, but also, first, economic. Therefore, in each case, it is necessary to consider specially a set of measures to minimize the risks associated with the formation of congestion of trees in front of the bridge. The range of measures can be very wide: from stripping of coastal strips to the engineering and technical preparation of the territory, primarily within the boundaries of settlements, to the passage of floods with an increased level of flooding.

**Key words:** floods, congestion of trees in front of the bridge, large woody debris, hydraulic estimates of level increase, reduction of risks of the logjam in front of the bridge.

#### About the authors:

Anatoly P. Lepikhin, Doctor of Geographic Sciences, Professor, Director, Kama Branch, Russian Research Institute for the Integrated Water Management and Protection (RosNII VH), ul. Nikolai Ostrovsky, 113, Perm 614002 Russia; e-mail: lepin49@mail.ru

Anna A. Wozniak, Candidate of Geographic Sciences, Leading Researcher, Russian Research Institute for the Integrated Water Management and Protection (RosNII VH), ul. Nikolai Ostrovsky, 113, Perm 614002 Russia; e-mail: aavoznyak@gmail.com

**For citation:** *Lepikhin A.P., Wozniak A.A. Hydraulic Aspects of Logjam Formation during Extreme High Floods // Water Sector of Russia. 2020. No. 5. P. 24–39.*

#### REFERENCES

1. *Titov E.* Chto stali prichinoy Krymskogo navodneniya i kto neset otvstvennost za smert bolly 70 chelovek [What was the cause of the Krymsk flood and who is responsible for death of 170 people] // *Novaya gazeta*, No. 16 ot 11 yulya 2012 g.
2. *Dnestryanskiy I.N., Lobanovskiy Y.I.* Navodneniye v Krymske: prichiny i mekhanizmy zatopleniya goroda [Flood in Krymsk: city flooding causes and mechanisms] // *Rezhim dostupa: [https://www.researchgate.net/publication/266457152\\_Navodnenie\\_v\\_Krymske\\_priciny\\_i\\_mekhanizmy\\_zatopleniya\\_goroda](https://www.researchgate.net/publication/266457152_Navodnenie_v_Krymske_priciny_i_mekhanizmy_zatopleniya_goroda)* (data obrashcheniya: 24.02.2020).
3. *Shalikovskiy A.V., Lepikhin A.P., Tiunov A.A., Kurganovich K.A., Morozov M.G.* Navodneniya v Irkutskoy oblasti 2019 goda [Floods in Irkutsk oblast in 2019] // *Water Sector of Russia*. 2019. No. 6. Pp. 48–64. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-6-4
4. *Chanson H., Leng X.* There is Something Fishy about Turbulence – Why Novel Hydraulic Engineering Guidelines can assist the Upstream Passage of Small-Bodied Fish Species

- in Standard Box Culverts // Civil Engineering Research Bulletin. 2019. No. 26. School of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia, 224 p.
5. Richardson J.J., Moskal M.L. An Integrated Approach for Monitoring Contemporary and Recrutable Large Woody Debris // Remote Sens. 2016. No. 8 (778). DOI: 10.3390/rs8090778.
  6. Chen S.C., Tfwala S.S., Wang, Kuo YM, Chao Y.C. Incipient motion of large wood in river channels considering log density and orientation // Journal of Hydraulic Research, 2019. Vol. 57. No. 6. P. 1–14.
  7. Trufanov A.A. Teoriya rascheta davleniya brevennogo zaloma na zapani [Theory of calculation of the pressure of logjam on debris retaining structure]. M. Goslestekhzdat, 1933. 55 p.
  8. Lebedev N.I. Vodniy transport lesa [Water transporting of timber]. M.: Goslestekhzdat, 1939, 368 c.
  9. Domogashev V.N. Razrabotka metoda proektirovaniya mostovykh perekhodov v usloviyakh karchekhoda [Development of designing method for bridge crossings in the conditions of timber debris floating]: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Krasnoyarsk, 1984. 182 p.
  10. Domogashev V.N., Sergunov V.E. Karchekhod i ruslovoy protsess [Timber debris floating and channel process] // Geomorfologiya. 1987. No. 2. Pp. 54–56.
  11. Taukenov T.P., Yerzhanova Z.S. Formirovaniye zalomov na rekakh basseyina Burtyrmy i ikh geomorfologicheskiye funktsiyi [Logjam formation at the Buktyrma River basin rivers and their hydro/morphological functions] // Gidrometeorologiya i ekologiya. 2018. No. 2. Pp. 118–128.
  12. Murasheva A.A., Vdovenko A.V., Basova I.A., Stolyarov V.M. Ekologicheskiy ushcherb i prirodookhranniye meropriyatiya na mostovykh perekhodakh ostrova Sakhalin [Environmental damage and nature/protective measures at bridge crossings of the Island of Sakhalin] // Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle. 2018. Vyp. 1. Pp. 316–326.
  13. Lepikhin A.P., Lyubimova T.P., Parshakova Y.N., Tiunov A.A., Bogomolov A.V., Lyakhin Y.S. Gidrodinamicheskoye modelirovaniye reki Vyatki v srednem techeniyi: postanovka zadachi, rezultaty raschetov [Hydro/dynamic simulating of the Vyatka River in its middle reach: setting of the task and the calculations outputs] // Water Sector of Russia. 2013. No. 3. Pp. 16–32.
  14. Izbash S.V. O filtratsiyi v krupnozernistykh materialakh [About filtration in coarse-grain materials] // Izvestiya NIIG. 1931. V. 1. Pp. 120–122.
  15. Rukovodstvo po raschetu filtratsiyi v kamennno-nabrosnykh gidrosooruzheniyakh [Instruction on calculating of filtration in rock-fill hydraulic facilities]. L.: Energiya, 1975.
  16. Apollonov B.S. Ucheniye o rekakh [Teaching about rivers]. M.: MGU, 1952. 521 p.
  17. NIMP-72 Nastavleniye po izyskaniyu i proektirovaniyu zheleznodorozhnykh i avtodorozhnykh mostovykh perekhodov [Instruction on surveying and designing of railway and road bridge crossings]. M.: Transport, 1972.
  18. Posobiye k SNIIP 2.05.03-84 “Mosty i trubyy” [Reference book to SNIIP 2.05.03-84 “Bridges and pipes”] Po izyskaniyu i proektirovaniyu zheleznodorozhnykh i avtodorozhnykh mostovykh perekhodov cherez vodotoki PMP-92.
  19. Kango R., Shankar V., and Alam M.A. Evaluation of hydraulic conductivity based on grain size distribution parameters using power function model // Water Supply. 2019. Vol. 19. No. 2. P. 596–602.