

Гидрогеология

УДК 550.42:57.4 (571.1)

РАСЧЁТ ЗАТОРНЫХ УРОВНЕЙ РЕЧНЫХ ВОД НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

О.Г. Савичев

Томский политехнический университет
E-mail: OSavichev@mail.ru

Предложен метод расчёта подпора воды при ледовых заторах как функции расхода воды и толщины льда. Проведена его апробация на примере рек южной части Западной Сибири (Томь, Чулым, Кия, Уса, Мрас-Су, Кондома). Показано, что условиями возникновения на изученных реках ледового затора с подпором воды более 1,5 м являются: а) относительно резкое повышение водного стока; б) превышение срочного расхода воды над нормой стока примерно в 3,5 раза и более; в) наличие ледяного покрова с толщиной льда 0,3 м и более на значительной части реки. По результатам моделирования подпорных явлений даны рекомендации по снижению опасности наводнений на р. Томь.

Ключевые слова:

Ледовые заторы, заторные уровни воды, наводнения, юг Западной Сибири.

Key words:

Ice jams, jam water levels, flooding, South of Western Siberia.

Введение

Для рек южной части Западной Сибири (рр. Томь, Чулым, Кия, Мрас-Су, Кондома и др.) характерна достаточно высокая вероятность наводнений, существенно ограничивающих хозяйственное использование речных долин. Причиной этих наводнений во многих случаях являются ледовые заторы (скопления в русле льдин), возникновение которых, в свою очередь, обусловлено следующими обстоятельствами: 1) основная часть водного стока формируется в горных районах (Кузнецкий Алатау, Горная Шория), а участки нижнего течения характеризуются равнинным рельефом и, как следствие, общим снижением скоростей течения; 2) многие реки имеют меридиональную направленность, что в условиях широтного изменения температуры воздуха (увеличение с севера на юг) обуславливает более ранние сроки вскрытия ледового покрова на юге; 3) в районах Горной Шории и Кузнецкого Алатау в период формирования и разрушения ледового покрова эпизодически выпадает аномально большое количество дождей, существенно превышающее норму месячных атмосферных осадков и приводящее к значительному отклонению характеристик ледового режима рек от соответствующих среднемноголетних значений; 4) на участках нижнего течения крупных рек име-

ются естественные и антропогенные сужения речных русел, в районе которых и происходит накопление ледового материала [1–3].

Очевидно, что в подобных условиях возникает острая потребность в гидрологических прогнозах, на основе которых можно было бы разработать мероприятия по предотвращению ледовых заторов и снижению ущерба от наводнений. В частности, необходимы методы, позволяющие предсказать сроки формирования ледовых заторов и величину подпора воды (дополнительного повышения уровней воды при заторе). К сожалению, в настоящее время надёжность подобного прогноза недостаточно высока, что и определяет актуальность рассматриваемой работы, целью которой являлась разработка и апробация метода расчёта заторных уровней речных вод в южной части Западной Сибири.

Исходные данные

Исходными данными для гидрологических расчётов послужили: 1) сведения Западно-Сибирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЗСУГМС) о толщине ледяного покрова, расходах и уровнях воды рр. Томь (посты в г. Томск), Чулыма (сс. Балахта, Зырянское, Батурино, Коммунарка), Кия (г. Мариинск), Мрас-Су (г. Мыски), Кондома (с. Кузедеево), Уса (г. Междуре-

ченск); 2) информация ЗСУГМС о среднесуточной температуре атмосферного воздуха на метеостанциях Томск, Новокузнецк, Тисуль, Зырянское, Первомайское, Красноярск, Кузедеево, Кондома, Усть-Кабьрза; 3) материалы эпизодических наблюдений ОАО «Томскгеомониторинг» за толщиной ледяного покрова р. Томь. Выбор перечисленных выше рек обусловлен сочетанием высокой вероятности заторных явлений и наличия необходимой гидрологической и метеорологической информации. Положение гидрологических постов приведено на рис. 1.

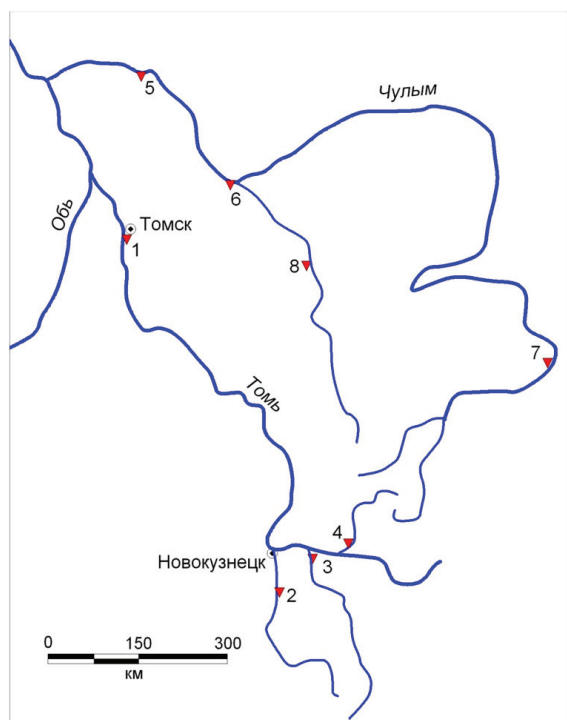


Рис. 1. Схема размещения пунктов наблюдений за ледовыми заторами: 1) р. Томь – г. Томск; 2) р. Кондома – с. Кузедеево; 3) р. Мрас-Су – г. Мыски; 4) р. Уса – г. Междуреченск; 5) р. Чулым – с. Батурино; 6) р. Чулым – с. Зырянское; 7) р. Чулым – с. Балахта; 8) р. Кия – г. Мариинск

Результаты исследования

Изучением ледотермических речных процессов в разное время плодотворно занимались Л.Г. Шуляковский, В.А. Бузин, М.А. Жукова, О.Ф. Васильев, А.А. Атавин, С. Белтос и многие другие авторы, внесшие существенный вклад в развитие теории формирования и разрушения ледяного покрова рек и разработавшие целый ряд математических моделей ледовых заторов и зажоров [4–6]. Однако вследствие объективной сложности исследуемых ледотермических процессов и проблем с определением параметров применение данных моделей существенно ограничено. В результате этого в инженерных изысканиях и гидрологических прогнозах на территории Российской Федерации обычно используют упрощенные способы определения подпора воды ΔZ при зажорах или заторах, основанные на модификации формулы Шези-Маннинга применительно к заторному руслу или гидравлическом подобии образования ледовых заторов на реках, а также эмпирические зависимости. Например, согласно [7, 8], для решения практических задач рекомендуется уравнение:

$$\Delta Z = (\mu S_0^{0,3} - 1)h_0, \quad (1)$$

где μ – коэффициент зажорности или заторности речного участка; определяется путем полевых исследований, по аналогии или ориентировочно по справочным данным; S_0 – уклон водной поверхности (‰); h_0 – средняя глубина реки (м) в расчетном створе при расходе Q и свободном ото льда русле; ΔZ в метрах. Коэффициент μ в ур. (1) зависит от соотношения ширины потока и коэффициентов шероховатости при заторе и открытом русле, а также от уклона водной поверхности при заторе (зажоре), то есть от параметров, которые также определить весьма сложно (трудности оценки параметров ледовых заторов иллюстрирует рис. 2). По этой причине указанный выше способ, как и многие другие, позволяет получить удовлетворительные результаты далеко не всегда.



Рис. 2. Фрагмент заторного участка р. Томь выше г. Томск 29.04.2010 г.; ширина зоны наводнения от 1,5 до 4 км

В рассматриваемой работе для решения проблемы прогноза подпора воды в условиях дефицита достоверной гидрологической информации предлагается подход, базирующийся на схематизации профиля заторного участка реки (рис. 3) при следующих допущениях.

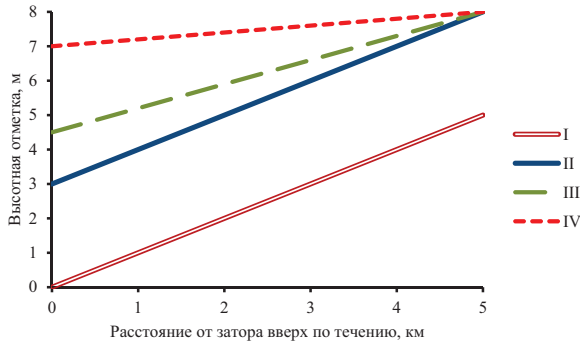


Рис. 3. Схема продольного профиля заторного участка реки при расходе воды Q ; поверхности: I) дна реки; II) водной поверхности при открытом русле; III) нижней поверхности ледяных образований; IV) водно-ледового потока при ледовом заторе

Во-первых, предположим, что подпор пропорционален изменению уклона воды при заторе по сравнению с открытым руслом:

$$\Delta Z = k_1 L_J (S_0 - S_J), \quad (2)$$

где k_1 — эмпирический коэффициент; L_J — длина заторного участка; S_0 и S_J — уклоны водной поверхности при открытом русле и заторе при одном и том же расходе воды. *Во-вторых*, выразим уклон S_0 через соотношение расхода воды Q в момент формирования затора и нормы стока Q_a :

$$S_0 = k_2 S_a \frac{Q^2 M_a^2}{Q_a^2 M^2} \approx k_3 \left(\frac{Q}{Q_a} \right)^{k_4}, \quad (3)$$

где k_2, k_3, k_4 — эмпирические коэффициенты; S_a — средний уклон реки; M и M_a — модули расходов Q и Q_a ($Q^2 = SM^2$). *В-третьих*, допустим, что: а) $S_J = S_0$ при отсутствии льда (при толщине ледяного покрова $\Lambda = 0$); б) $S_J = 0$ при максимальной толщине ледяного покрова ($\Lambda = \Lambda_{\max} + \delta$); в) поправка к максимальной толщине льда δ пропорциональна среднему уклону реки ($\delta = k_5 S_a$); г) максимально возможная толщина ледяного покрова (при полном промерзании) равна глубине водотока $h(Q)$. Тогда при указанных ограничениях можно записать:

$$S_J \approx S_0 \left(1 - \frac{\Lambda}{h(Q) + k_5 S_a} \right), \quad (4)$$

а ур. (2, 3) преобразовать к виду:

$$\Delta Z = k_6 \left(\frac{Q}{Q_a} \right)^{k_4} \frac{\Lambda}{h(Q) + k_5 S_a}, \quad (5)$$

где k_6 — эмпирический коэффициент.

Измерение толщины ледяного покрова в момент вскрытия рек представляет собой достаточно сложную задачу, в связи с чем в ур. (5) целесооб-

разно использовать косвенную оценку величины Λ в зависимости от температуры атмосферного воздуха на основе формулы Ф.В. Быдина [9]:

$$\Lambda = k_7 \cdot \sqrt{\left| \sum T_d \right|}, \quad (6)$$

где k_7 — эмпирический коэффициент; T_d — средняя суточная температура воздуха.

Апробация рассматриваемого подхода проводилась в два этапа:

- 1) статистический анализ данных о толщине ледяного покрова и расходах воды рек Томь у г. Томск, Чулым у сёл Балахта, Зырянское, Батурино (Коммунарка), Кия у г. Мариинск, Мрас-Су у г. Мыски, Кондома у с. Кузедеево, Уса у г. Междуреченск на последний день месяца за период устойчивого ледостава (с декабря по март-апрель), материалов о среднесуточной температуре атмосферного воздуха на ближайших к гидрологическим постам метеостанциях и определение коэффициента k_7 ;
- 2) оценка взаимосвязей между подпором воды при заторах, толщиной ледяного покрова, температурой атмосферного воздуха, расходами воды, шириной и глубиной потока и определение коэффициентов k_4, k_5, k_6 в ур. (5).

Для упрощения методики и учёта эффекта стаивания льда вместо суммы отрицательных температур атмосферного воздуха с начала ледостава, использованной Ф.В. Быдиным [9] для расчёта толщины льда при наличии снегового покрова, выполнялся расчёт суммы среднесуточных температур (как отрицательных, так и положительных) с 1 октября предыдущего календарного года до первого дня формирования ледового затора $\sum T_d$. В результате методом наименьших квадратов получена формула для определения толщины ледяного покрова на изученных реках в виде:

$$\Lambda = (0,01766 \pm 0,00030) \sqrt{\left| \sum T_d \right|}, \quad (7)$$

где Λ в метрах, T_d — в °C; квадрат корреляционного отношения R^2 составляет 0,44, что свидетельствует об удовлетворительном качестве методики (критическое значение $R^2 = 0,36$). Попытки найти зависимости Λ от суммы отрицательных температур воздуха и высоты снежного покрова на льду согласно рекомендациям [9, 10] не привели к положительному результату.

На втором этапе был выполнен статистический анализ различных вариантов для определения коэффициентов k_4, k_5, k_6 в ур. (5) — функций от скорости течения, глубин и ширины водотока по данным измерений, толщины льда на 31 марта текущего календарного года, фиксированных значений k_4 и k_5 . В итоге наибольшее значение $R^2 = 0,37$ при условии, что коэффициенты регрессии превышают по модулю удвоенную погрешность их определения, было получено для зависимости:

$$\Delta Z = (0,935 \pm 0,118) \left(\frac{Q}{Q_a} \right)^{1,75} \frac{\Lambda}{h(Q) + 0,6 S_a}. \quad (8)$$

где величина ΔZ рассчитывается по ур. (7) в метрах; расход воды Q в $\text{м}^3/\text{с}$; подпор ΔZ и глубина реки $h(Q)$ при открытом русле и расходе воды Q – в метрах; средний уклон реки S_a – в ‰.

Использование ур. (8) позволяет получить в целом приемлемый по точности прогноз подпора воды при ледовых заторах и в первом приближении наметить виды и объёмы руслоисправительных работ. Например, моделирование гидрологических условий на р. Томь позволяет сделать следующие выводы: 1) при углублении русла реки на 2 м опасность ледовых заторов сохранится, но подпор снизится примерно на 20 % (рис. 4); 2) при наличии существующих тенденций русловых процессов, способствующих возникновению осередков в русле р. Томь в черте г. Томск и уменьшению средней глубины, следует ожидать повторение мощных ледовых заторов и наводнений, аналогичных затору и наводнению в 2010 г. (рис. 2); 3) значительный подпор (более 1...1,5 м) при неблагоприятных условиях может наблюдаться уже при толщине льда 0,3...0,4 м.

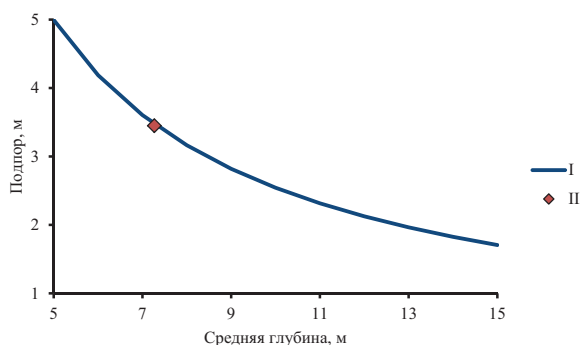


Рис. 4. Зависимость подпора воды ΔZ на р. Томь от средней глубины в условиях ледового затора 29.04.2009 г. (принятое расчётное значение толщины льда по ур. (7) $\Delta=0,9$ м; $Q=8000$ $\text{м}^3/\text{с}$): I) результаты моделирования; II) фактический подпор воды (рис. 2)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марусенко Я.И., Земцов А.А., Семлянская Л.П. и др. Гидрография Западной Сибири. Т. 1. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1961. – 169 с.
2. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2, Средняя Обь / под ред. Н.А. Паниной. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 408 с.
3. Савичев О.Г., Лыготин В.А. Методика оценки уровней вод реки Томь при ледовых заторах и зазорах у г. Томска (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 135–140.
4. Бузин В.А., Болотников Г.И., Филиппов А.М. Заторы и зазоры льда на реках – методы изучения, расчёта и прогноза // Проблемы современной гидрологии / под ред. И.А. Шикломанова. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – С. 220–231.
5. Атавин А.А., Зиновьев А.Т., Кудишин А.В. Математическое моделирование гидроледотермического режима зарегулированного участка реки // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия: Матер.

Заключение

1. Разработан и апробирован метод расчёта подпора воды при ледовых заторах в зависимости от соотношения срочного и среднемноголетнего расходов воды, глубины потока при открытом русле, среднего уклона реки и суммы среднесуточных температур атмосферного воздуха (с 1 октября предыдущего календарного года).
2. Ледовые заторы на рр. Томь, Уса, Мрас-Су, Кондома, Чулым, Кия формируются при преобладании динамического фактора (по сравнению с термическим), причём подпор воды 1,0...1,5 м может наблюдаться уже при толщине льда 0,3...0,4 м. В этом случае необходимыми условиями образования ледового затора являются: а) относительно резкое повышение водного стока; б) превышение срочного расхода воды над нормой стока примерно в 3,5 раза и более; в) наличие ледяного покрова на значительной части затороопасного участка реки (на р. Томь – в пределах Томской области).
3. Параметры модели получены для гидрологических зон условий, характерных для переходных зон между равниной и горными районами Кузнецкого Алатау и Горной Шории. Его использование для рек с иным гидрологическим режимом рекомендуется только после дополнительного уточнения параметров.
4. Анализ результатов моделирования показал, что снижение подпора воды на изученных реках может быть достигнуто при углублении и частичном спрямлении русла. В частности, заметное снижение опасности ледовых заторов и наводнений на р. Томь у г. Томск может быть достигнуто при углублении русла на отдельных участках на 2...3 м и срезке ряда островов в городской черте.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-05-9800-р_сибирь_а).

- Междунар. научн. конф. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – С. 371–375.
6. Beltaos S. Progress in the study and management of river ice jams // Cold regions science and technology. – 2008. – № 51. – P. 2–19.
7. СП 33-101-2003. Определение основных расчётных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.
8. Методические рекомендации по определению расчётных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. Государственный гидрологический институт / под ред. А.В. Рождественского и А.Г. Лобановой. – СПб.: Нестор-История, 2009. – 193 с.
9. Лебедев В.В. Гидрология и гидрометрия в задачах. – Л.: Гидрометеиздат, 1955. – 551 с.
10. Пособие к СНиП 2.05.03-84. «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91). – М.: ГУПиКС, 1992. – 374 с.

Поступила 08.09.2011 г.