

Моделирование летнего гидротермического режима в нижнем бьефе Красноярской ГЭС

Н. Я. ШАПАРЕВ^{1,2,*}, Ю. И. ШОКИН³

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

*Контактный e-mail: shaparev@icm.krasn.ru

Предлагается модель летнего гидротермического режима р. Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на основе детерминированного подхода. На теплообмен воды с окружающей средой влияют следующие физические процессы: поглощение водой прямой и рассеянной солнечной радиации; поглощение поверхностью воды тепловой инфракрасной радиации (ТИР), исходящей из атмосферы; излучение поверхностью воды ТИР; испарительный и конвективный теплообмен. Результаты моделирования сравниваются с температурными данными, полученными с гидропостов.

Ключевые слова: р. Енисей, температура воды, моделирование.

Библиографическая ссылка: Шапарев Н.Я., Шокин Ю.И. Моделирование летнего гидротермического режима в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Вычислительные технологии. 2018. Т. 23, № 6. С. 107–114. DOI: 10.25743/ICT.2018.23.6.010.

Введение

Енисей является самой большой по водостоку рекой России (599 км³/год) и занимает по этому показателю седьмое место в мире [1]. В результате зарегулированности реки, обусловленной строительством Красноярской ГЭС, изменились гидротермический, гидробиологический, гидрохимический, рекреационный и климатический режимы, а также режим водопользования, и главной причиной этого является температура и расход воды, поступающей из водохранилища. Состояние водопользования на р. Енисей в показателях устойчивого развития представлено в работах [2, 3]. Данная работа посвящена моделированию гидротермического режима в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на основе физически обоснованного детерминированного подхода. Для математического моделирования используется уравнение Фурье.

1. Моделирование гидротермического режима

Как известно, вид течения определяется числом Рейнольдса. Для удельной плотности воды 10³ кг/м³, вязкости воды $1.79 \cdot 10^{-3}$ кг/(м·с), скорости течения 1.5 м/с, гидравлического радиуса 4 м $Re = 3.4 \cdot 10^6$. При $Re > 2000$ поток становится турбулентным,

что приводит к перемешиванию текущих слоев воды и выравниванию температуры воды в поперечном сечении. Тогда гидротермический режим реки можно описать уравнением Фурье [4]

$$\frac{\partial T_w(x, t)}{\partial t} = -V(x, t) \frac{\partial T_w(x, t)}{\partial x} + \frac{D}{\rho c} \frac{\partial^2 T_w(x, t)}{\partial x^2} + \frac{W(t) B(x)}{\rho c S(x)}. \quad (1)$$

Первый член в правой части уравнения связан с переносом тепла за счет течения реки, второй определяется теплопроводностью воды, а третий описывает энергообмен воды с окружающей средой. Здесь $T_w(x, t)$ — усредненная в поперечном сечении температура воды, °C; t — время; x — расстояние вдоль реки от плотины; D — коэффициент теплопроводности в направлении течения; c — удельная теплоемкость воды; ρ — удельная плотность воды. Средняя по сечению реки скорость течения $V(x, t) = Q/S(x)$, где Q — расход воды из плотины, а S — поперечное сечение реки. В работе рассматриваются установившиеся течения, для которых Q не зависит от времени. $B(x)$ — ширина реки. $W(t)$ — мощность энергообмена воды с окружающей средой, которая в нашем случае равна

$$W(t) = W_s + W_{ss} + W_a - W_w + W_c - W_e.$$

Здесь W_s и W_{ss} — прямая и рассеянная солнечная радиация, поглощаемая водой; W_a — поглощаемая водой тепловая инфракрасная радиация (ТИР) атмосферы; W_w — ТИР, поступающая с поверхности воды в атмосферу; W_c — конвективный теплообмен воды с атмосферой; W_e — затраты энергии на испарение воды. Так как скорость течения реки много больше 10^{-3} м/с, теплопроводностью воды в уравнении (1) можно пренебречь. Переходя в систему координат, движущуюся со скоростью $V(x)$, уравнение (1) можно переписать так:

$$\frac{\partial T_w(t)}{\partial t} = \frac{W(t) B(x(t))}{\rho c S(x(t))},$$

решение этого уравнения имеет вид

$$T_w(t) = \frac{1}{\rho c} \int_{t_0}^t \frac{B(x(t))}{S(x(t))} W(t) dt + T_w(0, t_0), \quad x(t) = Q \int_{t_0}^t \frac{dt}{S(x(t))},$$

где $T_w(0, t_0)$ — температура воды при выходе из плотины в момент времени t_0 . Отношение S/B определяет среднюю глубину реки.

Мощность солнечного излучения, падающего на атмосферу Земли [5], равна

$$F = F_0 E \cos \theta, \quad \cos \theta = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos wt', \quad (2)$$

где $F_0 = 1367$ Вт/м² — солнечная константа; E — коррекционный фактор эксцентриситета; θ — зенитный угол; t' — время, отсчитываемое от полудня; w — угловая скорость вращения Земли вокруг полярной оси. Здесь $\phi = 55.94^\circ$ с.ш. — географическая координата расположения ГЭС. Для 3 июля 2016 г. угол склонения Солнца $\delta = 22.97^\circ$, $E = 0.967$. Восход и закат Солнца определяются условием $F = 0$, и тогда из (2) имеем

$$\cos wt_0 = -\tan \phi \cdot \tan \delta. \quad (3)$$

Отрицательный корень уравнения (3) $-wt_0$ определяет восход, а положительный wt_0 — закат. Так как время t' отсчитывается от полудня t_n , то

$$\cos wt' = \cos \left(\pi \frac{t - t_n}{12} \right),$$

где t — обычное время, отсчитываемое от полуночи. Согласно (3), получаем время восхода $t_{\text{в}} = 04:04$ и время заката $t_{\text{з}} = 21:34$. Тогда длительность дня равна 17.51 ч, а время полудня $t_{\text{п}} = 12:49$. Временная зависимость мощности солнечного излучения $F(t)$ представлена на рис. 1 (кривая 1).

Проходя через атмосферу, солнечное излучение рассеивается, поглощается и, согласно закону Бугера — Ламберта — Бера, поверхности Земли (воды) достигает мощность излучения

$$F' = F \cdot \exp\left(-\frac{\tau_0}{\cos \theta}\right), \quad (4)$$

где оптическая толщина атмосферы $\tau_0 \approx 0.2$ [5]. Характерное значение мощности рассеянного излучения, попадающего на Землю, для рассматриваемых нами широт в полдень равно 80 Вт/м^2 [5]. Это составляет примерно 7.8% от прямой солнечной мощности. Учет рассеянной энергии можно представить как уменьшение оптической толщины, тогда $\tau_0 \approx 0.122$. Суммарная мощность прямого и рассеянного солнечного излучения, прошедшего через безоблачную атмосферу (рис. 1, кривая 2), при $\tau_0 \approx 0.122$ определяется выражением (4).

Коэффициент отражения от воды солнечного излучения R определяется формулой Френеля. Оставшаяся часть солнечной мощности $(1 - R)$ поглощается в воде и нагревает ее. Таким образом,

$$W_s + W_{ss} = (1 - R)F'. \quad (5)$$

Мощность солнечного излучения, поглощаемого водой, представлена на рис. 1 (кривая 3). Временная зависимость солнечной энергии A , поглощаемой водой, представлена на рис. 2, она получена интегрированием по времени выражения (5). Поглощая солнечную энергию, вода нагревается.

Поверхность воды излучает ТИР, равную согласно закону Стефана — Больцмана

$$W_w = \varepsilon_w \sigma (273 + T_w)^4,$$

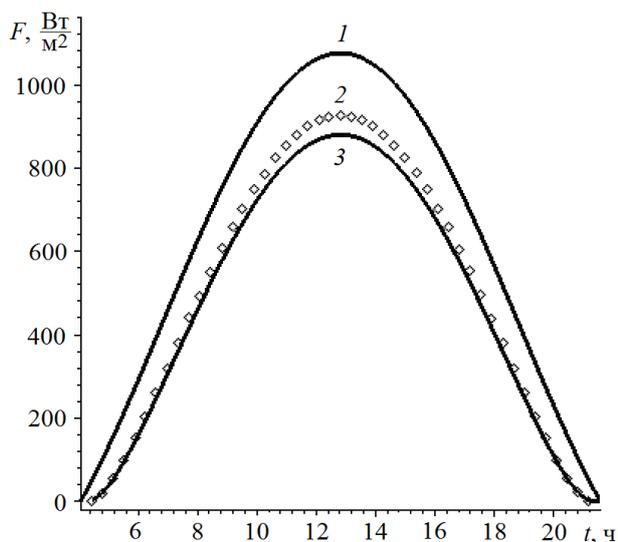


Рис. 1. Зависимость мощности солнечного излучения от времени: 1 — падающего на атмосферу Земли, 2 — прошедшего через атмосферу, 3 — поглощенного водой

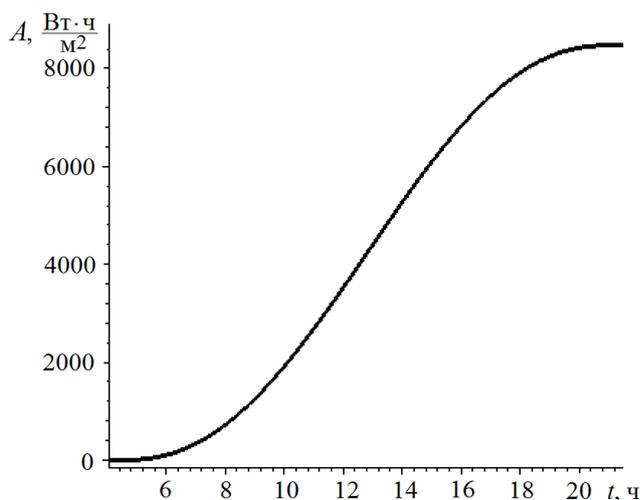


Рис. 2. Временная зависимость солнечной энергии, поглощаемой водой

где ε_w — коэффициент эмиссии воды, который, согласно данным [6], равен $\varepsilon_w = 0.995$; σ — постоянная Стефана — Больцмана. Для $T_w(0, t_0) = 7.2$ °С ТИР $W_w = 290$ Вт/м². Излучая эту энергию, вода охлаждается.

Атмосфера Земли также излучает ТИР. Эмпирические выражения для коэффициента эмиссии атмосферы ε_a представлены в [7]. Проведенный анализ показал, что в нашей ситуации наиболее подходит формула, полученная в [8]:

$$\varepsilon_a = 1 - 0.4 \exp\left(-\frac{100e_a}{273 + T_a}\right).$$

Здесь T_a — температура атмосферы, °С; e_a — давление водяных паров, мбар. Для 3 июля 2016 г. температура атмосферы в полдень была равна $T_a = 26$ °С, в полночь $T_a = 14$ °С, влажность в полдень 45 %, в полночь 85 %. Мощность излучения атмосферы, определяемая также формулой Стефана — Больцмана, равна в полдень $W_a = 460$ Вт/м², а в полночь $W_a = 390$ Вт/м². Тепловая инфракрасная радиация атмосферы поглощается поверхностью воды и увеличивает ее температуру.

Мощность W_e , идущая на испарение воды [9], равна

$$W_e = \rho L f (e_s - e_a),$$

где L — теплота испарения; ветровая функция $f = 3 \cdot 10^{-9}$ м/(с · мбар) в отсутствие ветра [10]; e_s — давление насыщенных водяных паров. При $e_a < e_s$ вода испаряется и температура ее уменьшается, при $e_a > e_s$ идет конденсация паров воды и вода нагревается. Согласно проведенным расчетам, в полдень $W_e = 31$ Вт/м², а в полночь $W_e = 4.6$ Вт/м².

Величина конвективного теплообмена для воды равна [11]

$$W_c \approx 0.61 \rho L f (T_a - T_w).$$

При $T_w < T_a$ вода за счет конвективного теплообмена будет нагреваться, при $T_w > T_a$ — охлаждаться. В полдень $W_c = 25$ Вт/м², в полночь $W_c = 1.3$ Вт/м².

2. Результаты

Рассматривался участок реки от плотины Красноярской ГЭС на расстоянии 124 км, который разбит четырьмя створами. На первом, втором и четвертом створах расположены гидропосты, на которых измерялась температура воды. На первом, рядом с плотиной, измерялась температура воды, выходящей из плотины. Два других расположены на расстоянии 40 и 124 км. Скорость течения воды между створами предполагалась постоянной и определялась при $Q = 2900$ м³/с, а S была равна площади сечения ниже по течению створа. Время течения между створами равно отношению расстояния между створами, деленному на скорость течения. Температура воды на гидропостах t_g измерялась в 08:00 и 20:00. Соответственно, время выхода воды из плотины $t_0 = t_g - t_i$, где t_i — время течения воды от плотины до створа. Температура воды определялась по формуле (1), которая теперь выглядит так

$$T_w(x(t), t) = \frac{1}{\rho c} \sum_{i=2}^4 \frac{B_i(x_i(t))}{S_i(x_i(t))} W_i \Delta t_i + T_w(0, t_0).$$

Здесь i — номер створа; Δt_i — время течения между $i - 1$ -м и i -м створами; $W_i \Delta t_i$ — энергия, полученная водой между створами; $\rho = 1000$ кг/м³; $c = 4.19 \cdot 10^3$ Дж/(кг · °С).

Мощность W_i зависит от времени суток, температуры воды и атмосферы, давления паров воды и влажности атмосферы. Величина солнечной энергии, поглощаемая водой, определялась интегрированием выражения (5). Мощность излучения воды равна 290 Вт/м^2 , мощность излучения атмосферы в течение дня принималась равной 460 Вт/м^2 , в ночное время 390 Вт/м^2 . Разница мощности между испарением и конвекцией составила днем 6 Вт/м^2 , ночью 3.3 Вт/м^2 , и соответственно вода охлаждалась. Температура воды в первом створе в течение рассматриваемого времени была постоянной и равной $T_w(0, t) = 7.2 \text{ }^\circ\text{C}$. Морфометрические и гидрофизические характеристики в створах реки приведены в таблице.

Вычислим температуру воды во втором створе 3 июля 2016 г. в 08:00. Вода вытекает из плотины в 0.4 ч с $T_w(0, t) = 7.2 \text{ }^\circ\text{C}$ и через 7.6 ч в 08:00 достигает второго гидропоста. Разница энергии между излучением из атмосферы и излучением воды составила в ночное время $400 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$, в дневное время $617 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$. Величина поглощенной солнечной энергии до 08:00 равна $716 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$. Уменьшение энергии воды за счет испарительно-конвективных процессов ночью была равна $13.2 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$, а днем $21.6 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$. Суммарная энергия, полученная водой до 08:00, составила $1695 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$. Тогда согласно выражению (2), при $B/S = 0.368$ значение температуры на втором створе в 08:00 равно $7.7 \text{ }^\circ\text{C}$. По данным гидропоста, оно составило $8 \text{ }^\circ\text{C}$.

При измерении температуры на втором гидропосту в 20:00 вода вытекала из плотины 12.4 ч . Разница между излучением из атмосферы и излучением воды составила $1292 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$. Величина солнечной энергии с 12.4 ч до 20:00 равна $4463 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$. Убыль энергии за счет конвективно-испарительных процессов составила $45.6 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$. Суммарная энергия, полученная водой, равна $5709 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$, и температура воды $9 \text{ }^\circ\text{C}$. По данным второго гидропоста, $T_w = 9 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вычислим далее температуру воды в третьем створе 3 июля 2016 г. в 08:00. Вода из плотины поступала в 14.9 ч 2 июля и через 17.1 ч достигала третьего створа в 08:00. До второго створа величина энергии от излучения атмосферы минус излучение воды составила $1222 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$, солнечная энергия $2392 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$, энергия конвективно-испарительных процессов равна $76.6 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$. Изменение температуры воды до второго створа $\Delta T_w = 1.1 \text{ }^\circ\text{C}$. На участке между вторым и третьим створами вода получила энергию $1913 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$, а увеличение температуры воды равно $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$. Тогда температура воды на третьем створе в 08:00 $T_w = 8.7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Морфометрические и гидрофизические характеристики в створах реки

Номер створа		1	2	3	4
Расстояние от плотины до створа x , км		0.5	40	77	124
Ширина створа B , м		520	830	580	450
Площадь сечения створа S , м ²		1834	2254	2452	2513
Скорость течения реки в створе $V(x)$, км/ч		5.7	4.6	4.3	3.7
Время течения между соседними створами Δt_i , ч		—	7.6	9.5	11.9
Отношение B/S , м ⁻¹		0.283	0.368	0.236	0.179
T_w 3 июля в 8:00, °C	расчет	—	7.7	8.7	10.1
	на гидропосту	7.2	8.0	—	10
T_w 3 июля в 20:00, °C	расчет	—	9.0	9.9	10.3
	на гидропосту	7.2	9.0	—	10.6

Вода поступала из плотины 3 июля в 2.9 ч и достигала третьего створа в 20:00. За время течения до второго створа вода увеличила свою энергию за счет поглощения излучения в ТИР-диапазоне на $1222 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, за счет солнечного излучения — на $2280 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ и уменьшила ее за счет конвективно-испарительных процессов на $25 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$. Изменение температуры воды при достижении второго створа составило $\Delta T_w = 1.1 \text{ }^\circ\text{C}$. При течении со второго створа до третьего увеличение энергии воды составило $7812 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, а температуры $\Delta T_w = 1.6 \text{ }^\circ\text{C}$. Значит, расчетная температура на третьем створе в 20:00 равна $T_w = 9.9 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вода, вытекающая из плотины 2 июля в 03:00, достигнет четвертого створа 3 июля в 08:00. Увеличение энергии воды до второго створа составит $3431 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, а изменение температуры $\Delta T_w = 1.1 \text{ }^\circ\text{C}$. До третьего створа увеличение энергии равно $7655 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, а $\Delta T_w = 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$. И, наконец, при течении до четвертого створа увеличение энергии составит $2259 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, а изменение температуры $\Delta T_w = 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$. Расчетная температура на четвертом створе будет равна $T_w = 10.1 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура воды на гидропосту равна $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вода, вытекающая из плотины 2 июля в 15:00, достигнет четвертого створа в 20:00. До второго створа температура изменится на $\Delta T_w = 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$, до третьего $\Delta T_w = 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$, до четвертого $\Delta T_w = 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Расчетная температура воды в четвертом створе будет равна $T_w = 10.3 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура, измеренная на гидропосту 3 июля в 20:00, равна $T_w = 10.6 \text{ }^\circ\text{C}$.

Заключение

Предложена простая модель летнего гидротермического режима реки, основанная на вычислении температуры воды в движущейся вместе с водой системе координат, и применена для р. Енисей. Физически обоснованный расчет энергетического баланса в воде учитывает поглощение водой солнечной энергии, излучение водой ТИР и поглощение водой ТИР, приходящей из атмосферы, а также затраты энергии на испарение воды и обусловленный конвективными процессами нагрев воды. Определяющими в энергообмене являются солнечная радиация и тепловое инфракрасное излучение. Полученные в результате моделирования значения температуры воды близки к экспериментальным данным на гидропостах, что позволяет судить об адекватности физико-математического моделирования реально происходящим гидротермическим процессам.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края (грант № 18-41-242006-р_мк).

Авторы благодарны В. М. Белолипецкому и А. П. Гаврилюку за обсуждение результатов работы, Д. А. Буракову за предоставление данных по температуре воды на гидропостах, О. Э. Якубайлику за предоставление морфометрических данных (B , S).

Список литературы / References

- [1] **Dingman, L.S.** Physical hydrology. Third edition. Waveland Press, 2015. 670 p.
- [2] **Shaparev, N., Astafiev, N.** Water resources of the Krasnoyarsk Krai in sustainable water management indices // Intern. J. of Sustainable Development & World Ecology. 2008. Vol. 15, No. 6. P. 574–583.

- [3] **Shaparev, N.** Regional sustainable nature management // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2009. Vol. 79, No. 6. P. 574–579.
- [4] Численное моделирование задач гидроледотермики водотоков / В.М. Белоліпецкий, С.Н. Генова, В.В. Туговиков, Ю.И. Шокин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1993. 138 с.
Numerical modelling of hydroicothermal problems of watercourses / V.M. Belolipetskiy, S.N. Genova, V.B. Tugovikov, Yu.I. Shokin. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 1993. 138 p. (In Russ.)
- [5] **Kondratyev, K.Ya.** Radiation in the atmosphere. N.Y.: Acad. Press, 1969. 631 p.
- [6] **Handcock, R.N., Torgersen, C.E., Cherkauer, K.A. et al.** Fluvial remote sensing for science and management. First edition / P.E. Charbonneau, H. Piegay (Eds). John Wiley & Sons, 2012. P. 85–113.
- [7] **Flerchinger, G.N., Wei Xiaio, Marks, D. et al.** Comparison of algorithms for incoming atmospheric longwave radiation // Water Resources Research. 2009. Vol. 45. W 03123.
- [8] **Iziomon, M.G., Mayer, H., Matzarakis, A.** Down ward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies: Measurement and parametrization // J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys. 2003. Vol. 65. P. 1107–1116.
- [9] **Шуляковский Л.Г.** Формула для расчета испарения с учетом температуры свободной поверхности воды // Тр. Ордена Ленина Гидрометеорологического НИЦ СССР. 1969. Вып. 53. С. 3–13.
Shulyakovskiy, L.G. The formula for calculating evaporation based on the temperature of the free water surface // Tr. Ordena Lenina Gidrometeorologicheskogo NITs SSSR. 1969. Iss. 53. P. 3–13. (In Russ.)
- [10] **Boyd, M., Kasper, B.** Analytical methods for dynamic open channel heat and mass transfer: Methodology for heat source model version 7.0. Available at: <https://www.oregon.gov/deq/FilterDocs/heatsourcemanual.pdf>
- [11] **Bowen, I.S.** The ration of heat losses by conduction and by evaporation from any water susface // Physical Review. 1926. Vol. 27. P. 749–787.

Поступила в редакцию 29 октября 2018 г.

Modelling of summertime hydrothermal regime in the downstream pool of Krasnoyarsk hydroelectric power station

SHAPAREV, NIKOLAY YA.^{1,2,*}, SHOKIN, YURIY I.³

¹Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, 660036, Russia

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russia

³Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

*Corresponding author: Shaparev Nikolay, e-mail: shaparev@icm.krasn.ru

Here we consider the summertime hydrothermal regime in a 124-km river occurring within the interval (reach) downstream of the Krasnoyarsk HPP on July 3, 2016 based on the deterministic modelling approach. The reach area is divided by 4 cross-section lines (0.5, 40, 77, 124 km) with gauging stations at the first, second and forth section lines to measure water temperature. Temperature measurements at the gauging stations

are taken at time t_g (at hour 08:00 and 20:00). Water temperature at the first gauging station was 7.2°C and remained constant during the time period under consideration. To carry out mathematical simulation by analogy with other authors, we use the Fourier equation. We have proposed a simple model for simulating summertime hydrothermal regime of a river based on calculation of water temperature in a coordinate system moving with water. The physically based estimation of water heat budget takes into account absorption of solar radiation by water surface, emission and absorption of atmospheric thermal infrared radiation (TIR) by water, convective heating of water as well as heat loss due to evaporative processes. The temporal fluctuation pattern of direct and scattered solar radiation depends on the zenith angle and atmospheric absorption. The dominant water heating factor is solar radiation during the daytime and atmospheric TIR at night. Emits TIR defined by the Stefan — Boltzmann law. Water temperatures 124 km downstream of the Krasnoyarsk HPP on the Yenisei River computed using the proposed model with consideration of morphometric characteristics are close to the recorded temperatures observed at the gauging stations, which proves that the deployed physical-mathematical model providing an adequate description of the actual hydrothermal processes. Our spatial-temporal analysis has revealed no diurnal fluctuations of water temperature, which we attribute to the fact that “cold” water leaving the dam enters the “warm” surrounding environment providing a permanent source of water heating.

Keywords: water temperature, the Yenisei River, modelling.

Cite: Shaparev, N.Ya., Shokin, Yu.I. Modelling of summertime hydrothermal regime in the downstream pool of Krasnoyarsk hydroelectric power station // Computational Technologies. 2018. Vol. 23, No. 6. P. 107–114. (In Russ.)
DOI: 10.25743/ICT.2018.23.6.010.

Acknowledgements. This work was carried out with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Krasnoyarsk Territory (project No. 18-41-242006 p_mk).

The authors is grateful V.M. Belolipetskii and A.P. Gavriluk for the discussion of the results of work; D.A. Burakov for providing data on water temperatures recorded at river stations; O.E. Yakubaylik for providing morphometric data.

Received 29 October 2018