

## Температурный и ледовый режимы р. Ангара после возведения Богучанской и Мотыгинской ГЭС.

Белолипецкий В.М., Генова С.Н.

Институт вычислительного моделирования СО РАН,

Сибирский федеральный университет, Красноярск,

(391)249-47-58, [sv@icm.krasn.ru](mailto:sv@icm.krasn.ru)

Возведение гидросооружений вносит существенные изменения в природные условия прилегающих районов. Изменяются температурные и скоростные режимы реки как выше, так и ниже гидроузла. Смена температурного режима оказывает влияние на развитие речной и флоры и фауны, понижение температуры в летний период приводит к снижению самоочищающей способности реки. Для полной оценки экологического воздействия строящихся ГЭС необходимо знать прогноз гидротермического и ледового режима реки выше и ниже плотины и выработать рекомендации по уменьшению негативного влияния строительства ГЭС [1].

Для выполнения прогнозных расчетов используются разработанные в Институте вычислительного моделирования СО РАН математические модели и вычислительные программы, которые применялись для исследования гидродотермических процессов в бьефах Красноярской, Туруханской и Средне-Енисейской ГЭС.

Математические модели гидротермических процессов в водоемах строятся на основе уравнений механики жидкости и теплопереноса с учетом специфики рассматриваемых задач.

Для описания гидротермического режима водохранилища использовались уравнения гидротермодинамики в приближении пограничного слоя с учетом коэффициента вертикального турбулентного обмена, который определяется по формуле Обухова. В модели учитываются тепловые потоки через свободную поверхность и напряжение трения ветра.

Для исследования неустановившихся течений в нижнем бьефе ГЭС используется одномерная постановка соответствующих гидравлических задач, основанных на использовании классических уравнений Сен-Венана. Математическая модель температурного режима водного потока основана на упрощенном одномерном уравнении переноса для средней по сечению температуры воды, учитывающем теплообмен с атмосферой. При наличии притоков температура воды в соответствующем створе определяется как средневзвешенная.

В исследованиях ледотермических режимов открытых водотоков основной интерес представляет определение изменений во времени положения створа кромки ледяного покрова (ЛП), толщины ледяного покрова по длине водотока, расхода и общего количества образующейся шуги. При этом различают три основных ледотермических режима в каналах и нижних бьефах ГЭС:

- Перемещение кромки льда вверх по течению (наступление). Имеет место, когда кромка ЛП расположена ниже створа нулевой изотермы;
- Отступление кромки ЛП (температуры воды у кромки положительна);
- Кромка ЛП не перемещается.

Математическое моделирование ледотермического режима реки основывается на методе расщепления по физическим процессам: исходная задача разделяется на фрагменты, каждый из которых описывает отдельные физические явления (гидротермический режим реки, режим ледообразования, динамика кромки ЛП). Для определения динамики толщины ледяного покрова применяется упрощенная модель, основанная на квазистационарном температурном режиме в затвердевшей области. На границе раздела вода-лед выполняется равенство тепловых потоков с учетом скрытой теплоты фазового перехода (условие Стефана).

Для детальных расчетов используются подробные значения метеоданных (среднесуточные значения температуры воздуха, скорости ветра, влажности, атмосферного давления).

При расчете движения воды в реальных условиях необходима схематизация русла водотока. Весь водоток разбивается на отдельные участки, на которых основные характеристики изменяются непрерывно. Для простоты полагаем, что внутри участка геометрические характеристики водотока изменяются по линейному закону. Границей двух участков может быть: 1) скачок расхода; 2) разрыв или резкое изменение геометрических характеристик русла; 3) наличие водпоста. Притоки (оттоки) учитываются в граничных условиях сопряжения для расхода и уровня.

Профиль дна в пределах расчетного участка задается прямолинейным. Сечение русла в заданных створах задается значениями ширины на различных расстояниях от дна. Гидравлические сопротивления принято характеризовать коэффициентом Шези, который зависит от коэффициента шероховатости и гидравлического радиуса.

Температурный режим водных потоков описывается уравнением теплопроводности Фурье – Кирхгофа. В естественных руслах поток турбулизованный, поэтому температура воды в фиксированном

сечении мало изменяется по глубине. В качестве дальнейшего предположения пренебрегают изменением температуры за счет продольной теплопроводности по сравнению с конвективным переносом.

Полный поток тепла через свободную поверхность обычно представляется в виде комбинации составляющих теплового потока: коротковолновой и длинноволновой радиации, потока, связанного с испарением, конвекцией.

Результаты выполненных расчетов на ЭВМ температурного и ледового режимов Енисея в нижнем бьефе Красноярской ГЭС для реальных метеоданных и расходов зимы 1984 –1985 гг., в которых использовались данные о геометрии рассматриваемого участка русла в 47 створах, данные о температуре и

УИГЭС, зима 2005-2006 гг.

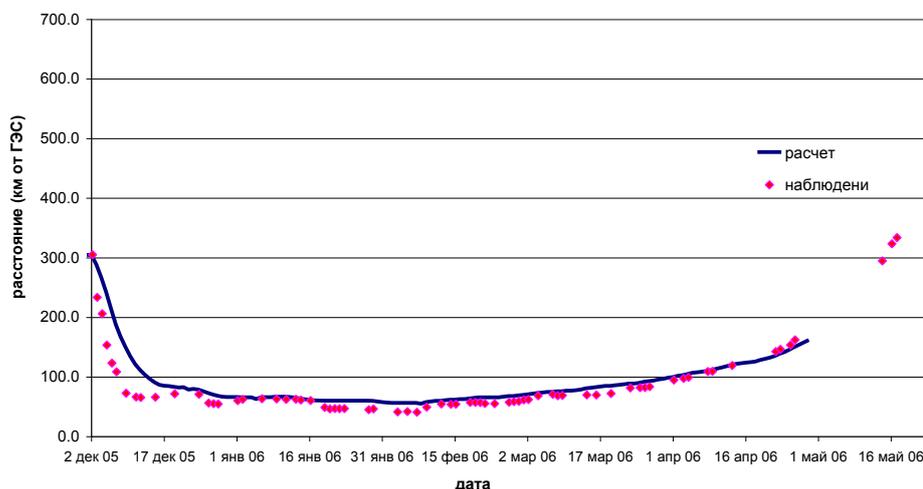


Рис. 1. Динамика кромки льда в нижнем бьефе Усть-Илимской ГЭС (расчетные и натурные данные).

расходе притоков, об уклонах свободной поверхности реки и шероховатости русла, согласуются с данными наблюдений за динамикой полыни в рассматриваемый период [1].

Рассмотренные численные алгоритмы позволяют описать динамику кромки ледяного покрова в нижнем бьефе ГЭС и оценить влияние различных параметров на длину полыни. Так при резких потеплениях и увеличенных расходах возможны подвижки кромки льда, приводящие к заторам и повышению уровней воды. Такие подвижки влияют также на переформирования русла реки.

#### **Натурные данные, необходимые для гидрофизических речных моделей.**

Для теоретических исследований речных систем требуется следующая информация: метеоданные, морфометрические данные, режимы работы ГЭС и характеристики притоков.

Метеорологические данные приводятся для конкретных метеостанций и включают следующие параметры: географическая широта станции, дата, температура воздуха, облачность, атмосферное давление, влажность воздуха, направление и скорость ветра.

Морфометрические данные. Чтобы иметь подробное представление о структуре русла реки, на всем ее протяжении выбираются поперечные сечения русла (створы). Для каждого такого створа определяются значения ширины на различных расстояниях от дна, уклон дна, шероховатость.

Для верификации компьютерной модели были выполнены расчеты длины полыни в нижнем бьефе Усть-Илимской ГЭС. Расчетные данные хорошо согласуются с натурными (рис. 1).

#### **Прогноз ледотермического режима р. Ангара в нижнем бьефе БоГЭС.**

В период, когда температура воды на поверхности понижается до  $0^{\circ}\text{C}$  (ноябрь), начинается ледообразование. Для зимнего периода после образования ледяного покрова температура воды в водохранилище рассчитывается по уравнению теплопроводности с постоянным коэффициентом турбулентного обмена. В таблице 1 приведены значения средней температуры воды на приплотинном участке и средней температуры поверхностного слоя (глубина поверхностного слоя 30 м.). Селективный отбор воды из верхнего слоя возможен для  $Q \leq 2500$  м<sup>3</sup>/сек.

Выполнены расчеты динамики полыни в нижнем бьефе БоГЭС для реальных метеоданных и для различных значений температуры воды, поступающей из водохранилища (в зависимости от глубины водохранилища на приплотинном участке и от положения водозаборных отверстий). Расчеты показали, что для поверхностного водозабора длина полыни сокращается на 10-20 км. В зимний период влияние водохранилища на ледотермический режим реки Ангара в нижнем бьефе БоГЭС распространяется на 20 – 70 км в зависимости от метеословий и условий водозабора (рис. 2).

Таблица 1

Значения рассчитанной средней температуры воды по глубине водохранилища ( $T_{cp}$ ) и средней температуре поверхностного слоя ( $T_{cp\_пов}$ ) на приплотинном участке Богучанского водохранилища (НПУ 208 м) (15-го и 30-го числа месяца)

дата		$T_{cp}$	$T_{cp\_пов}$	дата		$T_{cp}$	$T_{cp\_пов}$
ноябрь	15	3.12	1.64	февраль	15	1.9	1
	30	2.92	1.54		30	1.72	0.9
декабрь	15	2.7	1.43	март	15	1.56	0.82
	30	2.5	1.32		30	1.41	0.74
январь	15	2.29	1.21	апрель	15	1.27	0.67
	30	2.09	1.1		30	1.14	0.6

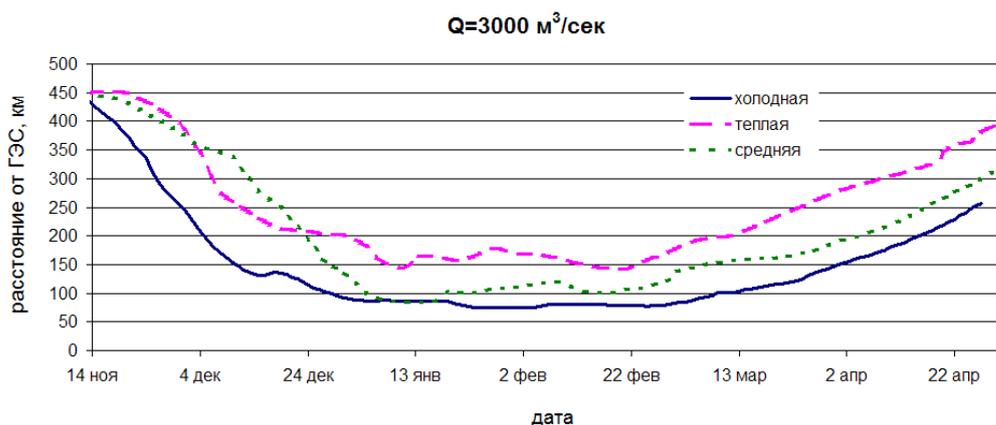


Рис. 2. Длина полыньи для холодной, средней и теплой зим при постоянном расходе.

В летний период для проектных условий водозабора температура воды, сбрасываемой из водохранилища в нижний бьеф, на  $3 - 5^{\circ}\text{C}$  ниже бытовой для НПУ 185.0 м, на  $4-6^{\circ}\text{C}$  ниже бытовой для НПУ 208.0 м. Для поверхностного расположения водозаборных отверстий температура воды, поступающей в нижний бьеф, близка к бытовой ( $14 - 17^{\circ}\text{C}$  в створе плотины БогГЭС и  $19-20^{\circ}\text{C}$  в устье Ангары). Изменения температурного режима в верхнем и нижнем бьефах БогГЭС летом может оказать влияние на водные экосистемы.

#### Расчеты температуры воды в районе г.Енисейска.

Согласно расчетам вода в р. Енисей от Стрелки до г. Енисейска прогревается на  $0.3-0.5^{\circ}\text{C}$  (что согласуется с натурными данными).

Рассмотрим влияние плотины Богучанской ГЭС на температурный режим р.Енисей в районе г.Енисейска. Как показали расчеты, температура воды в р.Ангара в районе Стрелки близка для НПУ 208 м и НПУ 185 м в случае одинаковых способов водозабора (глубинном или поверхностном).

Средняя температура воды в г. Енисейске в случае глубинного водозабора около  $11.5^{\circ}\text{C}$ , в случае поверхностного водозабора –  $14.5-16.5^{\circ}\text{C}$ , что близко к естественному режиму (без Богучанской ГЭС).

#### Прогноз длины полыньи р. Ангара в нижнем бьефе Богучанской ГЭС после возведения Мотыгинской ГЭС.

Расчеты динамики полыньи в нижнем бьефе Мотыгинской ГЭС для реальных метеорологических данных и для различных значений расхода воды показали, что длина полыньи распространяется на 20-40 км (рис. 3).

#### Моделирование температурного режима водохранилища в летний период.

Для Мотыгинской ГЭС (МоГЭС) рассмотрены два варианта плотины: НПУ 129.0 и 127.0 м. Протяженность водохранилища около 230 км. В летний период температурный режим Мотыгинского водохранилища формируется, в основном, в результате теплообмена через свободную поверхность с учетом температуры воды в нижнем бьефе Богучанской ГЭС. Из результатов расчетов следует, что на приплотинном участке формируется термоклин с более высокими значениями температуры воды в поверхностном слое.

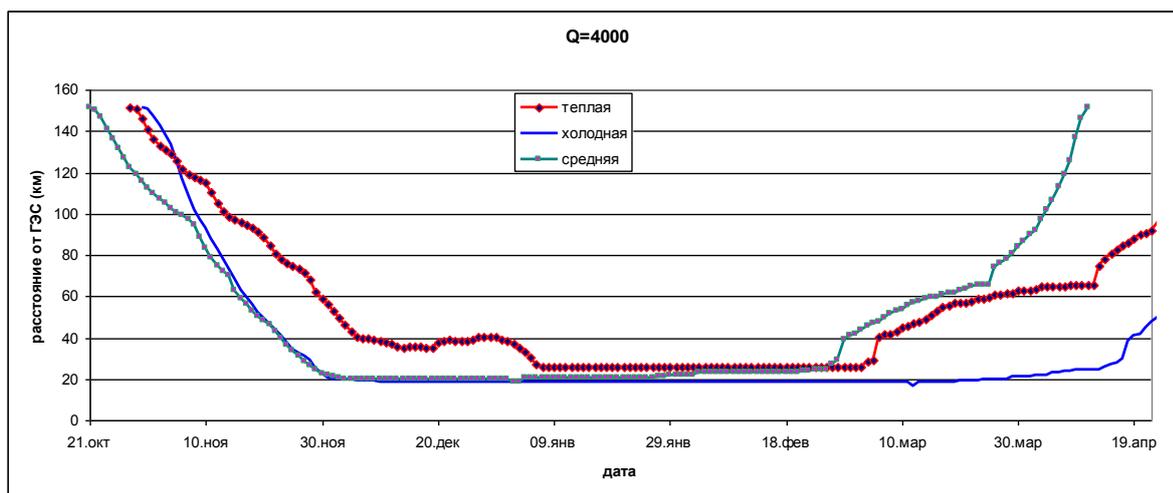


Рис. 3. Динамика полыньи в нижнем бьефе Мотыгинской ГЭС для различных метеоданных.

Выполнена серия расчетов температурного режима проектируемого Мотыгинского водохранилища для летних месяцев: июня, июля и августа по метеорологическим данным для среднего лета. На рисунке 4 приведен пример расчета температуры воды на приплотинном участке водохранилища для НПУ 129.0 м.

Рассчитаны прогнозные значения температуры воды в верхнем слое и средние по глубине температуры на приплотинном участке Мотыгинского водохранилища. Температура воды в поверхностном слое водохранилища будет на 6-11 градусов выше температуры нижнего бьефа БоГЭС до возведения МоГЭС, а температура, средняя по глубине - ниже на 0.3 – 1.7 градуса до августа, а в августе - выше 1.5 – 2.4 градуса, чем рассчитанная для нижнего бьефа Богучанской ГЭС.

По найденным значениям температуры воды в створе плотины Мотыгинской ГЭС рассчитаны распределения температуры воды р. Ангара от плотины до впадения в Енисей в летний период. Расчет проводился для водозабора, забирающего воду со всех слоев. В этом случае температура воды в нижнем бьефе Мотыгинской ГЭС будет ниже, чем рассчитанная температура воды для нижнего бьефа Богучанской ГЭС на 1-2 градуса и, соответственно ниже бытовой 6-10 градусов.

Из результатов расчетов прогноза ледотермического режима нижнего бьефа Мотыгинской ГЭС и температурного режима водохранилища для летнего и зимнего периодов при НПУ 129.0 м следует:

- а) в зимний период полынья ниже плотины Мотыгинской ГЭС распространяется на 20-40 км для проектных условий водозабора;
- б) в летний период для проектных условий водозабора температура воды, сбрасываемой из водохранилища в нижний бьеф, на 1-2оС ниже рассчитанной для нижнего бьефа Богучанской ГЭС;
- в) в летний период в приплотинной зоне водохранилища будет формироваться температурная стратификация.

#### Список литературы

[1] Белолипецкий В.М., Генова С.Н., Туговиков В.Б., Шокин Ю.И. Моделирование задач гидроледотермики водотоков / Сибирское отделение РАН, Институт вычислительных технологий, Вычислительный центр в г. Красноярске, 1993. – 138 с.

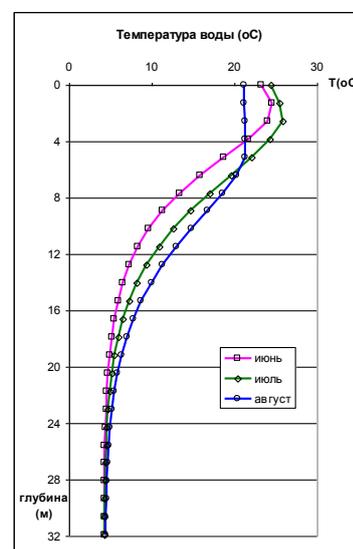


Рис. 4. Рассчитанная температура воды на приплотинном участке водохранилища МоГЭС для второй декады июня, июля, августа.