

# ГИДРОЛЕДОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ В БЬЕФАХ КРАПИВИНСКОГО ГИДРОУЗЛА. ПРОГНОЗ И ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ

А.А. Атавин, А.Т. Зиновьев, А.В. Кудишин

*Строительство Крапивинского гидроузла приведет к изменениям температуры воды и ледового режима на зарегулированном участке р. Томь. Ниже плотины это проявится в понижении температуры воды в летние и появлении полыньи в зимние месяцы. Масштабы данных изменений существенно зависят от объемов и температуры вытекающей из водохранилища воды. Годовая температурная стратификация глубокого водохранилища позволяет использовать селективный водозабор в качестве средства управления ледотермическим режимом реки в нижнем бьефе гидроузла. В статье приведены численные результаты по прогнозу влияния проектируемого гидростроительства на температурный и ледовый режимы реки и оценке возможности минимизации негативных последствий этого влияния с помощью селективного водозабора.*

Прогноз изменений гидротермического и ледового режимов р.Томь в случае создания Крапивинского гидроузла, помимо его важного самостоятельного значения, является тем базисом, на котором основываются оценки качества воды на зарегулированном участке реки, а также оценки климатических изменений как в верхнем, так и в нижнем бьефах гидроузла [1].

Прежде всего кратко коснемся естественного гидроледотермического режима р.Томь в районе строительства [2]. Створ плотины расположен на расстоянии 385 км от устья реки, в 15 км выше по течению от п.Крапивинский. Ежегодный сток реки в Крапивинском створе составляет 23,6 км<sup>3</sup>. Климат региона континентальный с суровой продолжительной зимой и теплым коротким летом. Средняя годовая температура воздуха составляет минус 0,6 °С. Средняя месячная температура июля – плюс 18,5 °С, средняя месячная температура января – минус 19,5 °С. Переход средних суточных температур воздуха через 0 °С происходит во второй декаде апреля весной и третьей декаде октября осенью. Число дней со среднесуточной температурой воздуха выше 0 °С составляет 180-200.

Диапазон колебаний температуры воды р. Томь в Крапивинском створе составляет 0-0,5 °С. Средние даты перехода температуры воды через 0,2 °С в створе Крапивино: осенью – 4/XI, весной – 23/IV. Среднее количество дней с температурой воды выше 0,2 °С равно 170.

Начало ледостава приходится в среднем на вторую декаду ноября. Толщина ледового покрова достигает 1,0 м. Вскрытие реки происходит во второй-третьей декаде апреля. Освобождение реки ото льда совпадает с

развитием половодья и происходит при достаточно толстом льде, почти не разрушенном весенним таянием.

При решении задач окружающей среды и рационального природопользования наибольший интерес представляет прогноз последствий крупномасштабного гидростроительства для участка реки ниже створа плотины. Однако изменение термического и ледового режима в нижнем бьефе гидроузла зависит не только и не столько от величины стока реки (особенно в период зимней межени), сколько от температурной стратификации глубокого водохранилища верхнего бьефа, величины и способа организации попусков в нижний бьеф, метеообстановки в районе строительства.

## ВЕРХНИЙ БЬЕФ

Для прогнозирования гидротермических процессов в термически стратифицированном водохранилище верхнего бьефа используется т.н. одномерная вертикальная модель (схематизация процессов осуществляется путем осреднения параметров по горизонтальным сечениям водохранилища) [3]. В данной модели учитываются гидродинамические особенности входа потока речной воды в стратифицированный по плотности водоем и оттока из него через водоприемные отверстия плотины («селективный водозабор»). Интенсивность вертикального теплообмена определяется с использованием двухпараметрической модели турбулентности. Математическая модель учитывает сезонную работу уровня водохранилища и динамику ледового покрова в зимний период года. Для расчета параметров зоны селективного оттока из водохранилища используется усовер-

шенствованная гидравлическая модель селективного оттока [4]

Результаты расчетов показали, что годовой термический режим проектируемого Крапивинского водохранилища является типичным для глубоких внутренних водоемов средних широт, т.е. будет наблюдаться смена режимов прямой и обратной температурной стратификации, разделенных состояниями весенней и осенней гомотермии. На рис.1 приведен сезонный ход изотерм, рассчитанный по фактическим данным для близкого к среднему по водности 1985/86 гидрологического года (25% обеспеченности). Аналогичные результаты получены в расчетах для многоводного 1979/80 гг. (15% обеспеченности), маловодного 1981/82 гг. (93% обеспеченности), а также маловодного 1901 года, включающего минимальный среднемесячный расход 95% обеспеченности (что соответствует действующим правилам оценки изменений качества воды) [5].

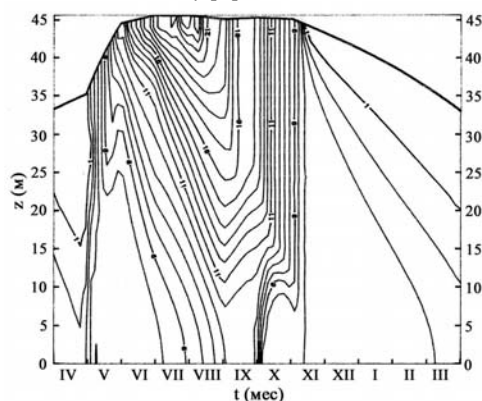


Рис. 1. Временной ход изотерм в Крапивинском водохранилище. 1985/86 гг.

Формирование стратификации в водохранилище существенно влияет на температуру воды, поступающей в нижний бьеф, которая во многом определяет термический и ледовый режимы реки ниже створа плотины. На рис. 2 приведены расчетные годовые распределения среднедекадных значений температуры поверхности водохранилища  $T_{sur}$  и температуры сбрасываемой в нижний бьеф воды  $T_{out}$  для 1985/86 гг. Расчетные значения  $T_{sur}$  выше естественных температур воды в реке в среднем на 4–6 °С и не превышают максимальных значений температуры воды, наблюдаемых в Крапивинском створе. Для сопоставления на рис.2 кривой 3 показаны среднезвешанные по притокам и основному руслу значения температуры притекающей в водохранилище воды  $T_{in}$  за соответствующий гидрологический год. Трансформация тепло-

вого стока реки водохранилищем позволяет говорить об его охлаждающем воздействии на нижний бьеф в летние месяцы и об отепляющем – в осенние месяцы.

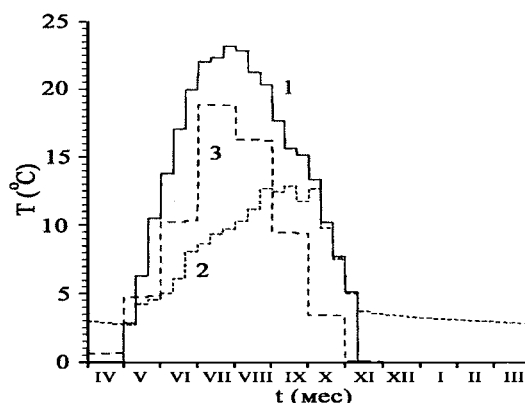


Рис. 2. Температура: 1 – поверхности водохранилища, 2 и 3 – вытекающей и притекающей воды, соответственно. 1985/1986 гг.

Результаты расчетов динамики толщины ледового покрова водохранилища для различных метеоусловий на рис.3 демонстрируют, что ледостав будет ожидать в первой половине ноября, стаивание ледового покрова - в конце апреля-начале мая. Максимальной толщины (1,20-1,25 м) лед достигает во второй половине марта. Это на 0,2 м больше современной средней толщины льда на реке в районе строительства гидроузла. Но в целом картина роста-таяния ледового покрова в районе верхнего бьефа не претерпит значительных изменений после зарегулирования стока как по срокам ледостава, так и по мощности льда.

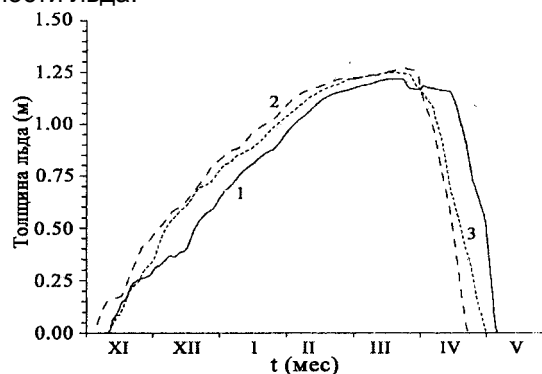


Рис. 3. Толщина льда на водохранилище. 1 – 1979/80 гг., 2 – 1981/82 гг., 3 – 1985/86 гг.

При проектном (придонном) расположении водозаборных отверстий турбинных водоводов диапазон расчетных значений температуры вытекающей воды  $T_{out}$  в июле-августе равен 6-12 °С, что существенно ниже

## ГИДРОЛЕДОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ В БЬЕФАХ КРАПИВИНСКОГО ГИДРОУЗЛА. ПРОГНОЗ И ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ

естественных средних значений температуры р. Томь в соответствующие месяцы. Отметим, что толщина слоя воды, поступающего в водозаборные отверстия, существенно зависит от удельного расхода, то есть от ширины фронта водозабора. В расчетах эти размеры в основном принимались совпадающими со средней шириной водохранилища, изменяющейся по высоте (в качестве средней ширины водохранилища использовалось отношение площади зеркала водохранилища к его длине на соответствующем уровне). Уменьшение ширины фронта с учетом компоновочных особенностей гидроузла до ширины фронта расположения водоприемных отверстий у здания гидроэлектростанции – 76,5 м [6] приводит к увеличению толщины зоны оттока, захвату более теплых (холодных) слоев воды и повышению (понижению) температуры сбрасываемой воды в летний (зимний) период года. Таким образом, приведенные выше значения  $T_{out}$  в диапазоне 6-12 °С оценивают снизу температуру стока из водохранилища в июле-августе при придонном водозаборе.

Вариантные расчеты термического режима проектируемого водохранилища показали, что в летние месяцы минимальные значения температуры сбрасываемой в нижний бьеф воды  $T_{ou}$  в пределах 6-7 °С будут отмечаться в холодные маловодные годы. В теплые и многоводные годы максимальные значения температуры воды в этот же период могут быть 10-12 °С. Зимой величины  $T_{out}$  будут находиться на уровне 2-3 °С.

Улучшить термический режим в нижнем бьефе, приблизив значения  $T_{out}$  к температуре реки в естественных условиях, можно организацией поверхностного водозабора как в летние (июль-август), так и в зимние (январь-март) месяцы года. Не вдаваясь в технические детали возможной реализации поверхностного водозабора (экспериментальное исследование условий реализации поверхностного селективного водозабора выполнено в [7]), можно оценить его влияние на температуру сбрасываемой воды в те месяцы, для которых отмечаются максимальные отличия  $T_{in}$  от  $T_{out}$ . Отметим, что в работе рассматривается идеализированный линейный сток, расположенный на уровне свободной поверхности водохранилища, что дает оценку максимально возможного влияния селективного водозабора на термический и ледовый режим реки в нижнем бьефе.

На рис.4 приведена временная динамика  $T_{out} = T_{out}(t)$  (кривая 1) при функционировании поверхностного водозабора в июле-сентябре

1985/86 гг. Для сравнения здесь же приведены температуры сбрасываемой воды при проектном водозаборе (кривая 2), а также средневзвешенная температура воды реки и притоков  $T_{in}$  (кривая 3). Температура сбрасываемой воды при поверхностном водозаборе повышается до 18-21 °С, что является оценкой сверху. Понижение температуры поверхности водохранилища при этом незначительно (1,0-1,5 °С).

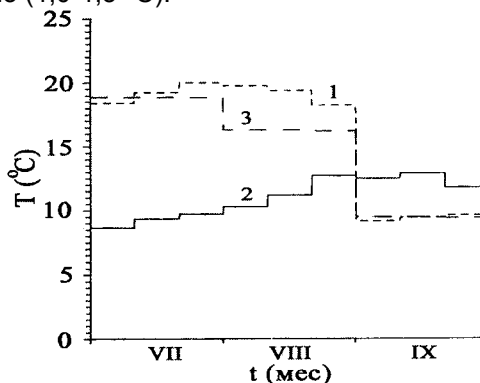


Рис. 4. Температура вытекающей воды при поверхностном (1) и проектном (2) водозаборе. Летний период 1985/86 гг.

Организация поверхностного водозабора в январе-марте понижает температуру вытекающей воды до 1,5-2,0 °С (см. рис.5). В реальных условиях регулирования температуры сбрасываемой воды путем поверхностного водозабора значения  $T_{out}$  будут несколько выше.

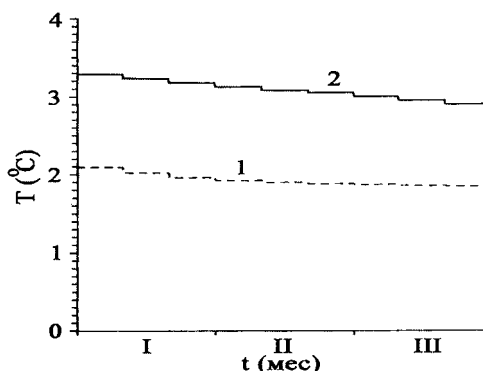


Рис. 5. Температура вытекающей воды при поверхностном (1) и проектном водозаборе (2). Зимний период 1985/86 гг.

При расчете поверхностного водозабора численно исследовано влияние поперечных размеров селективной струи на температуру сбрасываемой воды, для чего дополнительно рассмотрены различные варианты задания ширины водохранилища как функции высоты от дна. В первом случае была задана ширина водохранилища на расстоянии десяти калиб-

ров от створа плотины; в двух других ширина предполагалась постоянной. В одном случае за константу принята максимальная длина сооружений, соответствующая одному из вариантов конструкций поверхностного водозабора и равная 276 м; в другом – длине напорного фронта Крапивинского гидроузла на участке гидроэлектростанции, т.е. 76,5 м [6].

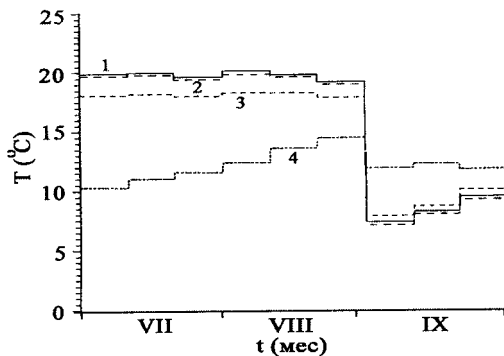


Рис. 6. Влияние ширины селективной струи на температуру вытекающей воды. Летний период 1981/82 гг.

Ожидаемые значения температуры сбрасываемой воды для условий 1981/82 гг. для разных вариантов задания ширины селективной струи приведены на рис.6. Кривой 1 показано распределение  $T_{out}$ , рассчитанное в предположении совпадения ширины селективной струи со средней шириной водохранилища. Кривые 2-4 отвечают ширине струи, равной ширине водохранилища на расстоянии 450 м от плотины (10 калибров), проектируемой ширине поверхностного водозабора и ширине напорного фронта гидроэлектростанции (76.5 м), соответственно. Понижение  $T_{out}$  связано с вовлечением в селективное истечение придонных (наиболее холодных) слоев воды. В итоге наиболее узкая струя обеспечивает наименьшую температуру сбрасываемой воды, что дает оценку снизу эффективности технической реализации селективного водозабора в летний период года.

Аналогичная ситуация наблюдается и в зимний период года (рис. 7), когда наиболее узкой струе соответствует наиболее высокая температура вытекающей воды. Нумерация кривых на рис. 7 соответствует принятой нумерации на рис. 6.

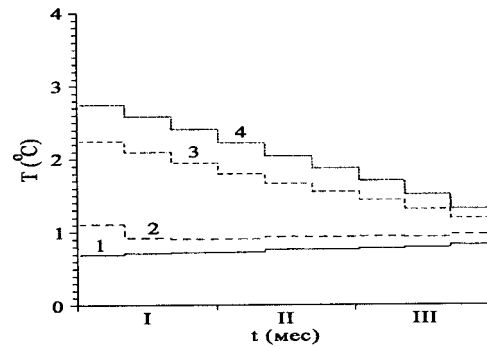


Рис. 7. Влияние ширины селективной струи на температуру вытекающей воды. Зимний период 1981/82 гг.

Полученные в расчетах значения температуры сбрасываемой из водохранилища воды использованы в качестве входной информации при моделировании термического и ледового режима нижнего бьефа.

### НИЖНИЙ БЬЕФ

При описании гидротермического режима зарегулированного участка реки ниже Крапивинского створа, характеризующегося отсутствием путевых притоков, использовалась одномерная горизонтальная гидротермическая модель водотока [8]. При расчетах динамики ледового покрова в нижнем бьефе гидроузла предполагалось линейное изменение температуры по толщине льда.

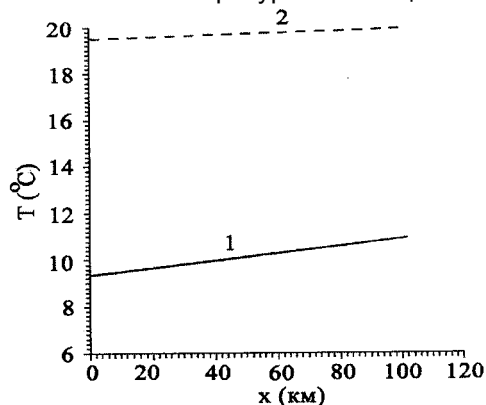


Рис. 8. Температура воды в нижнем бьефе Крапивинского гидроузла на 30.07.85 при проектном (1) и поверхностном (2) водозаборе

Распределения температуры воды на 30 июля 1985 г. по длине нижнего бьефа при разных реализациях водозабора из водохранилища приведены на рис.8. Отметим, что

## ГИДРОЛЕДОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ В БЬЕФАХ КРАПИВИНСКОГО ГИДРОУЗЛА. ПРОГНОЗ И ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ

температура воды в створе плотины ( $x=0$ ) равна температуре сбрасываемой из водохранилища воды.

На рис. 9 приведены значения температуры воды в створе Металлоплощадка как в естественных условиях (кривая 1), так и при зарегулировании стока (кривые 2-4) для условий 1985/86 гг. Кривые 3 и 4 отвечают поверхностному водозабору при максимальной и минимальной длине фронта водозабора (случаи 1 и 4 на рис. 6).

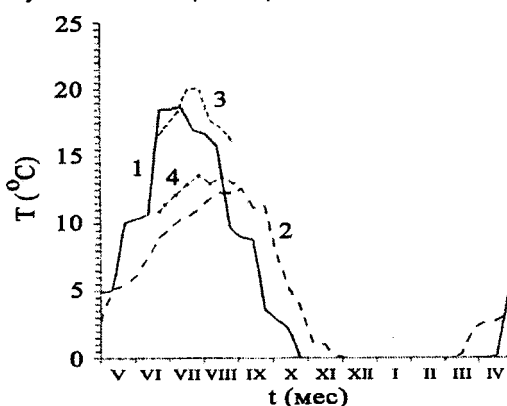


Рис. 9. Температура воды в створе "Металлоплощадка" в бытовых условиях (1), для проектного (2) и поверхностного (3,4) водозабора. 1985/86 гг.

При реализации поверхностного водозабора в июле-августе температура воды в расчетном створе может на 1,0-1,5 °С превысить температуру в естественных условиях (используются максимальные оценки температуры сбрасываемой в нижний бьеф воды).

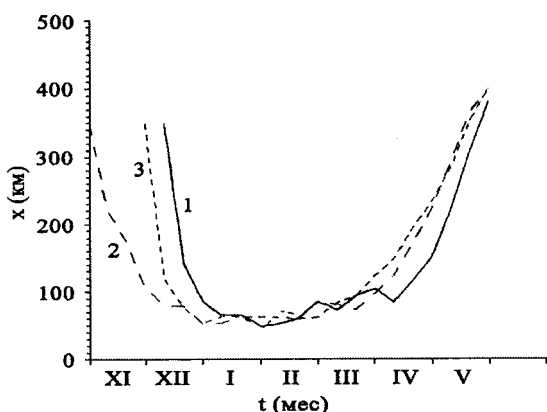


Рис. 10. Положение кромки льда: 1 — 1985/86 гг., 2 — 1981/82 гг., 3 — 1979/80 гг.

Рассмотрен вопрос о длине полыньи в нижнем бьефе гидроузла. На рис. 10 приведены расчетные значения этой длины  $x_{кр}$  в зимние периоды расчетных лет. Из расчетов температуры сбрасываемой в нижний бьеф

воды следует, что при проектном водозаборе наибольшие значения  $T_{out}$  в зимний период отмечаются в 1985/86 гг. Комбинирование этих значений  $T_{out}$  с метеоусловиями в нижнем бьефе по всем трем расчетным годам позволяет оценить максимальные размеры полыньи в зимние месяцы (см. рис. 10).

Результаты расчетов длины полыньи для случая реализации поверхностного водозабора (рис.11) показывают, что поверхностный водозабор дает принципиальную возможность уменьшить длину полыньи с 60-80 км до 20-40 км (для рассмотренных фактических метеоусловий).

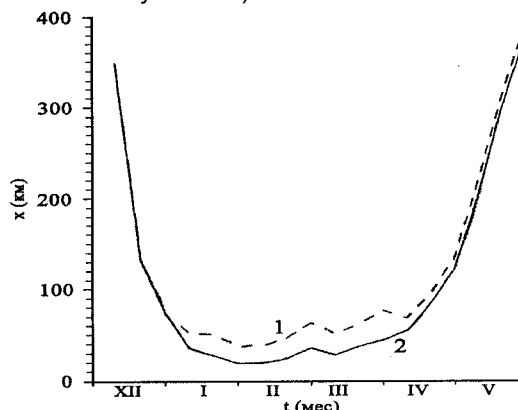


Рис. 11. Положение кромки льда при проектном (1) и поверхностном (2) водозаборе. 1985/86 гг.

### ВЫВОДЫ

Проектируемое Крапивинское водохранилище будет иметь четко выраженную прямую и обратную стратификацию между периодами весенней и осенней гомотермии, что является характерным для глубоких внутренних водоемов средних широт.

Температура сбрасываемой в нижний бьеф воды в летний период года составит 6-12 °С, а в зимние месяцы — 2-3 °С при проектном (придонном) расположении водозаборов турбинных водоводов.

В летние месяцы (июль-август) температура воды в районе г. Кемерово составит 10-14 °С против 18-20 °С в естественных условиях.

Ледовая обстановка в районе верхнего бьефа незначительно изменится по сравнению с естественной на р. Томь в створе Крапивино как по срокам ледостава, так и по мощности льда. Стаивания ледового покрова на водохранилище следует ожидать в первой декаде мая.

В зимние месяцы ниже створа плотины будет полынья, размеры которой в январе-

марте составят 60-80 км.

При реализации поверхностного водозабора из водохранилища температура реки в районе г. Кемерово может повыситься в июле-августе до 16-18 °С, что находится в диапазоне колебания естественных температур реки. В зимние месяцы изъятие воды из поверхностных слоев водохранилища может уменьшить размеры полыньи до 20-40 км.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-22.2003.5.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vasiliev, O.F., Sukhenko, S.A., Atavin, A.A., Zinoviev, A.T., Papina, T.S., Savkin, V.M. Water use and water quality in the Tom river basin in the West Siberia at the proposed water management project // Industrial and Agricultural Impact on the Hydrologic Environment. V. 5: Water Management and Protection (Eds. Y.Eckstein and A.Zaporozec). Proceeding of the Second USA/CIS Joint Conference on Environmental Hydrology and Hydrogeology, Washington, D.C., USA, May 16-21, 1993. – P. 45-48.
2. Атавин А.А., Орлова Г.А., Савкин В.М. Современная и перспективная водно-ресурсная ситуация на реке Томи и ее водосборном бассейне // Обской вестник. – 1999. – № 3-4. – С. 62-68.
3. Васильев О.Ф., Бочаров О.Б., Зиновьев А.Т. Математическое моделирование гидротермических процессов в глубоких водоемах // Гидротехническое строительство. – 1991. – № 7. – С. 3-5.
4. Бочаров О.Б., Зиновьев А.Т. Влияние селективного водозабора на годовой термический режим глубокого водоема // Водные ресурсы. – 1992. – № 5. – С. 52-59.
5. Правила охраны поверхностных вод. 1993.
6. Крапивинский гидроузел на р. Томь. Селективный водозабор. Научно-техническое обоснование. Книга 1. – Алма-Ата: ГНИКНИО ЭНЕРГОПРОЕКТ, 1991. – 85 с.
7. Отчет о научно-исследовательской работе НИР «Поверхностный селективный водозабор. Часть 2». – Новосибирск: ИГ СО АН СССР, 1991. – 81 с.
8. Atavin A.A., Kudishin A.V., Zinoviev A.T. Mathematical modeling of hydrotechnical construction impact on hydrothermal and ice cover behavior of river // Advances in Hydro-Science and Engineering. Edited by Sam S.Y. Wang. Washington. – 1993 – V. 1, Part A. – P. 1019-1024.