

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА МОШКОВИЧЕВСКОГО ЗАЛИВА ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА КАК ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ

Г.А. Саминский

Институт водных проблем РАН
Ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333

Численное трехмерное моделирование Мошковичевского залива Иваньковского водохранилища позволяет оценить влияние теплового сброса Конаковской ГРЭС и различных направлений ветра на термогидродинамическую структуру залива.

Ключевые слова: моделирование, термогидродинамика, водные объекты.

В настоящее время существует много работ, посвященных моделированию различных процессов в водных объектах, в том числе тех, которые определяют качество воды. Вместе с тем исследования термодинамического режима водных объектов, принимающих подогретые воды с энергетических объектов, достаточно редки.

Иваньковское водохранилище (рис. 1), расположенное на границе Московской и Тверской областей, является водохранилищем комплексного использования и относится к долинному типу. Основные морфометрические характеристики водоема при НПУ (124,00 м БС) следующие: площадь водной поверхности — 327 км^2 ; объем — $1,12 \text{ км}^3$, полезный объем — $0,813 \text{ км}^3$, резервный объем — $0,070 \text{ км}^3$; средняя глубина — 3,4 м, наибольшая глубина — 19 м; наибольшая ширина — 8 км [1].

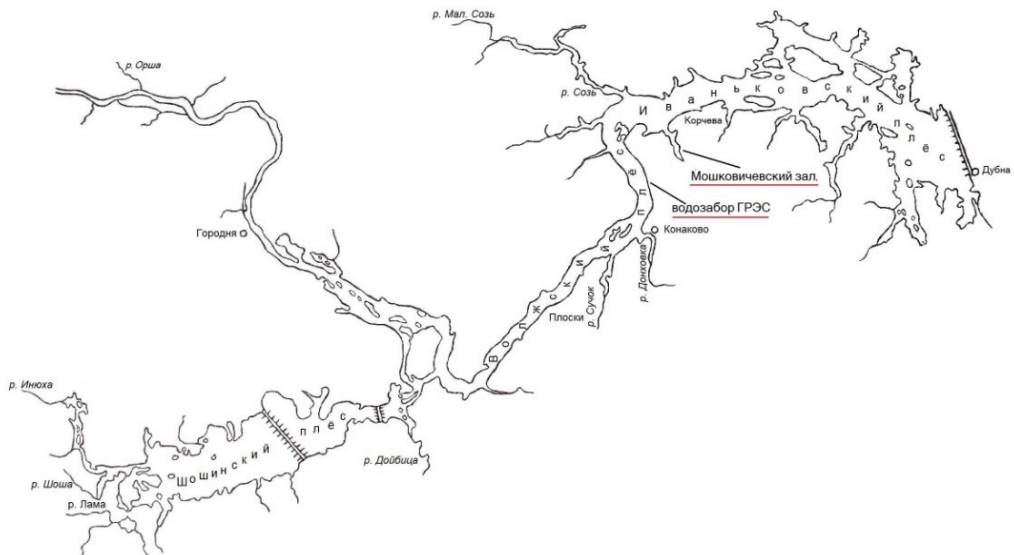


Рис. 1. Схема Иваньковского водохранилища; положение водозабора Конаковской ГРЭС и Мошковичевского залива

Наиболее интересной частью Иваньковского водохранилища является Мошковичевский залив, в южную оконечность которого осуществляется сброс подогретых вод Конаковской ГРЭС. Особенности современного термического и гидродинамического режима залива представляют научный и практический интерес. Важной задачей остается определение степени влияния Конаковской ГРЭС на термогидродинамический режим залива. Кроме того, не ясен характер влияния различных направлений ветра на термику и динамику течений в заливе.

Для решения поставленных задач использовалась глобальная эстуарийная модель переноса (General Estuarine Transport Model — GETM). GETM [2] — трехмерная численная модель для описания термодинамических и гидродинамических процессов в природных водах. Для расчетов с использованием данной модели необходимо иметь данные о глубинах водного объекта в узлах регулярной сетки, метеоданные (температура воздуха, температура точки росы, давление, общая облачность, скорость и направление ветра), данные о расходах источников (если они есть).

Для построения численной модели Мошковичевского залива летом 2010 и летом 2011 г. проводились натурные измерения глубины, температуры поверхности воды, объемов сброса и температуры сбросных вод с ГРЭС. Всего было выполнено 523 измерения глубины и температуры воды, при этом в течение августа 2010 г. измерения были сделаны на 193 точках, а 26 августа 2011 г. еще 330 измерений. Кроме того, использовались данные метеонаблюдений на метеостанции г. Тверь. Температура сбросной воды составляет 29 °С.

Валидация модели по данным измерений поверхностной температуры воды 26 августа 2011 г. (рис. 2) показывает удовлетворительное описание термического режима Мошковичевского залива: среднеквадратическая ошибка $m = 0,8$ °С, относительная средняя квадратическая ошибка составила $\delta = 3\%$. Это свидетельствует об успешности полученной численной модели Мошковичевского залива, что позволяет опираться на нее при анализе термического режима данного залива.

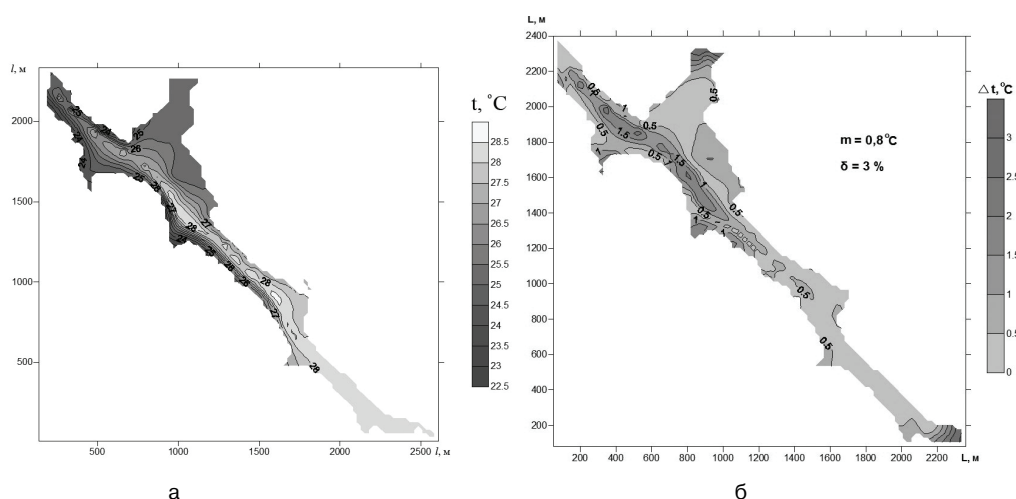


Рис. 2. Измеренная 26 августа 2011 г.: поверхностная температура воды (а) и разница между рассчитанной по модели и измеренной температурой воды (б)

Термогидродинамический режим Мошковичевского залива в современном состоянии вполне достоверно отражает рис. 3.

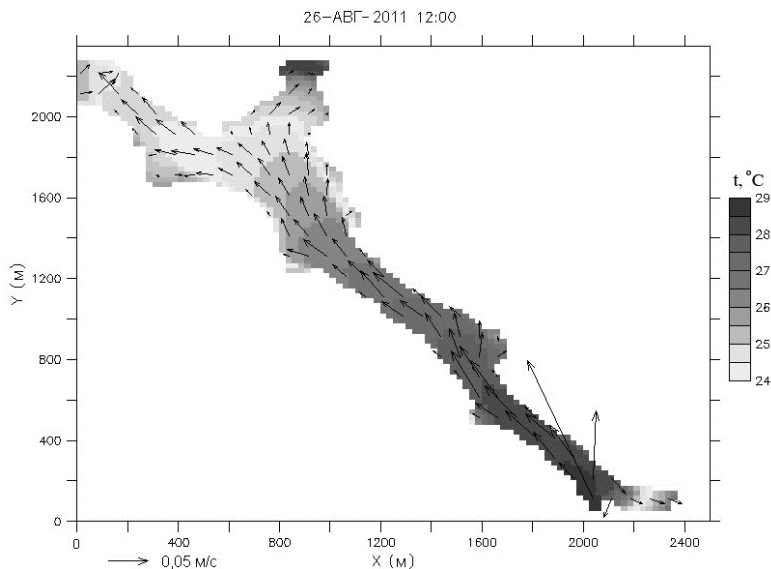


Рис. 3. Распределение скоростей в Мошковичевском заливе летом 2011 г.

Скорости течения наиболее велики в южной части залива, где они достигают 10—12 см/с и до 20 см/с непосредственно у водосброса. В центральной части залива скорость течения снижается и составляет 5—7 см/с. В приустьевой части Мошковичевского залива скорости течения еще ниже и изменяются в пределах 1—4 см/с.

Температура поверхности залива постепенно уменьшается от места сброса подогретых вод ГРЭС к месту его впадения в Иваньковское водохранилище. В южной части залива она составляет 28—29 °С, в центральной она ниже на 1—2 °С и составляет 26—27 °С. В приустьевой зоне температура поверхности воды ниже температуры воды у водовыпуска на 3—5 °С, составляет 23—26 °С. Такой характер изменения температуры поверхности воды вдоль залива наблюдается в течение всего периода моделирования 2010 и 2011 гг.

Распределение температуры воды по глубине также изменяется вдоль залива. В южной части Мошковичевского залива (рис. 4 а) наблюдается гомотермия, вызванная интенсивным перемешиванием вследствие близости сброса подогретых воды с ГРЭС и относительно высокими скоростями течения. В центральной части залива (рис. 4 б), наблюдается прямая температурная стратификация с амплитудой температуры воды около 1 °С. Наиболее подогретые воды наблюдаются в приповерхностном слое толщиной 1,5 м; слой температурного скачка наблюдается между 1,5 и 2,5 м глубины. В приустьевой части залива наблюдается прямая температурная стратификация; амплитуда температуры здесь составляет 2 °С. Наибольшие градиенты температуры по глубине расположены между 0,5 и 1,5 м глубины.

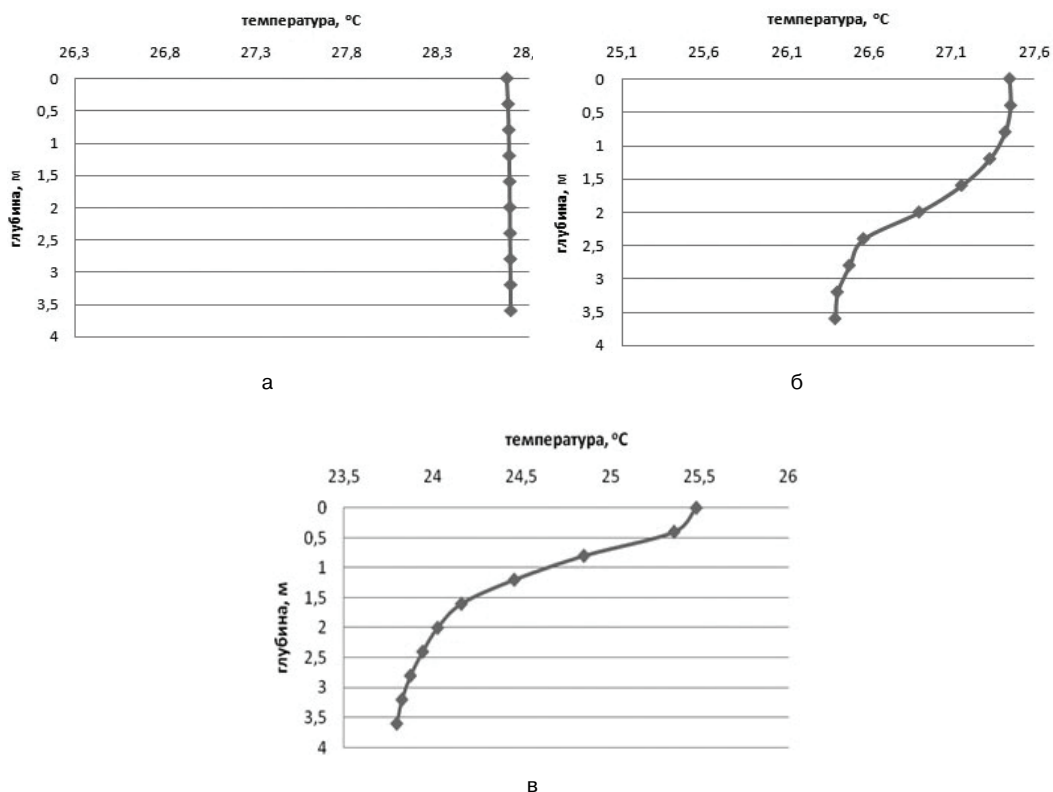


Рис. 4. Изменение температуры воды по глубине в августе 2011 г. в южной (а), центральной (б), приустьевой (в) зонах Мошковичевского залива по данным моделирования

Проведенный модельный эксперимент показал, что при гипотетическом отсутствии теплового влияния Конаковской ГРЭС термогидродинамический режим Мошковичевского залива заметно отличается от существующего.

При отсутствии теплового сброса с ГРЭС скорости течения в Мошковичевском заливе не превышают 1—2 см/с и вызваны ветром. Температура поверхности воды в заливе при похолодании уменьшается с севера на юг, а в периоды потепления увеличивается с севера на юг. Это обусловлено более интенсивной реакцией на изменение метеорологической обстановки относительно более мелкой южной частью залива. Распределение температуры воды по вертикали также отличается (рис. 5). В южной и центральной частях наблюдается слабо выраженная прямая стратификация с амплитудой температуры воды 0,2 и 0,3 °C соответственно. В приустьевой части амплитуда температуры воды превышает 2 °C, а наибольшие градиенты температуры воды находятся на глубине 0,5—1 м.

Среди факторов влияющих на термический режим Мошковичевского залива, можно выделить такие: температура сбросной воды с Конаковской ГРЭС; объемы сброса подогретых вод; относительная влажность; скорость ветра; направление ветра.

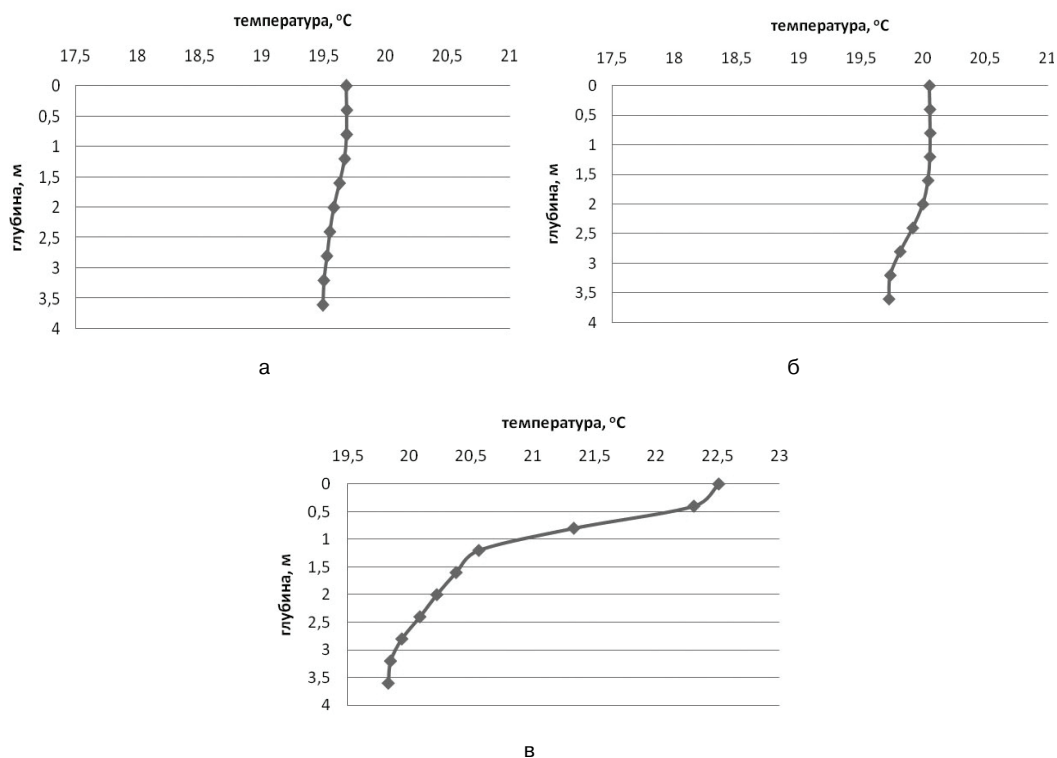


Рис. 5. Изменение температуры воды по глубине в августе 2011 г. в южной (а), центральной (б), приустьевой (в) зонах Мошковичевского залива по данным моделирования при отсутствии теплового сброса с ГРЭС

Влияние большинства этих факторов на термический режим водоема-охладителя хорошо изучено. Влияние направления ветра на термический режим водоема-охладителя уникально для каждого водного объекта. Оно зависит от конкретных морфометрических характеристик, характеристик земной поверхности, прилегающей к водоему. Наилучшим способом изучения термического режима водоема-охладителя при разном направлении ветра является моделирование термического режима данного водного объекта. Оно позволяет нивелировать влияние других факторов на термику водохранилища и сфокусироваться на изучении влияния только ветрового воздействия.

Для изучения влияния направления ветра на термический режим Мошковичевского залива использовалась модель GETM, адаптированная к условиям данной части водоема-охладителя. Чтобы нивелировать самые важные факторы, определяющие термический режим залива, во время всех модельных экспериментов задавалась одна и та же температура сбросной воды 25 °C и один и тот же объем сброса 10 м³/с; кроме того, для всех экспериментов скорость ветра на протяжении всего периода моделирования задавалась равной 5 м/с. В модельных экспериментах использовались погодные условия с температурой воздуха различной обеспеченности.

Изучались различия термического режима Мошковичевского залива при северном, южном, западном и восточном ветрах. Для каждого направления ветра

проводился расчет в течение 9 дней при постоянных погодных условиях в течение всего периода моделирования. Таким образом, для одних и тех же погодных условий изучалось влияние различных направлений ветра.

Погодные условия были выбраны по следующему принципу. Данные всех срочных метеонаблюдений по м/с г. Тверь за июнь, июль и август 2010 и 2011 гг. были ранжированы по температуре воздуха. В результате была получена кривая обеспеченностей летней температуры воздуха за два года (рис. 6). Далее были выбраны сроки наблюдений с максимальной обеспеченностью (99,9%), минимальной обеспеченностью (0,068%), близкой к 25% (24,94%), к 50% (49,97%) и к 75% (74,95%) обеспеченностями (табл. 1). Набор метеоданных по каждому сроку был использован для четырех модельных экспериментов, в каждом из которых скорость ветра равнялась 5 м/с, а направление ветра было для каждого эксперимента «своим»: северным, южным, западным или восточным. Всего было проведено 20 модельных экспериментов.

Таблица 1

Метеонаблюдения на станции Тверь различной обеспеченности по температуре воздуха

$T, ^\circ\text{C}$	$T_d, ^\circ\text{C}$	N , баллы	P , Па	P_{ij} , %
38,6	8,1	1	102 106,7	0,068353
26,6	18,1	0	101 640	24,94874
20,2	16,9	0,1	101 973,3	49,96582
15,8	4,5	0,9	101 960	74,94874
4,6	4,1	0,9	100 108	99,93165

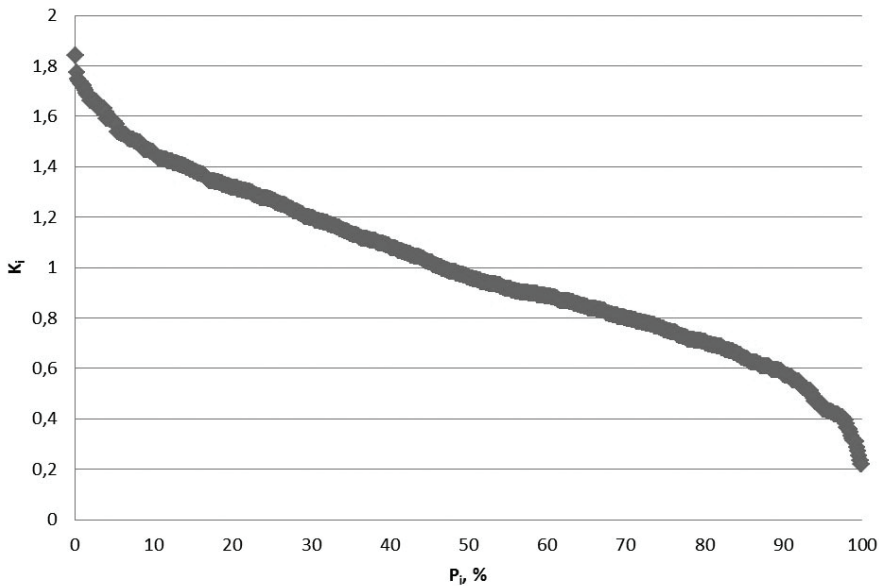


Рис. 6. Кривая обеспеченности температуры воздуха по срочным измерениям на метеостанции г. Тверь в июне, июле и августе 2010 и 2011 гг.:

K_i — модульные коэффициенты, P_i — обеспеченность по Крицкому—Менкелю

Анализ результатов моделирования (табл. 2) показывает, что влияние направления ветра на среднюю температуру воды Мошковичевского залива чрезвычайно мало и находится в пределах точности вычислений. Тем не менее в целом западные и северные ветры более благоприятны для охлаждения Мошковичевского залива.

Таблица 2

**Средняя температура Мошковичевского залива
при различных метеорологических условиях и разных направлениях ветра**

УНС*	1	2	3	4	5
$P_p, \%$	0,068	24,95	49,97	74,95	99,93
$T(N)$	27,06	27,3	26,04	23,18	21,47
$T(E)$	27,07	27,31	26,14	23,22	21,47
$T(S)$	27,13	27,34	26,19	23,43	21,73
$T(W)$	27,07	27,29	26,03	23,24	21,57
ΔT_{\max}	0,06	0,05	0,16	0,25	0,26

*УНС — условный номер срока наблюдений данной обеспеченности.

При различных погодных условиях можно выделить общие особенности влияния направления ветра на термический режим Мошковичевского залива. Температурное поле поверхностной воды в центральной и южной зонах Мошковичевского залива почти не изменяется при любых направлениях ветра. Основные различия наблюдаются в приустьевой зоне.

Поверхностная температура воды в заливе относительно более высокая при южном и при восточном ветре. При западном ветре температура поверхности Мошковичевского залива наименьшая. Это связано с направлением залива с юго-востока на северо-запад — южные и восточные ветры способствуют распространению подогретых вод Конаковской ГРЭС по поверхности залива, а западные и северные препятствуют этому, что приводит к снижению температуры воды в приустьевой зоне.

При восточном ветре в приустьевой зоне наблюдается нагон к юго-западному берегу залива, а при южном — нагон к северо-восточному берегу залива, что приводит к соответствующему повышению температуры воды у юго-западного берега при восточном ветре и у северо-восточного берега при южном ветре.

Численная трехмерная модель Мошковичевского залива удовлетворительно отражает термические и гидродинамические процессы в данной части Ивановского водохранилища. Сброс подогретых вод Конаковской ГРЭС в Мошковичевский залив полностью изменил его термогидродинамическую структуру. Наличие сброса с теплоэлектростанции увеличивает скорости в заливе в 2—10 раз; повышает температуру воды на 7—8 °С; уменьшает амплитуду температуры воды в южной и приустьевой частях залива и увеличивает ее в центральной части Мошковичевского залива. При существующих объемах сбросов подогретых вод с ГРЭС, скорости течения постепенно уменьшаются от 20 см/с в верхней части залива до 1—4 см в устьевой его части. Влияние направления ветра несущественно сказывается на охлаждающей способности Мошковичевского залива в целом. Однако изменения заметны для отдельных участков залива. Так, приустьевая зона достаточно сильно охлаждается при западных и северных ветрах; повышенные температуры наблюдаются в ней при восточном и южном ветрах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Иваньковское водохранилище и его жизнь*. — Л., 1987.
- [2] *Richard Hofmeister, Hans Burchard, Karsten Bolding*. A three-dimensional model study on processes of stratification and de-stratification in the Limfjord // *Continental Shelf Research* 29 (2009) 1515—1524.

THE MODELING OF THE THERMOHYDRODYNAMIC REGIME OF MOSHKOVICHEVSKI BAY OF IVANKOVSKOYE RESERVOIR AS WATER COOLER

G.A. Saminsky

Water Problems Institute RAS
Gubkina str., 3, Moscow, Russia, 119333

Numerical three-dimensional modeling of Moshkovichevsky bay of Ivankovskoye reservoir allows to estimate the influence of thermal inflow of the electric power station Konakovskaya and different wind directions to thermohydrodynamic structure of the bay.

Key words: modeling, thermohydrodynamic, object of water.