

А.Б. Китаев, Д.Е. Клименко, О.В. Ларченко

СКОРОСТНОЙ РЕЖИМ РАЙОНА ПЕРЕМЕННОГО ПОДПОРА КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И ЕГО ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СВЯЗИ С СОЗДАНИЕМ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ОБЪЕКТА*

Пермский государственный университет, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, e-mail: hydrology@psu.ru

Рассмотрен режим скоростей течения в верхней части Камского водохранилища, где предполагается создание хозяйственного объекта в виде площадки разведочно-поисковых скважин. Построен план скоростей течения в современных условиях при отсутствии и наличии площадки скважин, соединенных дамбой с берегом; дана оценка изменения обмена вод в новых условиях.

К л ю ч е в ы е с л о в а: водохранилище; скорости течения; план течений; обмен вод.

Скоростной режим

В изучаемой части водоема наиболее развиты проточные и ветровые течения. Наибольшие скорости течения наблюдаются на участке Тюлькино–Березники. В период весеннего наполнения водохранилища значения скоростей течения здесь приближаются к речным. По материалам В.М. Матвеева [5] фактические скорости течения в мае изменялись от 1,2 до 1,88 м/с, а в конце июня составляли 0,40-1,00 м/с. В остальные летне-осенние месяцы после наполнения водохранилища до НПГ на этом участке формируются подпорные уровни, вызывающие значительное уменьшение уклонов, а соответственно и сокращение скоростей течения. Их величина находилась в пределах 0,1-0,4 м/с. В отдельные годы при прохождении больших дождевых паводков скорость течения в сентябре возрастала до 1,0 м/с (табл. 1). Но уже в октябре скорости течения в районе выклинивания подпора заметно убывают. Естественный приток по рекам Каме и Вишере, а также положение подпорных уровней полностью определяют режим скоростей течения в верхнем районе Камского водохранилища. Таким образом, на участке переменного подпора преобладающим является проточное течение, которое «идет» транзитом от п. Керчевский до г. Березники. Оно характеризуется четко выраженной сезонной изменчивостью и постоянно по направлению.

Таблица 1

Скорости поверхностного течения в различные месяцы навигации на участке Камского водохранилища Тюлькино-Березники за многолетний период, м/с [5]

Скорость	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Средняя	1,43	0,77	0,32	0,26	0,44	0,42
Наибольшая	1,92	1,87	0,42	0,45	1,00	0,47
Наименьшая	0,57	0,39	0,19	0,07	0,18	0,29

Скоростной режим любого естественного или искусственного водоема целесообразнее всего оценивать по материалам фактических измерений скоростей течения. Однако на камских водохранилищах такие материалы имеются лишь за весьма короткий период времени – с конца 50-х до начала 70-х гг. прошлого столетия – и в основном относятся к навигационному периоду. Измерений скоростей течения, приуроченных к фазе зимней сработки водоема и периоду его весеннего наполнения, практически нет. К тому же даже в летне-осенний период фактические

© Китаев А.Б., Клименко Д.Е., Ларченко О.В., 2010

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 10-05-96052_p_урал_a

материалы не характеризуются большой густотой как по длине водоема, так и по его ширине. В исследуемом нами районе водоема таких измерений практически нет (за исключением вышеприведенных). Данное обстоятельство обусловило необходимость оценить особенности скоростного режима изучаемых водоемов путем расчета среднемесячных величин скоростей проточного течения вначале на границах морфометрических участков водохранилищ [2; 3], используя для этого величины расходов воды и площади живого сечения, а далее – внутри каждого морфометрического участка по густой сети разрезов.

Такой подход к оценке скоростей проточных течений на Камском водохранилище позволил выявить наиболее общие черты пространственно-временных изменений этих течений. Внутригодовой ход скоростей проточного течения (V_v) аналогичен другим годовым показателям динамики вод водоемов и характеризуется четко выраженными фазами:

- период весеннего наполнения с максимальными в году величинами V_v ;
- летне-осенний период;
- период зимней сработки.

Летом и зимой скорости проточного течения почти одинаковы, но заметно ниже, чем во время прохождения весеннего половодья. В многолетнем периоде максимальные V_v отмечаются в многоводные годы, минимальные – в маловодные. В мае многоводного года в створе Тюлькино V_v составил 1,91 м/с, в средний по водности год – 1,22 м/с, а в маловодный год – 0,86 м/с (табл.2, рис. 1).

В зимнее время скорости проточного течения в районе выклинивания подпора Камского водохранилища заметно ниже: в средний по водности год в феврале в створе Тюлькино V_v составил всего 0,13 м/с. Поскольку наибольшая часть расхода проходит через меньшую по площади глубоководную часть сечений, то скорости в ней заметно выше средних по сечению. Учитывая, что мелководная часть характеризуется малыми величинами скоростей проточного течения, ее можно считать малопроточной (водообмен в этой части водоема осуществляется во многом за счет ветровых течений, волнения и т.д.).

Для района проектируемой площадки наиболее значимыми являются и проточные, и ветровые течения, т. е. суммарные течения. Их скорость и направление не только будут зависеть от общей тенденции направления проточного течения, но и во многом определяться направлением и скоростью ветра.

Таблица 2

**Среднемесячные осредненные по сечению скорости проточного течения на Камском водохранилище
в характерные по водности годы, м/с**

Створ	М е с я ц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
М н о г о в о д н ы й г о д												
Тюлькино	0,16	0,13	0,12	0,19	1,91	1,07	0,33	0,43	0,32	0,45	0,36	0,14
Соликамск	0,22	0,24	0,29	0,47	2,79	1,31	0,39	0,50	0,39	0,56	0,45	0,18
Березники	0,09	0,15	0,24	0,34	0,91	0,33	0,09	0,12	0,09	0,13	0,11	0,05
Быстрая	0,08	0,08	0,11	0,18	1,13	0,31	0,08	0,10	0,08	0,12	0,09	0,05
М а л о в о д н ы й г о д												
Тюлькино	0,13	0,12	0,13	0,53	0,86	0,33	0,32	0,31	0,21	0,26	0,37	0,18
Соликамск	0,17	0,19	0,26	0,90	1,14	0,36	0,37	0,36	0,26	0,31	0,45	0,21
Березники	0,05	0,09	0,17	0,40	0,31	0,09	0,08	0,08	0,06	0,07	0,10	0,06
Быстрая	0,05	0,07	0,10	0,36	0,30	0,08	0,08	0,08	0,06	0,07	0,09	0,06

Примечание. Указанные в таблице створы соответствуют границам морфометрических участков, выделенных по схеме районирования Ю.М. Матарзина и И.К. Мацкевича [4].

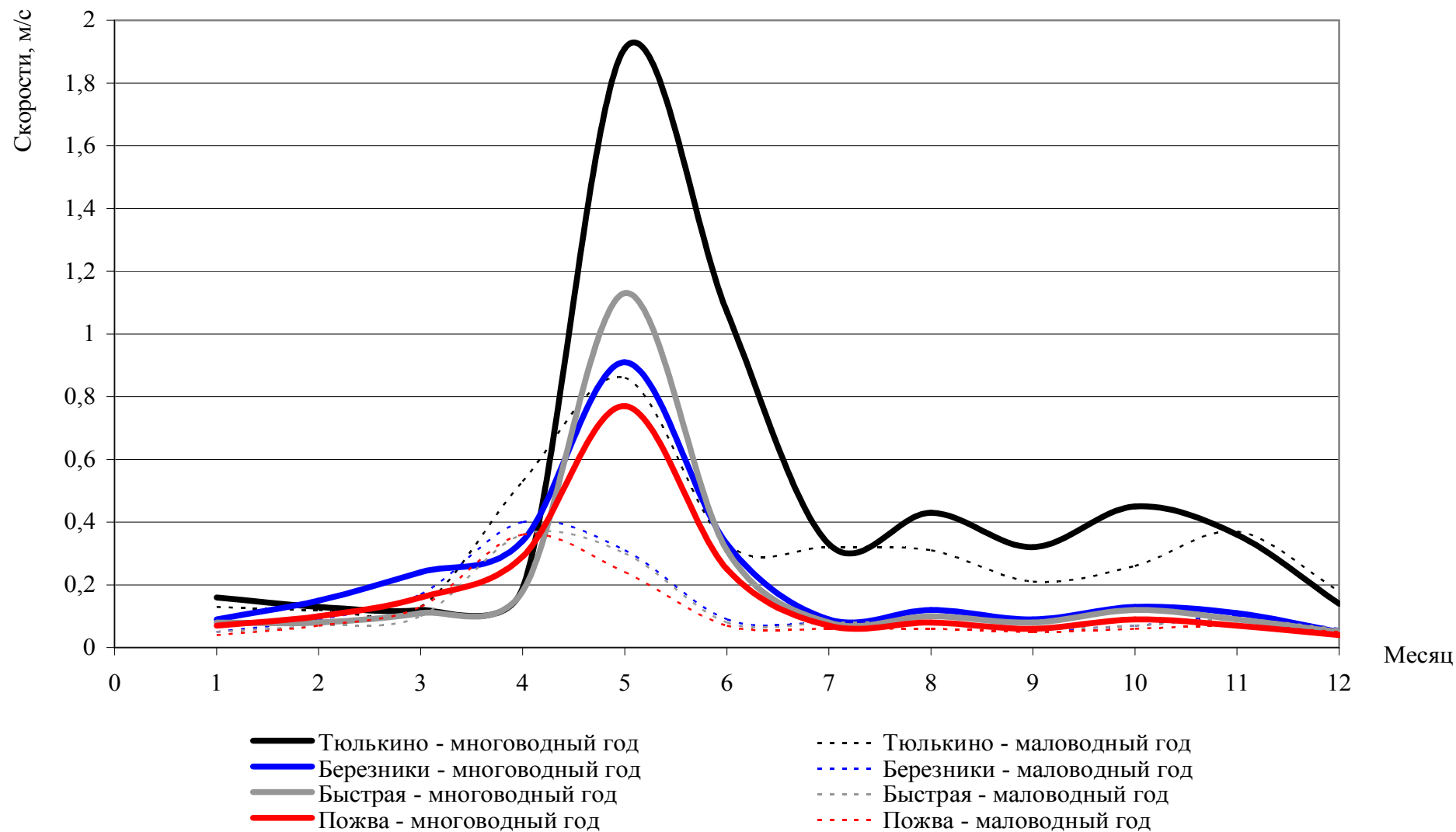


Рис. 1. Среднемесячные скорости проточного течения на Камском водохранилище в характерные по водности годы, м/с

План течений участка водохранилища в районе п. Огурдино в современных условиях

Искусственные водоемы, образованные плотинами ГЭС и предназначенные для регулирования стока, характеризуются хотя и замедленным, но постоянным водообменом. Постоянный приток и регулируемый сброс воды через плотину в нижний бьеф обуславливают наличие постоянных проточных течений, которые являются основными течениями, на фоне которых развиваются все другие, в том числе и ветровые, хотя по степени развития и величине скорости они могут сравниться с проточными или даже превосходить их. Поэтому нет оснований полагать, что для исследования проточных течений неприменимы методы речной гидравлики. Необходимо при этом учитывать относительность времени, чтобы придерживаться мнения, что водохранилища долинного типа представляют собой замедленный водный поток. К основным элементам такого потока так же, как и обычного руслового, следует отнести расход воды, среднюю скорость течения и их распределение в пространстве и во времени.

Расход воды в живом сечении водохранилища гидрометрическим способом получить практически нельзя, однако он может быть рассчитан на основании применения уравнения неразрывности с учетом водного баланса водоема. В качестве периода осреднения целесообразно принять календарный месяц в соответствии с общепринятым интервалом времени для расчета водных, тепловых, химических и других балансов.

В то же время более детальное исследование гидродинамических особенностей водоема, его отдельных зон требует не только знания величин осредненной по сечению скорости. Важно определить эту характеристику по зонам – по поперечным сечениям в различных частях водохранилища. Этой цели может служить построение плана осредненных проточных течений. Его построение необходимо при проектировании гидротехнических сооружений непосредственно в русле, причем для условий современного состояния потока и с учетом будущего гидротехнического сооружения.

План течений, составляющих поле скоростей потока, строится или расчетными способами, или с помощью гидравлического моделирования, если отсутствуют натурные данные. При гидравлическом моделировании искажается вертикальный масштаб модели, иногда не учитывается масштаб шероховатости русла, при этом исследование поля скоростей часто ограничивается изучением поверхностного слоя потока. В этом отношении расчетные способы имеют некоторые преимущества.

План течений, т. е. план линий тока и урезов реки при ее определенном режиме строится таким образом, чтобы расход между двумя соседними линиями тока от начала струи до ее конца был бы постоянным, а расходы между всеми линиями тока одного сечения одинаковыми, т. е.

$$\delta Q_1 = \delta Q_2 = \delta Q_3 = \dots = \delta Q = const \quad \text{при} \quad \frac{dQ}{ds} = 0.$$

Построение плана течений на водохранилищах представляет собой весьма сложную задачу, поскольку гидрометрические наблюдения не позволяют составить натуральный план течений, и для построения плана линий тока существуют только расчетные методы и моделирование. В качестве основного расчетного метода в работе принят метод Великанова, как модификация метода Бернадского.

В основе метода лежит применение уравнения равномерного движения для одной вертикали (1):

$$q_i = V_i H_i = \frac{1}{n} H_i^{1/6} \sqrt{H_i I} = \frac{\sqrt{I}}{n} H_i^{2/3}, \quad (1)$$

где q_i – элементарный расход ($\text{м}^2/\text{с}$) на вертикали с глубиной H_i (м); V_i – средняя скорость на этой же вертикали (м/с), определяемая по формуле Шези; I – уклон свободной поверхности; n – шероховатость русла.

Расход воды, проходящий между вертикалью и урезом, определяется как

$$Q_i = k q_i e_i, \quad (2)$$

где e_i – расстояние от уреза до вертикали (м); k – коэффициент, равный 0,7 для берегов с нулевой глубиной на урезе и 0,8 – с не нулевой глубиной на урезе.

Расходы воды между соседними вертикалями рассчитываются по формуле

$$Q_i = \frac{q_{i-1} + q_i}{2} e_i. \quad (3)$$

Уклон свободной поверхности I в пределах рассматриваемого участка принят постоянным. Шероховатость изменяется по ширине потока: при наличии затопленного леса необходимо учитывать возникающие дополнительные сопротивления и потому коэффициент шероховатости будет значительно больше, чем в основном русле.

Рассчитанные таким образом расходы позволяют построить интегральную кривую нарастания расходов и в конечном итоге получить план течений (рис.2). Расчет поля скоростей выполнен для НПГ (108,50 м БС-77) для транзитного расхода воды на участке в $728,5 \text{ м}^3/\text{с}$. Расход на участке принят постоянным от верхнего до нижнего створа. Границы основных расчетных струй проведены через $23,5 \text{ м}^3/\text{с}$, а дополнительных – через $4,7 \text{ м}^3/\text{с}$.

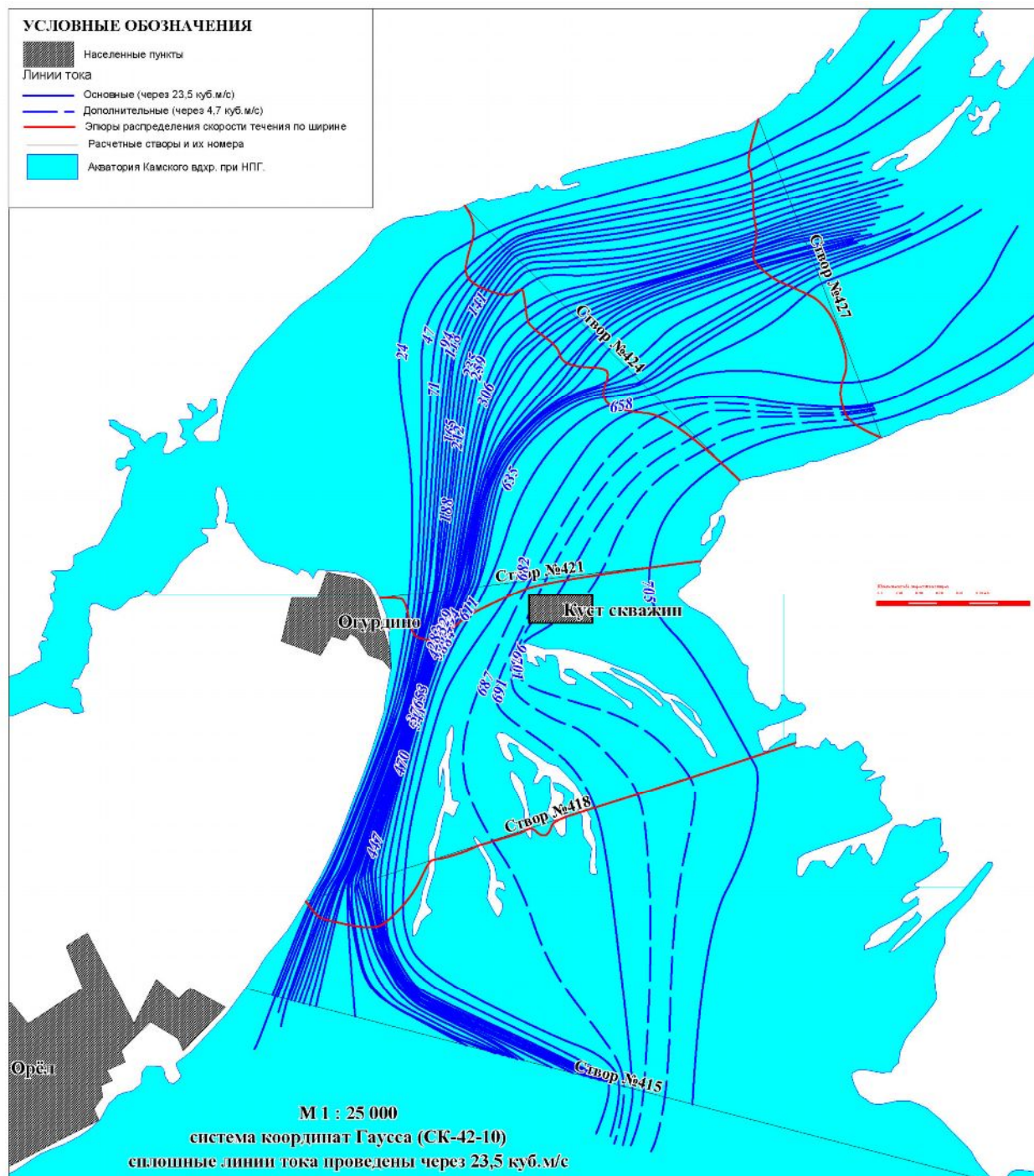


Рис. 2. Карта-схема поля скоростей течения и линий тока воды на Камском водохранилище в районе н.п. Огурдино при НПГ, $Q = 728,5 \text{ м}^3/\text{с}$

Полученные схемы проточных течений позволяют судить о пропускной способности поперечных сечений водохранилища в различных зонах. Основной транзит водных масс, обусловленный проточными течениями, проходит над затопленным руслом. Это подтверждается сгущением линий тока над большими глубинами, в особенности над затопленным руслом, т. е. распределение струй зависит от распределения глубины и шероховатости. На обширных зонах поймы и затопленного русла струи в 5-10 раз и более шире, чем над затопленным руслом. Поэтому водообмен, обусловленный проточными течениями, здесь крайне замедлен. И только ветер, а также попуски воды через плотину ГЭС могут способствовать значительному водообмену на этих участках. До 90% транзитного расхода воды проходит над затопленным руслом р. Камы. В районе куста скважин (участок затопленного леса) проходит около 6% транзитного расхода воды. В периоды стояния уровней воды ниже НПП участок обсыхает.

Направление линий тока – юго-юго-западное (румб ЮЗ, 30°). За островами направление течения резко меняется на юго-восточное (румб ЮВ, 45°). Здесь поток огибает острова, происходит гашение энергии потока и отложение переносимого взвешенного материала. В связи с этим отмечается намыв островов. С течением времени существующие острова окажутся соединенными с берегом, а образовавшаяся заводь вследствие зарастания и отсутствия проточных течений превратится в торфяник. Интенсивность этого процесса без специальных наблюдений оценить не представляется возможным.

Анализируя поле скоростей, следует отметить следующее. Максимальные скорости проточного течения наблюдаются над затопленным руслом р. Камы. В суженной части водохранилища максимальные средние скорости на вертикалях при НПП достигают величины 0,20 м/с. На участке проектируемого куста скважин скорости проточного течения исчезающе малые, составляют 0,004 – 0,0005 м/с. В связи с подобными малыми скоростями возможно формирование течений, вызванных действием ветра (в том числе обратных течений).

План течений исследуемого участка после обустройства поисково-разведочных скважин

На участке изысканий преобладающим является проточное течение. Скорости в расчетном створе изменяются от 0,57 до 1,92 м/с в период весеннего половодья и от 0,07 до 0,45 м/с в период летней межени. На участке размещения производственной площадки и автодороги с мостовым переходом проточных течений практически не наблюдается (участок расположен на мелководье). Скорости исчезающе малые: менее 0,04 м/с. Формируются ветровые течения, в ряде случаев обратные генеральному течению в русле. Направление расчетных линий тока юго-юго-западное. Основная часть расчетных струй проходит по затопленному руслу (95% стока); ширина струй здесь 6–30 м. На мелководье, за островами, где и проектируется площадка, резко изменяется направление течения на юго-восточное. В связи с огибанием островов и выхода пойменных струй на мелководье происходит гашение энергии потока и отложение переносимого взвешенного материала, что вызывает рост островов и заиливание мелководья. Плановое положение расчетных струй с повышением уровня практически не меняется в связи с прохождением расходов разной обеспеченности при крутых берегах в одних и тех же границах. После обустройства производственной площадки поле скоростей на участке изменится. Линии тока будут идти под углом порядка 30° к оси подъездной насыпи, огибая площадку (при безветренной погоде) (рис.3).

Повышение уровня воды с отметки НПП до отметки ФПП не вызовет изменения планового положения струй (при достаточно крутых берегах плановые очертания береговой линии значительно не изменятся при повышении уровня на 0,5 м). Увеличение расхода воды и уклона водной поверхности приведет к изменению численных значений частичных расходов воды в границах расчетных струй. Для примера выполнен расчет интегральных кривых нарастания расходов воды по ширине для значения $Q=8500 \text{ м}^3/\text{с}$.

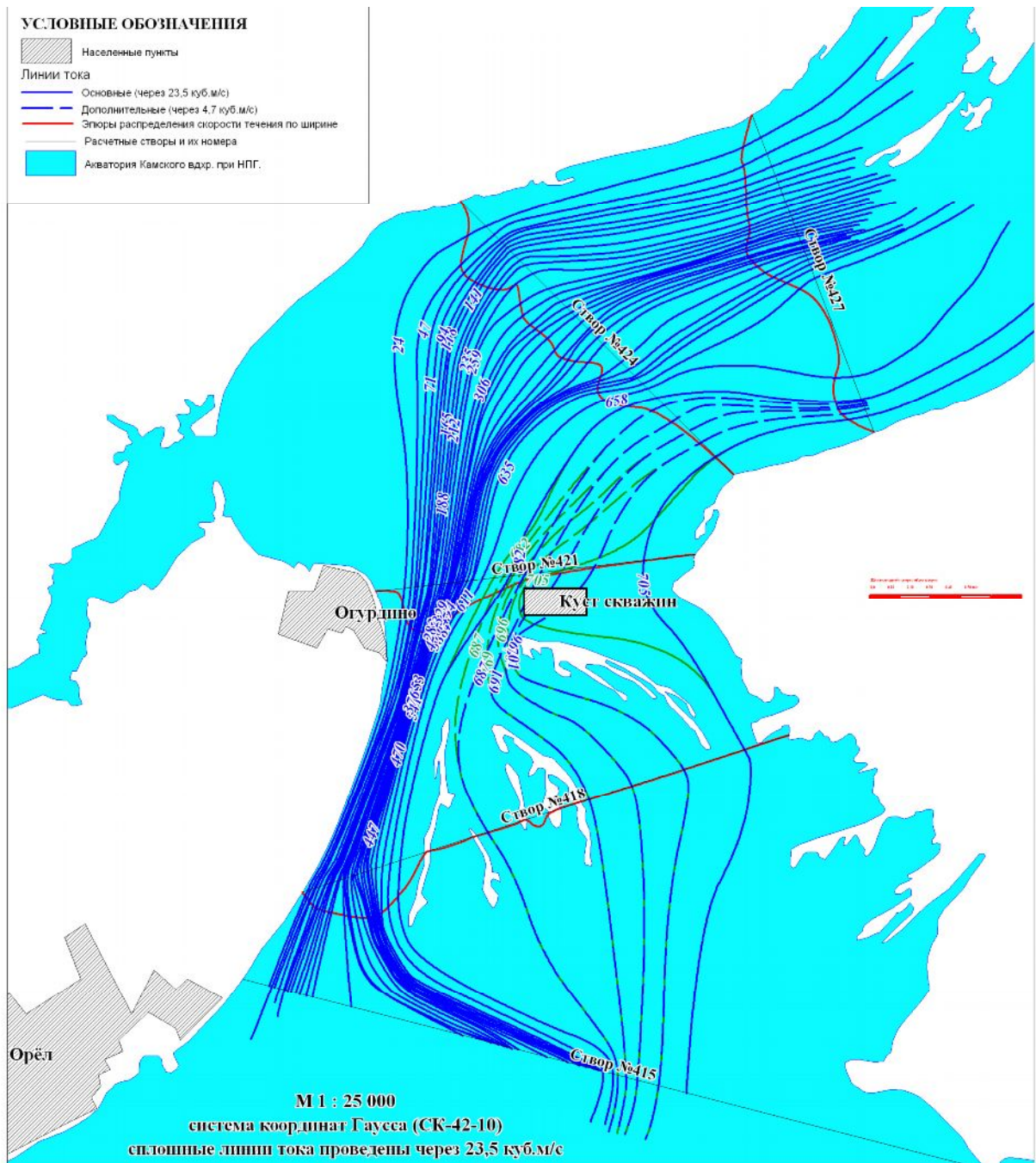


Рис. 3. План течений воды в районе п. Огурдино при НПГ до (—) и после (- - - - -) обустройства производственной площадки

Обмен вод на участке водохранилища после обустройства производственной площадки

При оценке обмена вод исследуемого участка нами был использован показатель водообмена по модели водоема-вытеснителя. Его использование предполагает наличие вполне определенного и желательно не слишком маленького участка водоема. Для расчета этого показателя необходимо знание объема стока через замыкающий створ участка и объема этого участка. Первая характеристика может быть определена путем расчета расходов воды проточного течения, вторая – по объемной кривой, т. е. по зависимости от уровня воды на конкретный момент времени. Поскольку перед нами стоит задача оценить возможные изменения в обмене вод в конкретном сечении водоема, то целесообразнее в качестве характеристики водообмена использовать коэффициент проточности (K), позволяющий дать такую характеристику

применительно к конкретному створу [1]. В общем виде он определяется как $K = \frac{V_a}{V_p}$, где V_p – средняя скорость реки до создания искусственного водоема; V_b – средняя скорость этого же участка в условиях водохранилища. Для реки $K=1$, а для участка водохранилища с увеличением объема $K \rightarrow 0$.

Для оценки изменения проточности на изучаемом участке после сооружения здесь производственной площадки будем использовать величину K' , определяемую по формуле

$$K' = \frac{V_i'}{V_p} - \frac{V_i}{V_p}, \quad (4)$$

где V_i и V_i' – скорости течения до и после создания и обустройства сооружения.

Из приведенной формулы видно, что изменение коэффициента проточности (K') зависит от изменения скоростей течения ($V_i' - V_i = \Delta V$), а так как величина скорости проточного течения в бытовых условиях (V_p) является постоянной, то для оценки изменения проточности ее можно не учитывать. За основу берем разность скоростей течения (ΔV). Если она равна 0, то проточность не изменится, если имеет знак «-», - уменьшится, знак «+» - увеличится. Расчеты, выполненные для створа расположения хозяйственного объекта, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Изменения разности скоростей течения на исследуемом участке ($V_i' - V_i$)

Расстояние от правого берега, м	Скорость в современных условиях, V_i	Скорость после обустройства площадки, V_i'	Изменение разности скоростей течения, ΔV
0	0	0	0
100	0,058	0,059	0
150	0,863	0,864	0,001
200	1,171	1,173	0,002
250	1,41	1,412	0,002
300	1,571	1,573	0,002
350	1,673	1,675	0,003
400	1,722	1,725	0,003
450	1,767	1,77	0,003
500	2,085	2,088	0,003
550	1,996	1,999	0,003
600	1,763	1,765	0,003
650	1,238	1,24	0,002
700	0,937	0,938	0,001
750	0,687	0,688	0,001
850	0,698	0,699	0,001
900	0,727	0,728	0,001
950	0,736	0,738	0,001
1000	0,716	0,717	0,001
1100	0,049	0,049	0
1150	0,034	0,034	0

Расстояние от правого берега, м	Скорость в современных условиях, V_i	Скорость после обустройства площадки, V_i'	Изменение разности скоростей течения, ΔV
1200	0,025	0,025	0
1250	0,025	0,025	0
1300	0,034	0,034	0
1350	0,047	0,047	0
1400	0,054	0	-0,054
1450	0,051	0	-0,051
1500	0,043	0	-0,043
1550	0,037	0	-0,037
1600	0,031	0	-0,031
1650	0,027	0	-0,027
1700	0,025	0	-0,025
1750	0,024	0	-0,024

Согласно расчетам в месте сооружения производственной площадки величина ΔV со знаком «-», что свидетельствует о снижении скоростей проточного течения, а следовательно, и обмена вод на незначительную величину.

Выводы

1. Создание производственной площадки и автодороги с мостовым переходом в исследуемом створе Камского водохранилища (на территории затопленных элементов долины реки) приведет к изменению характера обмена вод в этом районе по сравнению с современным состоянием. Расходы проточного течения при этом останутся прежними. Возможно лишь их некоторое смещение в сторону старого русла реки. Такая картина будет относиться к фазе весеннего наполнения водохранилища и к периоду летне-осенней стабилизации уровня воды в водоеме. Ввиду того что в фазу зимней сработки водохранилища в исследуемом районе уровни воды существенно снизятся и произойдет обнажение затопленных элементов долины реки, то говорить об обмене вод в этот период не имеет смысла.

2. Обмен вод в целом по всему исследуемому створу водохранилища не изменится – произойдет некоторое смещение интенсивности водообмена в сторону старого русла реки и его замедление на затопленных элементах долины в районе производственной площадки. Отверстия в мостовом переходе дадут возможность осуществлению обмена вод, но приведут все же к образованию застойных зон.

3. Характер обмена вод в исследуемом районе находится в полном соответствии с изменением линий токов жидкости на плане течений, построенном при наличии производственной площадки.

Библиографический список

1. *Девяткова Т.П.* Проточность как специфическая черта гидрологического режима водохранилищ // Методы изучения расчетов и прогнозов водных и климатических ресурсов / Перм. ун-т. Пермь, 1978. С.26–33.

2. *Китаев А.Б.* Обмен вод в искусственных водоемах (на примере водохранилищ Камского каскада) / Перм. ун-т. Пермь, 2005. 112 с.

3. *Китаев А.Б.* Важнейшие гидродинамические характеристики водохранилищ (на примере Камского каскада) / Перм. ун-т. Пермь, 2006. 260 с.

4. Матарзин Ю.М., Мацкевич И.К. Вопросы морфометрии и районирования водохранилищ // Вопросы формирования водохранилищ и их влияние на природу и хозяйство / Перм. ун-т. Пермь, 1970. С. 27–45.

5. Матвеев В.М. Гидрометеорологические условия судоходства на Камском водохранилище. Свердловск: Свердлов. кн. изд-во, 1966. 67 с.

A.B. Kitaev, D.E. Klimenko, O.V. Larchenko

HIGH-SPEED MODE OF AREA VARIABLE BACKWATER OF KAMA WATER BASINS AND ITS POSSIBLE CHANGES IN CONNECTION WITH CREATION OF ECONOMIC OBJECT

The mode of speeds of current in top part of Kama water basins where creation of economic object in the form of site of prospect hole is supposed is considered. The plan of speeds of current in modern conditions is constructed at absence and presence of a platform of chinks of is connected-the by a dam with coast. The estimation of change of an exchange of waters in new conditions is given.

K e y w o r d s: reservoir; rate of flow; plan of speeds; change of waters.