

УДК 556.5

**А.А. Шайдулина, С.А. Двинских**  
**РЕЖИМ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ В РАЙОНЕ ПЕРЕМЕННОГО ПОДПОРА**  
**КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА\***

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

Водоохранилища являются искусственно созданными водными объектами, режим эксплуатации которых определяется на этапе строительства. В отличие от рек, движение воды в которых направлено от истока к устью и в основном обусловлено действием силы тяжести, здесь присутствуют разнообразные виды течений: стоковые, ветровые, компенсационные и др. На Камском водохранилище наиболее распространённые – стоковые и ветровые. Первые характерны для всех сезонов, а ветровые наблюдаются только в условиях открытого русла. Формирование стоковых течений обусловлено величиной притока в водохранилище и сбросом вод через створ его плотины.

Скорость стокового течения уменьшается по длине района переменного подпора от верховьев к концу. Это связано с уменьшением уклонов водной поверхности и проточности отдельных районов и участков. Также на распределение скоростей течения по длине района заметное влияние оказывают особенности морфометрии отдельных частей и режим регулирования уровня. В зависимости от колебания уровня происходит постоянное перемещение границы выклинивания подпора, что сказывается на гидравлическом режиме потока и режиме наносов. Анализ скоростного режима выполнен на основании ранее не опубликованных данных лаборатории комплексных исследований водохранилищ и данных полевых наблюдений 2016 г. с применением статистических методов. Дана оценка размывающей способности водного потока в навигационный период на основании рассчитанных величин критических скоростей.

Ключевые слова: водохранилище, скоростной режим, район переменного подпора.

**A.A. Shaydulina, S.A. Dvinskikh**  
**FLOW SPEED MODE IN THE VARIABLE BACKWATER AREA OF THE KAMA**  
**RESERVOIR**

*Perm State University, Perm*

Reservoirs are artificially created water bodies, the operation of which is determined at the stage of construction. Unlike rivers, the movement of water in which is directed from the source to the mouth, mostly due to gravity, there exist different types of flows: runoff, wind, compensation, etc. On the Kama reservoir, the most common are runoff and wind ones. The first are typical of all seasons, and the wind flows are only observed in the open channel. The formation of the runoff flows is caused by the reservoir inflow and water discharge through its site.

The runoff speed of the flow decreases along the length of the backwater area, from headwaters to the end. This is due to the reduction in the slope of the water surface and the flowage of certain areas and sites. Also, distribution of flow velocities along the length of the area is under a visible influence of the morphometry of individual parts and the mode of regulation. Depending on the level fluctuations, the boundary of the transient region constantly moves, which affects the hydraulic flow regime and mode of sediment transport. Analysis of the speed mode has been made based on previously unpublished data of the Laboratory for Complex Research of Reservoirs and the 2016 field data with statistical methods. The eroding ability of water flow in the navigation period has been estimated on the basis of the calculated values of the critical speeds.

Key words: reservoir, flow speed regime, the area of variable backwater.

doi 10.17072/2079-7877-2017-3-61-70

### Введение

Камское водохранилище представляет собой чередование узких плёсовых участков и озеровидных расширений (рис. 1). Скоростное поле течений неоднородно: скорости увеличиваются при прохождении потока через узкое водное сечение и уменьшаются при его увеличении. Анализ скоростных эпюр позволяет выявить динамику поверхностных и придонных скоростей. В период интенсивного увеличения скоростей течения при прохождении волны наблюдается превышение придонных скоростей над поверхностными. Эта разность может достигать 0,1 м/с и более [3].

Район переменного подпора, простирающийся от пгт Керчевский до п. Усть-Пожва, вследствие особенностей своих морфометрических показателей, а именно небольшого значения ширины и глубины (3,5 м и 4 км в среднем соответственно), относится к району флювиогляционного морфолитогенеза, где основной причиной формирования облика котловины являются стоковые течения. При этом нельзя забывать и о ветровых течениях, которые, однако, имеют меньшую интенсивность по сравнению с частью водохранилища, расположенной ниже п. Усть-Пожва. Большая в сравнении с верхней частью ширина водного зеркала способствует их развитию. Еще одним важным фактором, влияющим на гидродинамический режим района, является перемещение по нему границы выклинивания подпора. Являясь границей между явно речными и водохранилищными условиями, выклинивание подпора оказывает значительное влияние на гидродинамический режим и характер перемещения наносов. Ранее проведенные исследования [6] позволили выделить в верхней части Камского водохранилища три характерных участка, находящихся внутри района переменного подпора: от пгт Керчевский до пгт Тюлькино с преобладанием речных условий; пгт Тюлькино – г. Березники со смешанными условиями (река и водохранилища имеют здесь «равные права»); г. Березники – п. Усть-Пожва, где практически в течение всего года наблюдаются водохранилищные условия (рис. 1).

Таким образом, для района переменного подпора характерны стоковые (проточные) течения. Они обуславливаются, с одной стороны, величиной поступающего притока, а с другой, проточностью.

### Материалы и методы исследования

Скоростной режим любого естественного или искусственного водоема целесообразно оценивать по данным фактических измерений скоростей течения, приведенных в материалах наблюдений на озерах и водохранилищах [4]. Однако для района переменного подпора Камского водохранилища такие материалы имеются за короткий период времени – от конца 50-х до начала 70-х гг. прошлого столетия и в основном относятся к навигационному периоду. При этом необходимо учитывать изменения в режиме эксплуатации Камского водохранилища, произошедшие в 1964 г., когда НПУ был поднят с отметки 108 м абс до 108,5 м абс. Таким образом, данные по скоростному режиму, приведенные в материалах [4] и отвечающие принципу однородности ряда, в исследуемом районе есть только по двум вертикалям: п. Усть-Пожва с 1964 по 1971 г. и д. Быстрая с 1964 по 1967 г. включительно. При этом измерений скоростей течения, приуроченных к фазе зимней сработки водохранилища и периоду его весеннего наполнения, практически не существует.

Для анализа скоростного режима исследуемого района, помимо материалов, были привлечены архивные фонды лаборатории НИЛ КИВ ЕНИ ПГНИУ с 1964 по 1981 г. Данные наблюдений были обработаны и сведены по основным пунктам наблюдений. Всего было получено около 500 отметок скоростей течения на разных горизонтах. В совокупности с данными, приведенными в материалах, для анализа получено 565 значений скоростей. Данные были сгруппированы по 6 пунктам: пгт Тюлькино, г. Березники, о. Орел, д. Таман, д. Быстрая, п. Усть-Пожва. Кроме того, к анализу привлечены данные полевых наблюдений 2016 г., в ходе которых выполнено измерение скоростей потока в прибрежной мелководной части и на затопленном русле – всего 72 значения. Анализ выполнялся с привлечением статистических методов.

Размывающая способность водного потока на момент промеров оценена в сравнении с критическими скоростями (табл. 2). Если фактические скорости потока *превышают критические средние скорости течения*, то происходят процесс переформирования котловины, размыв и переотложение наносов. Критические скорости являются количественным выражением противоэрозионной устойчивости грунтов [1]: *неразмывающая (несдвигающая) скорость  $V_n$*  — предельная скорость, при которой основная масса частиц еще сохраняет состояние покоя. Она определяется по выражению

$$V_p = 1g \frac{8,8H}{d} \sqrt{\frac{2g(\rho_1 - \rho)d}{3,5\rho}}$$

где  $H$  – глубина на вертикали, м;  $d$  – диаметр наносов, м (при этом под корнем – средний, а в знаменателе – максимальный диаметры);  $\rho_1$  – плотность наносов,  $2650 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho$  – плотность воды,  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

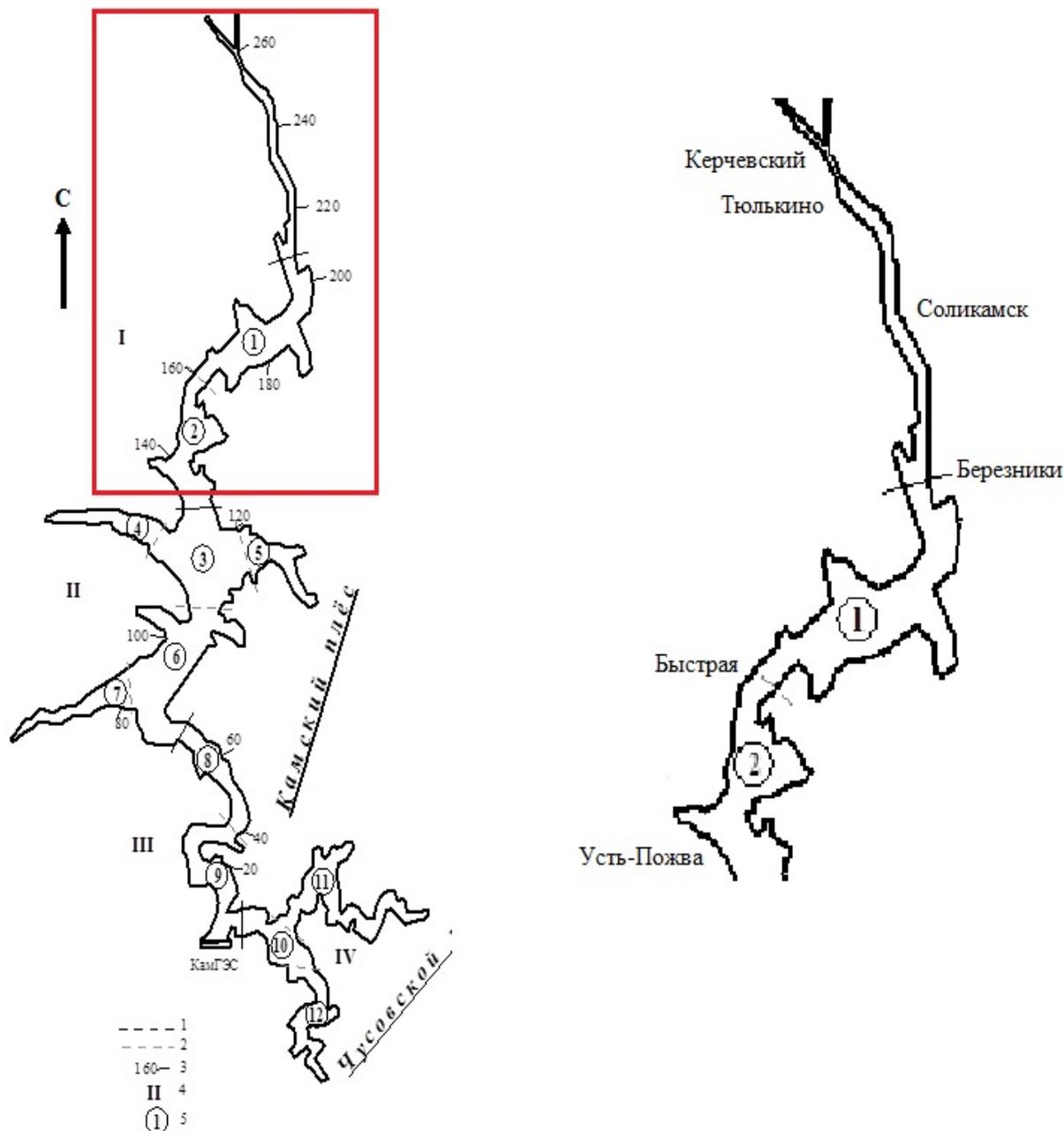


Рис. 1. Схема морфологических таксономов Камского водохранилища Ю.М. Матарзина, И.К. Мацкевича [2]:

1 – границы районов; 2 – границы участков; 3 – расстояние (км) от плотины (по судовому ходу);  
4 – номера районов; 5 – номера участков: Камский плес: 0 – Тюлькино–Березники, 1 – Березники–Быстрая, 2 – Быстрая–Пожва, 3 – Пожва–Чёрмоз, 6 – Чёрмоз–Усть-Гаревая, 8 – Усть-Гаревая–Добрянка, 9 – Добрянка–КамГЭС

*Размывающая (срывающая) скорость  $V_p$*  – отвечает началу массового перемещения частиц (обозначения выше):

$$V_p = \lg \frac{8,8H}{d} \sqrt{\frac{2g(\rho_1 - \rho)d}{1,75\rho}}$$

Оценка *критических размывающих скоростей течения* в навигационный период в целом дана в сравнении с расчетными значениями скоростей потока у дна заданной обеспеченности (табл. 3).

Согласно [5], стандартными квантилями кривых распределения вероятностей являются следующие: для многоводных лет, периодов, сезонов и месяцев – 1, 3, 5, 10 и 25%; для маловодных лет, периодов, сезонов и месяцев – 75, 90, 95, 97 и 99%, для средних по водности лет – 50%. В

качестве количественной оценки скоростей течения в районе переменного подпора приняты три расчетных обеспеченности – 25, 50 и 75%.

### Результаты и их обсуждение

Распределение скоростей по ширине водоема неравномерно. Наибольшие их значения отмечаются над бывшим руслом р. Камы. Уменьшение скоростей на пойме обусловлено наличием затопленного леса, кустарника и т.п. С глубиной скорости течения на водохранилище, как правило, уменьшаются. Большое влияние на распределение скоростей по длине и ширине акватории оказывает ветер, особенно на ее расширенных участках.

Внутригодовой ход скоростей проточного течения аналогичен другим годовым показателям динамики вод водоемов и характеризуется четко выраженными фазами: период весеннего наполнения с максимальными в году величинами; летне-осенний период; период зимней сработки.

В многолетнем периоде максимальные скорости отмечаются в многоводные годы, минимальные – в маловодные [2]. В мае многоводного года в створе Тюлькино скорость составляет 1,91 м/с, в средний по водности год – 1,22 м/с, а в маловодный год – 0,86 м/с (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1

Среднемесячные осредненные по сечению скорости проточного течения на Камском водохранилище в характерные по водности годы, м/с [2]

Створ	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Многоводный год												
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
Пожва	0,07	0,10	0,16	0,29	0,77	0,25	0,07	0,08	0,06	0,09	0,07	0,04
Маловодный год												
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
Пожва	0,04	0,07	0,13	0,36	0,24	0,07	0,06	0,06	0,05	0,06	0,07	0,05

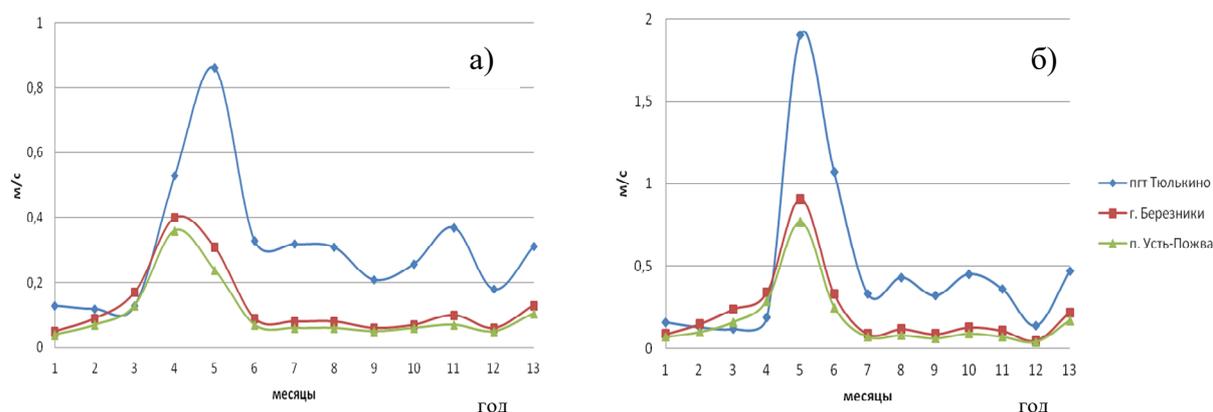


Рис. 2. Изменение среднемесячных значений скорости течения в многоводный год (а) и маловодный год (б)

Летом и зимой скорости проточного течения почти одинаковы и заметно ниже, чем во время прохождения весеннего половодья. В средний по водности год в феврале в створе Тюлькино их значения составляют 0,13 м/с.

В пгт Тюлькино максимальные скорости наблюдаются в конце апреля, в мае составляют 1,91 и 0,86 м/с в многоводный и маловодный года соответственно. При этом скорости течения в г. Березники и п. Усть-Пожва очень близки по значениям и составляют 0,36–0,91 м/с в маловодный и многоводный года соответственно. Скорости в Березниках и Усть-Пожве уменьшаются за счет выравнивания уклона, происходящего вследствие подпора. В летне–осенний период у г. Березники средние значения скоростей 0,11 и 0,07 м/с, а в п. Усть-Пожва – 0,08 и 0,06 м/с в многоводный и

маловодный года соответственно. При этом максимальные значения вновь приурочены к верховьям, достигая у пгт Тюлькино 0,38 и 0,28 м/с в многоводный и маловодный года соответственно. Таким образом, водность года оказывает сильное влияние на величину скоростей течения только в период весеннего наполнения. В период летне-осенней стабилизации и зимней сработки скорости почти равны на одних и тех же створах.

Анализ фактических данных по скоростному режиму, согласно указанной выше группировке по 6 пунктам: пгт Тюлькино, г. Березники, о. Орел, д. Таман, д. Быстрая, п. Усть-Пожва, показал следующее (рис. 3):

Скорости уменьшаются по району переменного подпора от верховьев к концу. Значения скоростей в верховьях участка достигают 2 м/с. Наибольшую повторяемость у пгт Тюлькино имеют скорости в диапазоне 0,21–0,40 м/с.

Для всех остальных участков наиболее характерными являются скорости течения в диапазоне от 0 до 0,20 м/с. Исключение составляют измерения у д. Таман, однако малочисленность данных не дает оснований репрезентативно судить об их распределении.

Анализ фактических скоростей течения в районе переменного подпора Камского водохранилища на момент промеров 2016 г. показал, что максимальные скорости течения всегда приурочены к поверхности. Это связано с совпадением направления течения и ветра в этот период. Скорость ветра на момент промеров изменялась от 1 до 3 м/с, а его направление варьировалось от СВ до В. Максимальные скорости наблюдаются в верховьях участка в районе пгт Тюлькино и составляют 0,45 м/с. Минимальные приурочены к устью р.Усолки. В дальнейшем отмечается увеличение скоростей до значений 0,2 м/с. В среднем значение максимальной скорости потока составляет 0,22 м/с. Значения минимальных скоростей колеблются в пределах от 0,26 до 0,045 м/с и также уменьшаются от верховий к концу участка.

Размывающая способность водного потока на момент промеров оценена в сравнении с критическими скоростями (табл. 2). Анализ фактических скоростей на момент промеров 2016 г. показал, что только на створах 1 и 2 максимальные скорости течения, наблюдаемые на поверхности, оказались чуть выше значений несдвигающей скорости. На мелководном участке у правого берега значения срывающей и несдвигающей скоростей выше фактических значений скоростей потока в среднем по вертикали и у дна.

Фактические скорости над затопленным руслом являются самыми высокими, однако и они превышают значения срывающей и несдвигающей скорости только на 1-м и 2-м створах. Похожая картина отмечается и у левого берега, однако здесь незначительные превышения отмечены также на створах 4 и 6.

В период наполнения водохранилища размывающая способность водного потока наибольшая, и в это время наиболее активен процесс эрозии берегов и дна водохранилища. В этот период в районе переменного подпора активно проявляются гидродинамические процессы. В фазу летне-осенней стабилизации происходит уменьшение фактических скоростей течения вследствие выравнивания уклонов водного зеркала. Это происходит благодаря регулированию уровня режима и распространению подпора до верховий рассматриваемого района. Скорости в этот период достаточно стабильны. Анализ осредненных за многолетний период скоростей придонного течения в различные месяцы навигации на участках Камского водохранилища (пгт Тюлькино – г. Березники и г. Березники – п. Усть-Пожва) показал (рис. 4), что максимальное их значение наблюдается также в верхнем участке района переменного подпора, достигая 0,49 м/с. Средние значения придонных скоростей в этот период колеблются от 0,23 до 0,48 м/с. Анализ участка г. Березники – п. Усть-Пожва показал, что здесь средние значения придонных скоростей в период летне-осенней стабилизации чуть меньше (0,10 до 0,30 м/с).

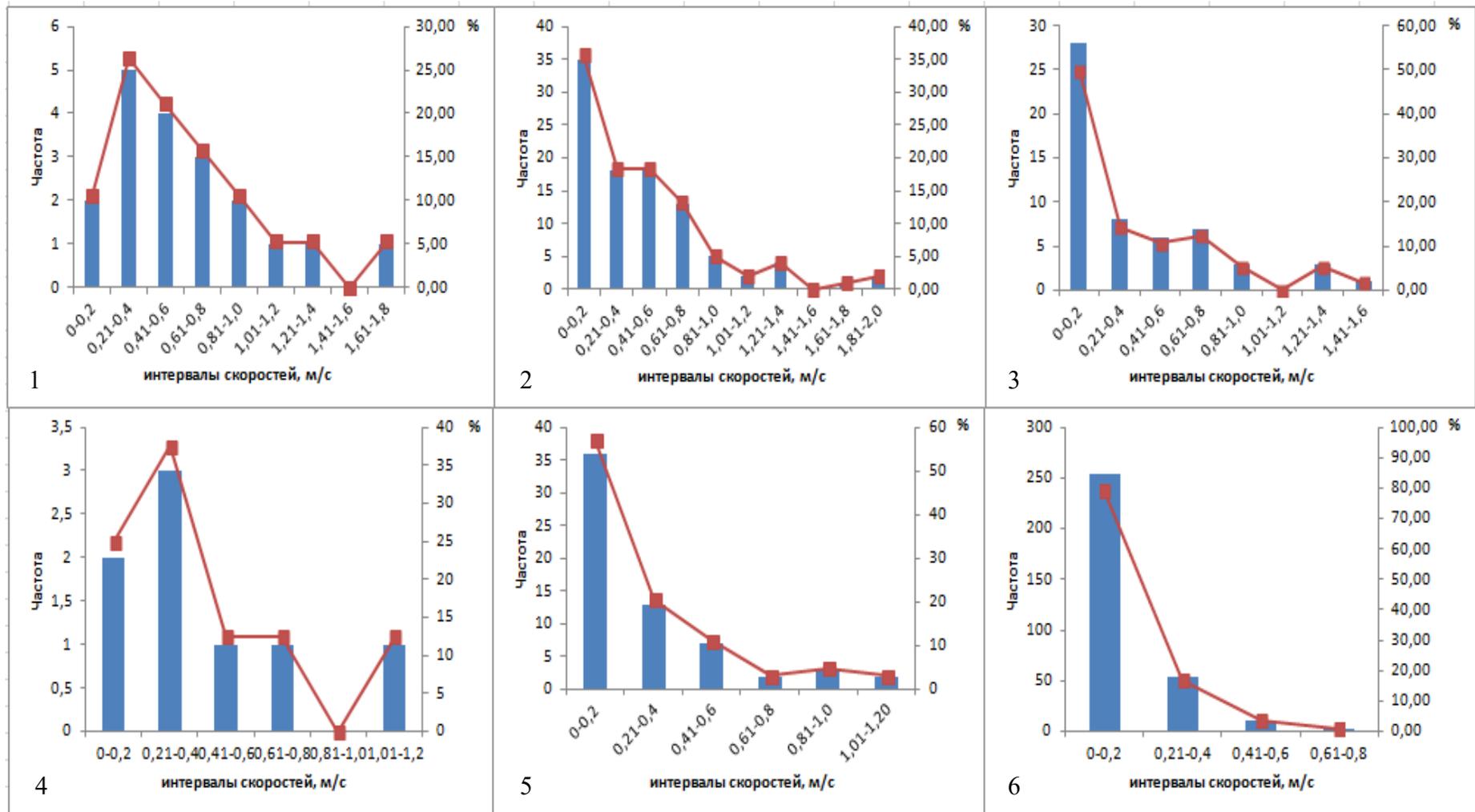


Рис. 3. Абсолютные и относительные значения попадания скоростей течения в различные интервалы по пунктам:  
 1 – пгт Тюлькино, 2 – г. Березники, 3 – о. Орел, 4 – д. Таман, 5 – д. Быстрая, 6 – п. Усть-Пожва



В створе пгт Тюлькино скорости 25 и 50% превышают срывающие, они приурочены к моменту весеннего наполнения (май–июнь) (табл. 3). Однако уже при приближении к Березникам скорости потока падают, и только в многоводный период их значения превышают величину срывающих скоростей. Это расчеты подтверждаются рассчитанными величинами осредненных за многолетний период скоростей придонного течения.

Таблица 3

Размывающие скорости течения и расчетные значения скорости потока у дна заданной обеспеченности в районе переменного подпора Камского водохранилища

№ створа	Размывающая скорость над мелководьем правого берега, м/с при заданном значении уровня			Размывающая скорость над затопленным руслом, м/с при заданном значении уровня			Размывающая скорость над мелководьем левого берега, м/с при заданном значении уровня			Расчетные скорости заданной обеспеченности у дна, м/с		
	106 м.абс	107 м.абс	108,5 м.абс	106 м.абс	107 м.абс	108,5 м.абс	106 м.абс	107 м.абс	108,5 м.абс	25 %	50 %	75 %
пгт Тюлькино	0,33	0,35	0,36	0,31	0,32	0,32	–	0,13	0,14	0,59	0,42	0,18
г. Березники	0,26	0,28	0,30	0,33	0,33	0,33	0,30	0,30	0,31	0,57	0,21	0,15
о. Орел	0,15	0,15	0,16	0,30	0,31	0,32	0,32	0,33	0,34	0,46	0,16	0,11
д. Быстрая	0,13	0,14	0,15	0,39	0,39	0,39	0,14	0,15	0,14	0,35	0,12	0,07
п. Усть-Пожва	0,15	0,16	0,16	0,39	0,39	0,40	0,13	0,14	0,15	0,13	0,08	0,05

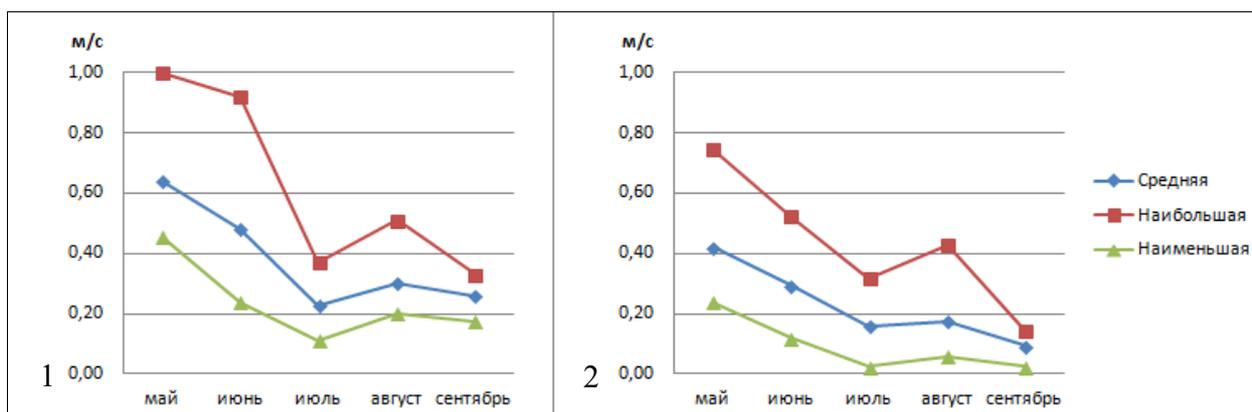


Рис. 4. Осредненные за многолетний период скорости придонного течения в различные месяцы навигации на участках Камского водохранилища: 1- пгт Тюлькино – г. Березники; 2- г. Березники – п. Усть-Пожва

При этом на участке г. Березники–п. Усть-Пожва скорости течения значительно ниже и превышают значения срывающих скоростей только в мае. На мелководных участках значения срывающей и несдвигающей скоростей выше фактических значений скоростей потока в среднем по вертикали и у дна, поэтому здесь в основном происходит переотложение размываемого материала.

### Выводы

Особенности условий формирования скоростей течения в районе переменного подпора в значительной степени обусловлены его морфометрическими особенностями. Конфигурация водоема до п. Орел достаточно простая – это затопленное русло и пойма р. Камы. После создания Камского водохранилища этот участок подвергся наименьшим изменениям. До п. Орел на всем вышерасположенном участке наблюдается только один вид течений – стоковое, которое определяет транзит взвешенных наносов от пгт Керчевский до г. Березников. Оно характеризуется четко выраженной сезонной изменчивостью и постоянно по направлению. Скорости течения на этом участке района переменного подпора значительно выше (примерно в 1,5–2 раза), чем на участке г. Березники–п. Усть-Пожва. Южнее г. Березники расположен четкообразный участок водоема. Здесь на протяжении свыше 50 км от п. Орел и до п. Усть-Пожва отмечаются резкие чередования расширений акватории до 8–8,5 км (устье р. Кондас, п. Городище) и сужений до 1,2–1,5 км

(д. Быстрая, п. Усть-Пожва). Наличие подобных сужений также влияет на скорости потока, которые здесь увеличиваются, особенно в многоводный период (табл. 3). От п. Орел и ниже начинает сказываться влияние ветрового воздействия на движение водной массы. На стокое течение накладывается ветровое, поэтому в дальнейшем целесообразно рассмотреть особенности ветроволнового режима района переменного подпора.

### Библиографический список

1. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 374 с.
2. Китаев А.Б. Важнейшие гидродинамические характеристики водохранилищ (на примере Камского каскада) / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2006. 260 с.
3. Матарзин Ю.М. Гидрология водохранилищ. Пермь, 2003. 296 с.
4. Материалы наблюдений на озерах и водохранилищах: дополнение к гидрологическому ежегоднику. Т. 4. Вып. 5–7 / Уральское УГМС. Свердловск, 1964, 1965, 1966, 1967, 1968, 1969, 1970, 1971.
5. Свод правил по проектированию и строительству: определение основных расчетных гидрологических характеристик СП 33-101-2003: Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (Госстрой России). М., 2003.
6. Шайдулина А.А. Особенности уровня режима в районе переменного подпора Камского водохранилища // Географический вестник = Geographical bulletin. 2016. № 4 (39). С. 44–56. doi 10.17072/2079-7877-2016-4-44-56.

### References

1. Goncharov, V.N. (1962), *Dinamika ruslovyh potokov* [Dynamics of channel flows], Leningrad, USSR.
2. Kitaev, A.B. (2006), “Vazhnejshie gidrodinamicheskie harakteristiki vodokhranilishch (na primere Kamskogo kaskada)” [Important hydrodynamic characteristics of reservoirs (on the example of the Kamsky cascade)], University of Perm Press, Perm, Russia.
3. Matarzinb Yu.M. (2003), “Gidrologiya vodokhranilishch” [Hydrology of reservoirs], Perm, Russia.
4. Materialy nablyudeniy na ozerakh i vodokhranilishchakh (Dopolnenie k gidrologicheskomu ezhegodniku. T. 4. Vyp. 5-7) [Materials of observations on lakes and reservoirs (Supplement to the Hydrological Yearbook, vol. 4, no. 5–7)], (1964, 1965, 1966, 1967, 1968, 1969, 1970, 1971), Sverdlovsk, Russia.
5. Russian Federation State Committee for Construction and Housing and Municipal Economy (Gosstroy Russia), (2003), SP 33-101-2003: svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik [SP 33-101-2003, Code of practice for design and construction of the definition of basic hydrological characteristics of settlement], Moscow, Russia.
6. Shaydulina, A.A. (2016), “Features of the level regime in the variable backwater area of the Kama reservoir”, *Geographical bulletin*, no. 4 (39). pp. 44–56. doi 10.17072/2079-7877-2016-4-44-56.

Поступила в редакцию: 22.05.2017

### Сведения об авторах

**Шайдулина Аделия Александровна**  
аспирант кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов Пермского государственного национального исследовательского университета;  
614990, Россия, г.Пермь, ул.Букирева, 15;

e-mail: AdelinaSh89@mail.ru

### About the authors

**Adeliya A. Shaydulina**  
Postgraduate Student, Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State University;  
15, Bukireva, Str., Perm, 614990, Russia;

**Двинских Светлана Александровна**  
доктор географических наук, профессор, заведующая кафедрой гидрологии и охраны водных ресурсов Пермского государственного национального исследовательского университета;  
614990, Россия, г.Пермь, ул.Букирева, 15;

e mail: dvins@mail.ru

**Svetlana A. Dvinskikh**  
Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State University;  
15, Bukireva, Str., Perm, 614990, Russia;

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

*Шайдулина А.А., Двинских С.А.* Режим скоростей течения в районе переменного подпора Камского водохранилища // Географический вестник = Geographical bulletin. 2017. №3(42). С. 61–70. doi 10.17072/2079-7877-2017-3-61-70

**Please cite this article in English as:**

*Shaydulina A.A., Dvinskikh S.A.* Flow speed mode in the variable backwater area of the Kama reservoir // Geographical bulletin. 2017. № 3(42). P. 61–70. doi 10.17072/2079-7877-2017-3-61-70