

## ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВА И ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА В БАСЕЙНАХ МАЛЫХ РЕК БЕЛАРУСИ И ВЬЕТНАМА

**Введение.** Прогнозируемое изменение климата [1] и растущие требования экологически безопасного водопользования [2] определяют целесообразность строительства и эксплуатации водохозяйственных комплексов (ВХК) не только в бассейнах больших и средних рек, но и в водосборах малых рек, особенно при интенсивном использовании их водных ресурсов и сравнительно высокой вероятности затоплений территорий в отдельные годы и периоды. Поэтому целью настоящей работы является обоснование состава и основных параметров водохозяйственного комплекса применительно к бассейнам малых рек Республики Беларусь и Социалистической Республики Вьетнам. Под «основными параметрами» подразумеваются: емкость водохранилища комплексного назначения, площади земель, орошаемых за счет регулирования речного стока, объемы воды, подаваемой на нужды орошения, водоснабжения населения, промышленности и рыбного прудового хозяйства, а также попуски воды в нижний бьеф водохранилища для охраны природы, рекреации, любительского рыболовства, предотвращения затоплений и подтоплений пойм и прилегающей территории. Для достижения поставленной цели решались задачи по определению условий формирования состава водохозяйственного комплекса, выборе или разработке новых методов оптимизации основных параметров ВХК с учетом реальных возможностей информационного обеспечения процесса принятия решений, формулированию условий применения предлагаемых методов.

**Обоснование состава водохозяйственного комплекса.** Несмотря на различия климатических и физико-географических условий Республики Беларусь и Социалистической Республики Вьетнам основные характеристики водных ресурсов и потребностей в воде (в их относительном выражении) имеют много общего. Во-первых, потребности в воде на орошение зависят от выпадающих осадков и, как показано в [3, 4, 5, 6], не только статистически, но и физически связаны с величинами речного стока, во-вторых, распределение (по годовым и месячным интервалам времени) речного стока малых рек примерно одинаково (табл. 1). Кроме того, в бассейнах рек Беларуси и Вьетнама достаточно высока вероятность затоплений ценных пойменных земель и прилегающих к ним территорий.

На малых реках воздействие хозяйственной деятельности, как правило, проявляется четко и в сравнительно короткие сроки. В большинстве случаев оно зависит от деятельности лимитирующего водопользователя, являющегося ведущим участником ВХК. Применительно к бассейнам малых рек им может быть:

- орошение;
- рыбное прудовое хозяйство;
- водоснабжение промышленности, городского и сельского хозяйства (с забором воды не только из рек, но и подземных источников, гидравлически связанных с реками);
- борьба с наводнениями (предотвращение длительных затоплений пойм с плодородными почвами и других земель за пределами пойм);

- обеспечение минимальных расходов воды в руслах рек для охраны природы, рекреации, любительского рыболовства, водного туризма, сохранения реки как ландшафта природы, а в исключительных случаях и для разбавления отводимых в реку сточных вод, которые по объективным причинам временно не могут быть очищены до нормативных значений.

Судоходство и лесосплав на малых реках как в Беларуси, так и во Вьетнаме не осуществляется. Гидроэнергетика может быть участником ВХК, но не ведущим, поскольку в Беларуси, особенно в Полесье, создание ГЭС на малых реках практически невозможно (по морфометрическим характеристикам), а во Вьетнаме малые ГЭС в наиболее благоприятных створах уже построены: к настоящему времени введено в эксплуатацию 473 малых ГЭС из запланированных 1239. В 2013 году Парламентом Вьетнама принято постановление [7], согласно которому из списка планируемых исключено 424 проекта, а для строительства остальных 342 ГЭС требуется дополнительное экономическое обоснование с учетом экологических и социальных условий. Строительство новой ГЭС может оказаться выгодным при ее включении в состав водохозяйственного комплекса малой реки.

Рыбное прудовое хозяйство не является лимитирующим участником ВХК, так как наполнение рыбных прудов производится в многоводные периоды. Требования рыбного прудового хозяйства, как правило, не противостоят требованиям других участников ВХК. Во Вьетнаме этот вид водопользования менее актуален, так как основной улов рыбы производится в море и в устьях больших рек, а пресноводные рыбы выращиваются не только в наливных прудах, но и в рисовых чеках.

Следовательно, в бассейнах малых рек как Беларуси, так и Вьетнама в зависимости от гидрологических, физико-географических, социально-экономических и других местных условий ведущим (лимитирующим) участником ВХК реально может быть: 1) орошение, 2) водоснабжение, 3) охрана природы и 4) борьба с наводнениями. При этом борьба с наводнениями даже в большей степени, чем рыбное прудовое хозяйство, не является конкурентом первых трех водопользователей. Наоборот, создание водохранилищ для срезки пика катастрофических расходов воды дает возможность увеличить подачу воды из верхнего бьефа и попуск воды в нижний бьеф водохранилища в интересах других водопользователей.

Основополагающим связующим звеном между участниками ВХК является водохранилище, осуществляющее перераспределение речного стока во времени согласно требованиям водопользователей. Именно с помощью стокорегулирующих водохранилищ и русловых прудов (те же водохранилища, но меньшего объема) появляется возможность обеспечить требования различных участников ВХК. Поэтому определение пределов эффективного регулирования речного стока является важнейшей задачей водохозяйственного планирования и проектирования. Не случайно, начиная со второй половины прошлого столетия [8], и до наших дней [9, 10, 11, 12] оптимизации полезной емкости водохранилищ комплексного назначения уде-

**Таблица 1** – Сопоставительные данные о речном стоке в бассейнах малых рек Беларуси и Вьетнама

Река	Средний много- летний сток млн м <sup>3</sup>	Сток маловодного года 95%-й обес- печен. млн м <sup>3</sup>	% от среднего многолетнего стока	Минимальн. месячный сток млн м <sup>3</sup>	% от стока мало- водн. года
Пина в бассейне Припяти	492	262	53	3,6	1,37
Шонграк в провинции Хаглиянь	250	160	64	2,4	1,52

**Колобаев Алевтин Николаевич**, д.т.н., профессор, профессор Белорусского национального технического университета, e-mail: aleftin@list.ru.

**Фам Нзюк Киен**, аспирант Белорусского национального технического университета, e-mail: kienpess@gmail.com.  
Беларусь, БНТУ, 220114 г. Минск, пр. Независимости, 145-303.

ляется пристальное внимание. К настоящему времени разработано большое количество корректных в теоретическом плане экономико-математических моделей [9, 10, 11]. Однако их внедрение сдерживается вследствие отсутствия или недопустимо высокой погрешности необходимых для оптимизации исходных данных и прежде всего данных о зависимостях экономических показателей от водохозяйственных параметров. В этих условиях целесообразно использование общих принципов установления основных параметров ВХК в зависимости от планируемых целевых водохозяйственных показателей, учитывающих требования всех водопользователей, а также разработка внеэкономических критериев оптимизации.

Требования охраны природы сводятся к установлению минимально необходимых расходов (объемов) воды в реке для экологических и других вышеупомянутых целей. Обоснование этой величины практически представляет собой нахождение компромисса между экологией и экономикой. Ее решение зависит от того, сколько средств то или иное государство реально способно потратить на экологические мероприятия для гарантии устойчивого социально – экономического развития. Совершенно очевидно, что эта задача должна решаться на государственном уровне, а не на стадии планирования управлением конкретного речного бассейна, тем более малого. Ее решению посвящено огромное количество научных работ во многих странах мира. В конечном итоге по результатам этих работ разрабатываются и утверждаются национальные нормативы и стандарты. В большинстве стран мира величина минимально необходимого расхода воды, оставляемого в руслах рек, принимается в процентах от расчетных гидрологических характеристик в лимитирующие периоды времени. В Республике Беларусь для летнего периода этот норматив установлен в размере 75% от минимального месячного речного стока 95%-й обеспеченности, а в Социалистической Республике Вьетнам – равным среднему расходу воды сухого (маловодного) сезона года 90%-й обеспеченности. При обосновании оптимальной емкости водохранилищ это требование является обязательным и должно учитываться как жесткое ограничение.

Требования коммунально-бытового и промышленного водоснабжения характеризуются двумя основными планируемыми (или прогнозируемыми) параметрами: объем забора речных вод и ущерб (уменьшение) речного стока вследствие забора подземных вод, гидравлически связанных с речными [13]. Потребности в воде городского и сельского населения определяются на основе укрупненных удельных показателей на одного жителя. Эти потребности удовлетворяются в первую очередь, считаются заданными, подлежащими безусловному выполнению. Потребности в воде на нужды промышленности, определяемые в зависимости от удельных показателей на единицу продукции, объема этой продукции, водохозяйственных балансов предприятий или статистических данных о водопотреблении рассматриваемых и аналогичных предприятий, в принципе могут быть переменными (в сравнительно небольших пределах изменяться в большую или меньшую сторону). Однако на практике это трудно осуществимо по причине отсутствия достоверной информации об экономических (а иногда и социальных) последствиях недопуска промышленной продукции, а тем более ее выпуска в увеличенном объеме. Поэтому в оптимизационных расчетах требования водоснабжения, как и требования охраны природы, следует учитывать в виде ограничений.

Требования борьбы с наводнениями зависят от допустимой степени риска, которая подлежит серьезному экономическому обоснованию, что представляет собой отдельную крупную проблему, решаемую за рамками настоящей работы. Необходимый для борьбы с наводнениями объем водохранилища определяется из условия недопущения превышения заданных (по экологическим и другим ограничениям) уровней воды в нижнем бьефе при прохождении паводка расчетной обеспеченности. При обосновании полезного объема водохранилища комплексного назначения целесообразно проанализировать не один, а несколько вариантов аккумуляции воды в водохранилище с целью срезки пика паводка. В частности предлагается рассматривать следующие варианты обеспеченности (вероятности превышения) максимальных расходов воды в расчетный период паводка:

- 1) речной сток 5%-й обеспеченности, величина которого чаще всего используется как в Беларуси, так и во Вьетнаме [14], при планировании мероприятий по защите территорий от наводнений;
- 2) речной сток 10%-й обеспеченности и соответственно практически минимальная величина объема водохранилища, достаточная при проведении комплексных мероприятий по защите территорий от затоплений в вегетационный период, включающих, например, регулирование стока и строительство дамб обвалования [15];
- 3) речной сток 1%-й обеспеченности, рекомендуемый в особо ответственных случаях, когда затопления территорий могут привести к гибели людей или серьезным экологическим последствиям. Естественно, необходимый для борьбы с наводнениями полезный объем водохранилища (установленный применительно к одному из вышеупомянутых вариантов) является минимальным для ВХК и может быть выше для удовлетворения требований других водопользователей.

По величине безвозвратного водопотребления из всех участников ВХК первое место в большинстве стран мира занимает орошение. Например, во Вьетнаме на нужды орошения расходуется более 80% от общего объема используемой воды. Вьетнам – второй по величине мировой экспортёр риса. В структуре водопользования Республики Беларусь долевое участие орошения значительно ниже. Однако в бассейнах малых рек Белорусского Полесья доля орошения может превышать 40% [16], а в связи с прогнозируемыми сценариями изменения климата/1/ этот процент будет только увеличиваться. Потребности в воде на нужды орошения определяются на основе данных о планируемых площадях орошаемых земель, составе сельскохозяйственных культур и нормах орошения по каждой культуре. При сопоставлении вариантов развития орошаемого земледелия можно ориентироваться на доминирующую культуру (например, рис во Вьетнаме). Тогда требуемые для орошения объемы воды могут определяться в зависимости от площадей орошаемых земель, которыми можно варьировать. Соответственно изменению площадей орошения изменяется величина подачи воды на орошение, от которой зависит объем водохранилища. Минимальное его значение определяется с учетом обязательных требований других вышеупомянутых участников ВХК, а максимальное – с учетом предотвращения переработки русл малых рек [17]. В пределах этого диапазона находится оптимальное значение, соответствующее принятому критерию оптимальности.

**Оптимизация емкости водохранилища комплексного назначения и площадей орошаемых земель.** Как уже отмечалось выше, использование экономических критериев трудно реализуемо. В связи с этим в работе [18] предложен внеэкономический, в определенном смысле «технический», критерий оптимальности в виде целевой функции:

$$f(F_{op.}) = \frac{W_{e.op} + W_{ex.}^{НПУ}}{F_{op.}} \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\text{при } F_{max} \geq F_{op.} \geq F_{e.op},$$

где  $W_{e.op}$  – свободный (остаточный) естественный речной сток ( $m^3$ ), предназначенный для орошения (с учетом удовлетворения обязательных потребностей других участников ВХК);  $W_{ex.}^{НПУ}$  – полный объем водохранилища при нормальном подпорном уровне – НПУ ( $m^3$ );  $F_{op.}$  – общая поливаемая в течение года площадь (га);

$F_{e.op}$  – гарантированная за счет естественного речного стока площадь орошения (га);  $F_{max}$  – максимальная орошаемая площадь, которая принимается равной площади земель, полив которых может быть обеспечен за счет максимально возможных водных ресурсов, т. е. за счет всего (естественного и регулируемого) речного стока при удовлетворении требований других участников ВХК, но не больше площади пригодных для орошения земель.

При отсутствии водохранилища выражение (1) фактически является средневзвешенной нормой орошения. С увеличением полной

емкости водохранилища критерий (1) вначале возрастает, поскольку полезная емкость близка к нулю и площадь орошения практически не изменяется, а затем (после достижения УМО) постепенно снижается и достигает своего минимума (но не превышая норму орошения) в районе НПУ, которым тоже можно варьировать. Критерий начинает снова возрастать, когда с увеличением полной емкости водохранилища ее полезная емкость увеличивается в гораздо меньшей степени вследствие значительной площади затоплений и роста дополнительного испарения с водной поверхности.

*Принципиальное отличие предлагаемого критерия оптимальности* от разработанных другими авторами [9, 10, 11] состоит не только в том, что он реализуем при отсутствии достоверной исходной экономической информации, но и ориентирован на оптимизацию не полезного, а полного объема водохранилища, от величины которого зависят потери воды на фильтрацию и дополнительное испарение с водной поверхности, степень заиления водохранилища, а также экономические затраты на создание и эксплуатацию водохранилища. Полный объем водохранилища включает «мертвый» и полезный объем. Мертвый объем определяется расчетом заиления водохранилища на планируемый срок его эксплуатации с учетом требований охраны природы (в пределах 15–20% от полезного объема). Полезный объем водохранилища для удовлетворения потребностей орошения, водоснабжения городского и сельского населения, промышленного водоснабжения, заполнения рыбоводных прудов, а также для обеспечения попуска в нижний бьеф по требованиям других водопользователей определяется по результатам составления водохозяйственных балансов по месячным (декадным) интервалам времени за расчетный маловодный год. Одновременно устанавливается возможность полного наполнения водохранилища за счет естественного речного стока. В противном случае анализируется целесообразность многолетнего регулирования речного стока или сокращение площадей орошения, что выходит за рамки настоящей статьи. Объем воды, аккумулируемой в водохранилище с целью срезки катастрофических расходов, определяются при составлении баланса за период расчетного паводка. Уравнения водохозяйственных балансов приведены в [18, 19].

При реализации предложенного критерия необходимо соблюдать, кроме воднобалансовых, и другие ограничения, учитывающие требования всех участников ВХК. Характеристика основных ограничений приведена выше, а их детализация – в [18].

Расчетами по критерию (1) оптимизируются два основных параметра ВХК: объем водохранилища и площадь земель, орошаемых за счет естественного и регулируемого речного стока (в пределах площадей, пригодных для орошения). Критерий может быть использован и при установлении оптимальной очередности строительства оросительных систем в водосборах малых рек того или иного региона. Редкие случаи создания каскада водохранилищ на малой реке в данной работе не рассматриваются.

С учетом вышеизложенного предлагается следующий алгоритм определения состава и оптимизации основных параметров ВХК в бассейнах малых рек:

- 1) на планируемый расчетный период, который в принципе должен быть увязан со стратегией или планом общегосударственного социально – экономического развития, определяются потребности в воде населения, промышленности и (при необходимости) рыбного прудового хозяйства, а также объемы воды, оставляемые в руслах рек для охраны природы, обеспечения выполнения межгосударственных соглашений, рекреационных и других целей;
- 2) для расчетного маловодного года составляются водохозяйственные балансы [19] (за год в целом, каждый месяц, а во Вьетнаме, при наличии соответствующих исходных данных, и за декаду вегетационного периода) по бассейну реки или ее расчетному створу, за который принимается плотина водохранилища, нижняя граница города или промышленного центра;
- 3) по результатам составления водохозяйственных балансов определяется размер дефицита или избытка воды и производится расчет полезной и соответственно полной емкости водохранилища для покрытия расчетного дефицита воды, а при избытке

воды производится расчет площади орошаемых земель за счет естественного речного стока;

- 4) на основании гидрографа максимального расчетного стока и требований недопущения превышения уровней воды в период половодья или паводка устанавливается необходимый объем аккумуляции речного стока в водохранилище для срезки пика катастрофических расходов воды; если этот объем меньше полезного объема, необходимого для покрытия расчетного дефицита воды, то он принимается равным вычисленному по п. 3;
- 5) варьируя значениями полезной емкости водохранилища и площадей орошения в интервале их минимальных и максимальных значений (определенных с учетом пп. 3 и 4) вычисляется вышеупомянутый критерий оптимальности (1), минимальное значение которого будет соответствовать оптимальной емкости водохранилища и оптимальной площади орошения.

Согласно приведенному алгоритму произведены расчеты оптимальной емкости водохранилищ и площадей орошения земель в бассейнах малых рек предгорных районов Вьетнама.

**Заключение.** Приведена общая схема обоснования состава ВХК с учетом особенностей малых рек Вьетнама и Беларуси, в которых лимитирующим водопользователем является орошение. Показано, что большинство параметров ВХК, определяемых согласно действующим национальным стандартам, являются ограничительными условиями для оптимизации важнейших параметров: емкости водохранилища комплексного назначения и площади орошаемых земель.

Предложен критерий оптимизации в виде отношения суммы естественного и регулируемого речного стока на единицу орошаемой площади. Отличие предлагаемого критерия от критериев других авторов состоит не только в том, что он реализуем при отсутствии достоверной исходной экономической информации, но и ориентирован на оптимизацию не полезного, а полного объема водохранилища, от величины которого зависят потери воды на фильтрацию и дополнительное испарение с водной поверхности, степень заиления водохранилища, а также экономические затраты на создание и эксплуатацию водохранилища.

При наличии достоверных исходных данных о технико-экономических показателях основных параметров ВХК оптимизируются по стандартному критерию минимума дисконтированных затрат или максимума дохода за планируемый интервал времени.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Логинов, В.Ф. Глобальные и региональные изменения климата. Причины и следствия. – Минск: Тетра Системс, 2008. – 240 с.
2. Яцык, А.В. Водогосударьская экалогия: у 4 т. – К: Генеза, 2004. – Т. 4. – Кн. 6–7. – 680 с.
3. Лихацевич, А.П. Сельскахозяйственыя мелиорации / А.П. Лихацевич, М.Г. Голченко, Г.И. Михайлов; под ред. А.П. Лихацевича. – Минск: ИВЦ Минфина, 2010. – 464 с.
4. Методика определения режима орошения культур – Продовольственная сельскохозяйственная организация ООН // Irrigation and Drainage Paper No. 56, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations FAO. – Rome, Italy. 1998. – 280 с.
5. Фам Нгок, Киен. Обоснование объемов и режимов подачи воды на орошение в зависимости от стока рек предгорных районов Вьетнама // Наука и техника – 2015. – № 2. – С. 61–66.
6. Голченко, М.Г. Научно-практические основы орошения сельскохозяйственных угодий на минеральных почвах Республики Беларусь: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Минск: Институт мелиорации и лугодводства, 2006 – 38 с.
7. Постановление Парламента Вьетнама: Решение об усилении управления, планирования, строительства, эксплуатации гидроэнергетики - номер: 62/2013 / QH13 // Официальное сообщение – № 1007 + 1008. – Дата: 30-12-2013. – С. 67–70.
8. Проектирование схем комплексного использования водных ресурсов; перевод с англ. – М.: Энергия, 1966. – 334 с.

9. Воропаев, Г.В. Моделирование водохозяйственных систем аридной зоны СССР / Г.В. Воропаев, Г.Х. Исмаилов, В.М. Федоров. – М. Наука, 1984 – 313 с.
10. Косолапов, А.Е. Совершенствование процесса управления водными ресурсами бассейна реки на основе автоматизированных информационно – советующих систем: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических. – Екатеринбург: РосНИИВХ, 1996. – 34 с.
11. Пряжинская, В.Г. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами / В.Г. Пряжинская, Д.М. Ярошевский, Л.К. Левит-Гуревич – М.: Физматлит. 2002. – 496 с.
12. Вода России. Экономико-правовое управление водопользованием / Под ред. А.М. Черняева. – Екатеринбург: Аква-пресс, 2000. – 408 с.
13. Черепанский, М.М. Гидрогеологические прогнозы влияния отбора подземных вод на речной сток // Природные ресурсы. – 1999. – № 3. – С. 53–69.
14. Вьетнамский национальной регламент: QCVN 04-05: 2012/BNNPTNT/ Национальный технический регламент о гидротехнических сооружениях: основные условия для проектирования. – Ханой, 2012. – 47 с.
15. Перехрест, В.С. Водохозяйственные проблемы использования и сохранения малых рек / В.С. Перехрест, В.Н. Плужников. – Минск: Наука и техника, 1986. – Книга «Проблемы использования и охраны водных ресурсов». – С. 30–43.
16. Мухавец: энциклопедия малой реки / А.А. Волчек [и др.]. – Брест: Академия, 2006. – 344 с.
17. Михневич, Э.И. Деформация русел канализованных рек Белорусского Полесья и меры по их предотвращению / Э.И. Михневич // Природная среда Полесья: особенности и перспективы развития: сб. научн. трудов. – Брест: Академия, 2006. – Том 2. – С. 479–485.
18. Фам Нгок, Киен. Критерии оптимизации параметров водохозяйственного комплекса в бассейнах малых рек предгорных районов Вьетнама // Наука и техника – 2016. – № 1. – С. 124–128.
19. Колобаев, А.Н. Рациональное использование и охрана водных ресурсов. – Минск: БНТУ, 2005 – 172 с.
20. Техника орошения и осушения для сельскохозяйственных и продовольственных культур: Стандарт TCVN 8641:2011 // Утвержден Министерством сельского хозяйства и развития сельской местности Вьетнама. – Ханой, 2011. – 41 с.

Материал поступил в редакцию 03.04.2016

**KOLOBAYEV A.N., FAM NGOK KIYEN Justification of structure and key parameters of the water management complex in basins of the small rivers of Belarus and Vietnam**

Main principles of integrated water management in small rivers of Belarus and Vietnam, which are different by the intensive development of irrigation and limited water resources.

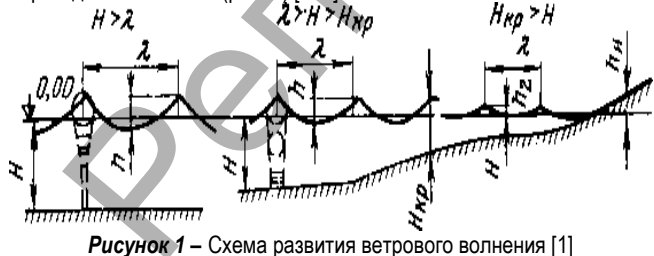
УДК 519.216.3: 627.8

Левкевич В.Е.

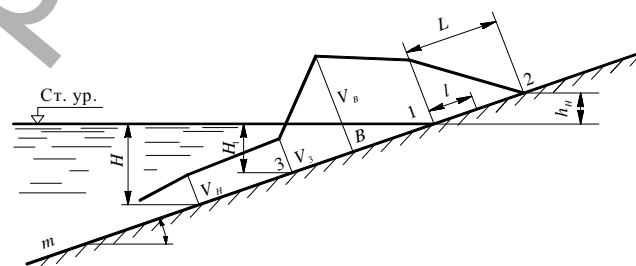
**УСТОЙЧИВОСТЬ ЧАСТИЦ НАНОСОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПРОФИЛЯ РАВНОВЕСИЯ АБРАЗИОННОГО БЕРЕГА**

**Введение.** При формировании профиля равновесия, в частности, профиля динамического равновесия абразионного берега, особую значимость приобретает характер движения наносов и условия равновесия частиц грунта на поверхности береговой отмели на различных стадиях развития водохранилища. В работе показаны условия равновесия и устойчивости частиц грунта с учетом особенностей распределение волновых скоростей по профилю в береговой зоне водохранилищ Беларуси.

**В прибрежной зоне водохранилищ,** в зависимости от соотношения глубин и высот волн, выделяются ряд зон волнения: I – зона глубокой воды, II – зона трансформации волны при подходе к берегу; III – зона обрушения; IV – зона наката волны на откос [1]. При разрушении волны наибольшие скорости волнового потока на откосе профиля равновесия возникают в точке В, соответствующей зоне опрокидывания волны (рис. 1) [1–3].



Структура волнового потока при его разрушении на откосе (береговой отмели) отображается эпюрой распределения скоростей [3–5] (рис. 2).



$L$  – расстояние между точками 1 и 2;  $l$  – расстояние от точки 1 до расчетной точки;  $H$  – глубина до минимальной скорости волны в зоне наката;  $h_n$  – высота наката;  $B$  – точка максимального давления;  $V_n$  – скорости волны в зоне наката;  $H_1$  – глубина в точке 3;  $V_e$  – скорость в точке максимального давления;  $m$  – заложение откоса;  $\alpha$  – угол заложения откоса

**Рисунок 2** – Эпюра распределение скоростей волнового потока по береговой отмели

Ширина зоны воздействия ветрового волнения на откос определяется параметрами волнения: высотой и длиной. В условиях водохранилищ Беларуси ширина зоны воздействия волнового потока на откос (подводную часть береговой отмели) ограничена зоной забурунивания, опрокидывания и наката. Ширина ее составляет от 2,5–3,5 м до 5,5–10,0 м. Высота наката волны на берег, подверженный переработке  $h_n$ , зависит от параметров волны, крутизны откоса, наличия шероховатости и непроницаемости откоса, а также угла подхода волны. Для определения высоты наката волны известно ряд эмпирических зависимостей, по-разному учитывающих перечисленные факторы. Из числа наиболее распространенных можно отметить формулы: Н.Н. Джунковского, Б.А. Пышкина, А.Г. Сидоровой,