

**ТРАНСФОРМАЦИЯ РУСЛА РЕКИ ПРИПЯТЬ В РАЙОНЕ  
Н. П. КНУБОВО И Н. П. КРАСОВО**

*Н. Н. Шешко, Н. Н. Шпендик, М. Ф. Кухаревич*

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,  
optimum@tut.by

**Аннотация**

Размывы берегов – природный процесс, свойственный любой реке. Скорость размыва колеблется от долей метра до десятков метров в год, изменчива от половодья к межени, от года к году в зависимости от стадии развития процесса, который возникает, активизируется, затухает, прекращается и вновь возобновляется. Повышение уровня антропогенной преобразованности территорий повышает вероятность негативных последствий размыва. В этих условиях необходимо прогнозирование процесса развития размыва береговой линии и разработки мероприятий по снижению скорости размыва. Среди наиболее распространенных методов прогнозирования скорости размыва береговой линии (трансформации русла) можно выделить методы пространственного анализа. В работе представлены результаты прогноза скорости размыва. Проведено моделирование эпюры скоростей в русле реки Припять с целью подбора параметров берегозащитных укреплений.

**Ключевые слова:** трансформация русла, ГИС, модель потока, берегоукрепительные работы.

**TRANSFORMATION OF THE PRIPYAT RIVER BED NEAR  
THE VILLAGE OF KRUBOVO AND THE VILLAGE OF KRASOVO**

*N. N. Sheshko, N. N. Shpendik, M. F. Kuharevich*

**Abstract**

Coastal erosion is a natural process inherent in any river. The rate of erosion ranges from a fraction of a meter to tens of meters per year, is variable from ice to low water, from year to year, depending on the stage of development of the process, which arises, is activated, attenuates, stops and resumes. Increasing the level of anthropogenic transformation of territories continues to increase the likelihood of negative consequences of erosion. Under these conditions, it is necessary to predict the development of the erosion of the coastline and the development of measures to reduce the rate of erosion. Among the most common methods for predicting the rate of shoreline erosion (channel transformation) are spatial analysis methods. The results of the forecast of the erosion rate are presented in the work. A simulation of the speed range in the Pripjat river bed was carried out in order to select parameters for coastal and protective fortifications.

**Keywords:** Channel transformation, GIS, flow model, shore-keeping works.

**Введение.** Размывы берегов рек – отражение взаимодействия речного потока и русла реки и постоянных переформирований (деформаций) последнего. Одновременно с ними наблюдается накопление наносов у противоположных берегов. Интенсивность размыва зависит от угла подхода стрежня потока к бе-

регу: чем он больше, тем больше скорость размыва. В прямолинейном русле стрежень потока располагается в его центральной части, к берегам скорость потока снижается, а живое сечение русла имеет параболическую форму [4].

В этих условиях берега не размываются. При искривлении стрежня происходит схождение струй потока возле берега. Здесь образуются положительная волна водной поверхности и местное увеличение скорости потока из-за его сжатия при набегании на берег. Это обуславливает размыв берега и формирование крутого, часто вертикального откоса. Образовавшийся перекосяк водной поверхности обуславливает возникновение в потоке циркуляционного течения, донная ветвь которого направлена от размываемого берега. Поскольку придонные слои воды наиболее насыщены наносами, это приводит к их перемещению от «сбойного» берега (так назвал 100 лет назад Н. С. Лелявский берег, к которому прижимается поток) к противоположному, где они формируют прирусловую отмель, способствующую еще большему сжатию потока. Одновременно происходит размыв дна русла, то есть его углубление, у основания крутого откоса. В результате параболическая форма живого сечения потока трансформируется в треугольную.

Наибольшая скорость размыва берега наблюдается там, где к нему прижимается стрежень потока. Выше и ниже по течению происходит последовательная смена зоны очень сильного размыва сильным, средним, слабым, наконец, берег становится неразмываемым, а затем переходит в прирусловую отмель.

Неоднородность геологического строения берегов – причина не только неодинаковых темпов их отступления, но и возникновения выступающих в русло мысов. У пойменных берегов также мысы связаны с печинами – выступами в основании береговых откосов, сложенными плотными глинами, они соответствуют ложбинам на пойме, в которых шло накопления ила. Чередование печин с отрезками берега, сложенного песками (они соответствуют гривам на пойме), обуславливает фестончатую линию берега (чередование выступов и углублений), а в прибрежной зоне потока – возникновение водоворотов, в которых происходит усиление размыва берега.

Пойменные берега и откосы низких террас подмываются потоком в половодья или дождевыми паводками практически по всей площади береговых уступов. При этом интенсивность размыва зависит от соотношения фактической скорости потока и размывающей для грунтов, слагающих берега. При низких меженных уровнях воды длина фронта размыва сокращается, ограничиваясь участками, где стрежень потока прижимается к берегу. В другие фазы водного режима у основания уступа формируется бичевник (пологонаклонная узкая площадка между уступом и урезом воды), препятствующий контакту с ним потока. Более высокие берега подвергаются воздействию потока только в нижней части. Если это уступы высоких песчаных террас, то поток вымывает в зоне контакта грунт, а вышележащая толща обрушивается в реку. Иногда в основании таких берегов формируется ниша глубиной в сторону берега до нескольких метров. Обрушение толщ происходит блоками, на некоторое время предохраняющими берег от размыва, если слагающие его пески сцементированы мерзлотой [6].

На высоких берегах рек, сложенных трудноразмываемыми породами, подмыв потоком их основания активизирует оползни, осыпи или обвалы, и отступление берега происходит за счет этих процессов. Оползневые тела образуют крупные мысы, а при небольшой ширине реки полностью ее перегораживают [5].

**Материалы и методы.** Значительную роль в трансформации гидрографической сети играют антропогенные факторы, одними из которых были частичное спрямление русел рек для пропуска паводковых вод, строительство крупных гидромелиоративных систем на прилегающих болотных массивах.

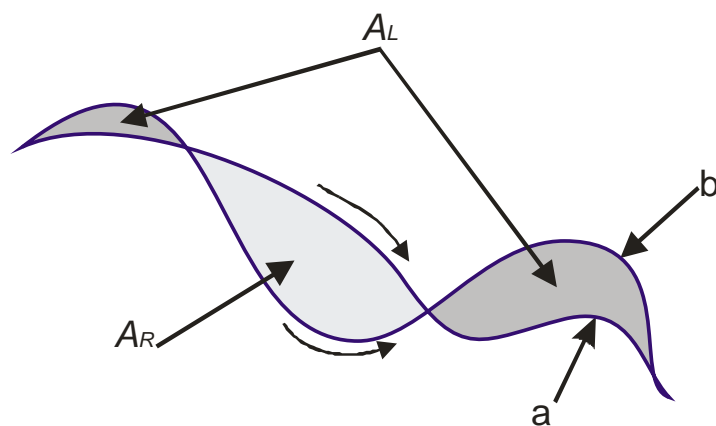
В настоящее время для дистанционного исследования состояния гидрографической сети используются два основных параметра: извилистость и густота гидрографической сети. Однако, оперируя только этими параметрами, невозможно полностью описать трансформацию гидрографической сети. В некоторых случаях при значительных изменениях положения русла реки извилистость и густота гидрографической сети не изменяется, что позволяет сделать вывод о недостаточности данных показателей.

Как количественный показатель изменения положения водотоков использовалась величина среднего смещения  $S_{\text{общ}}$  (размерность – м) русла реки на единицу ее длины [13]:

$$S_{\text{общ}} = \frac{\sum_i A_{R,i} + \sum_i A_{L,i}}{L}, \quad (1)$$

где  $\sum_i A_{R,i}$  и  $\sum_i A_{L,i}$  – сумма площадей фигур, образованных пересечением линий русла реки основного тальвега в начальный момент времени ( $t_a$ ) и текущий момент времени ( $t_b$ ) (рисунок 1), м<sup>2</sup>.

Индексы  $R$  (справа) и  $L$  (слева) отображают площади образовавшихся фигур относительно линии русла реки справа и слева по течению за время  $t_a - t_b$ .



а – положение линии русла реки в момент времени  $t_a$ ; б – положение линии русла реки в момент времени  $t_b$

**Рисунок 1** – Расчетная схема смещения русла реки

Для получения дополнительного параметра количественной оценки трансформации участка русла реки представим формулу в следующем виде:

$$S_{\text{напр}} = \frac{\sum_i A_{R,i} - \sum_i A_{L,i}}{L} \quad (2)$$

Таким образом, получаем величину направленного смещения русла реки на единицу его длины. При этом положительное значение  $S_{\text{напр}}$  указывает на смещение русла вправо относительно исходного его положения, а отрицательное

соответственно влево. Выполнение условия  $\sum_i A_{R,i} - \sum_i A_{L,i} \approx 0$  соответствует частичному спрямлению русла реки.

Погрешность описанного метода будет включать погрешность непосредственных измерений (натурно либо дистанционно) и погрешность оцифровки полученной информации. В связи с тем, что в настоящей работе основное внимание уделяется методам обработки информации, полученной на основе инструментальных измерений, а не методам проведения самих инструментальных наблюдений, точность разработанной методики возможно оценить на основе формулы, приведенной [2] в зависимости от масштаба используемой картографической информации и параметров водотока:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{M(1,3\rho^2 + a^2)y}{\rho L} \quad (3)$$

где  $L$  – длина участка русла реки основного тальвега, м;  $M$  – масштаб карты, безразмерная величина;  $\rho$  – коэффициент извилистости, безразмерная величина;  $y$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий размерность  $L$ , в данном случае он равен 0,12 м;  $a$  – коэффициент формы бассейна, обычно изменяющийся в пределах 1,5–2,5.

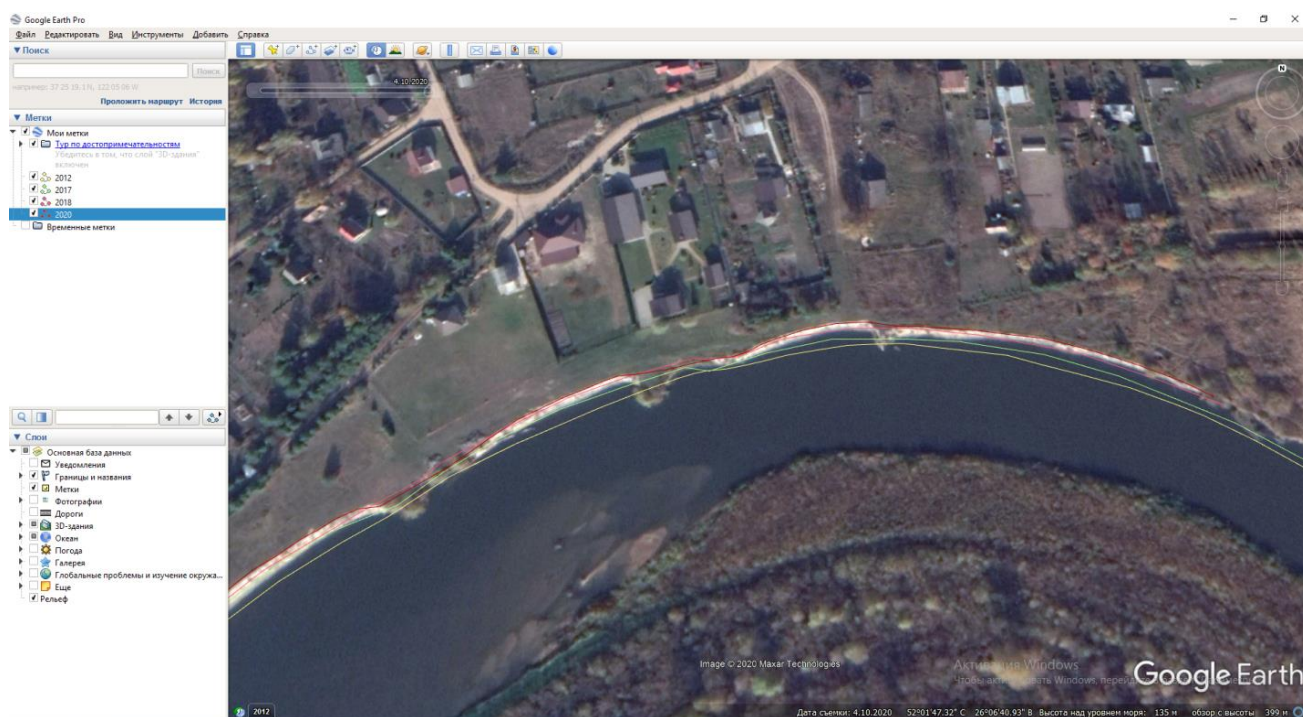
**Результаты и обсуждение.** В результате проведения комплекса мелиоративных мероприятий на водосборе р. Припять созданы крупные мелиоративные комплексы. Основным методом мелиорации на данной территории является понижение уровня грунтовых вод открытыми каналами. Для улучшения свойств водоприемника проведены спрямления и профилирование некоторых участков русла реки Припять.

В современной науке широко используются геоинформационные системы (ГИС) для анализа различного рода объектов, имеющих географическую привязку. В рамках данного исследования на первом этапе рассматривалось создание ГИС гидрографической сети р. Припять.

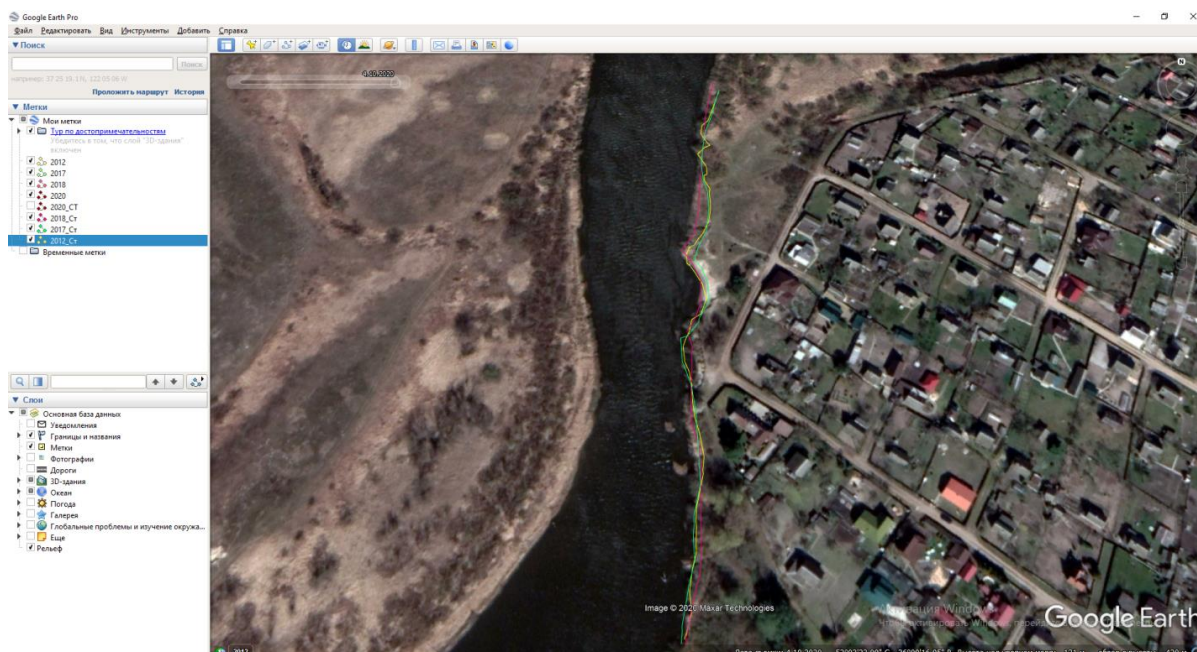
В основу разработки ГИС гидрографической сети были положены уже существующие картографические материалы. За прошедшее столетие детальное и наиболее точное картирование проводилось два раза. Впервые это выполнялось в 1930 г. польскими картографами. Состояние гидрографической сети на тот момент можно расценивать как наименее подверженное антропогенному воздействию. В 1984–1988 гг. были подготовлены более новые топографические карты данного района. Эти картографические материалы, благодаря их высокой точности, можно использовать как основу для последующей векторизации объектов. И как наиболее современные данные использованы космические снимки с наиболее подходящими для выделения гидрографии цветовыми каналами.

Все цифровые данные записывались в базу данных ГИС в географических координатах. Геодезической системой сопоставления использовалась WGS 1984. Такой способ записи дал возможность легко трансформировать данные в новую систему плоских координат. Преобразования в систему плоских координат необходимы для проведения пространственного анализа. Наиболее оптимально использование системы координат, которая опирается на проекцию Mercator, для которой принята WGS 1984 как геодезическая система соотнесения.

С использованием предложенной нами методики выполнен анализ смещения положения русла и трансформации извилистости. Кроме того, в качестве основы для выполнения исследований была использована разработанная ГИС гидрографической сети национального парка. Результаты обработки цифровой информации представлены на рисунке 2 и 3.



**Рисунок 2** - Анализ смещений бровки русла (Красово)



**Рисунок 3 - Анализ смещений бровки русла (Кнубово)**

Таким образом, проведенный анализ позволил зафиксировать изменение береговой линии во времени на исследуемом участке, что свидетельствует о целесообразности проведения берегоукрепительных работ с целью предупреждения подмыва течением и обрыва берега.

Выбор типа укрепления берегов производится при соблюдении условий технической целесообразности и экономической выгоды; рекомендуется использовать строительный материал, имеющийся на месте работ или в ближайшем районе. Техническая целесообразность заключается в том, чтобы прочность конструкции берегоукрепительных работ соответствовала тем силам, которым она должна противостоять. Известный своими работами во Франции инженер Фарг установил прямую зависимость между кривизной берега и глубиной реки у него, т. е. степенью его подмыва течением. Следует также учитывать, что нижняя часть откоса берега по высоте от подошвы до горизонта средне-низких меженных вод постоянно находится под водой и подвергается непрерывному подмывающему действию речного потока. Часть откоса от горизонта средне-низких меженных вод до горизонта самых высоких вод подвергается периодическому размывающему действию потока, разрушительному действию движущегося около берегов льда, влиянию атмосферных и грунтовых вод, зимой – действию мороза и, наконец, частично разрушается протаптыванием его животными и людьми. Выше горизонта самых высоких вод берег подвергается действию лишь атмосферных вод и мороза и протаптыванию животными и людьми. Особое внимание должно быть уделено защите нижней части откоса от подошвы его до горизонта средне-низких меженных вод, так как разрушение этой части откоса вызывает обвал всей вышерасположенной его части. Часть берегового откоса от последнего горизонта до горизонта самых высоких вод прежде всего срезают и планируют под определенный уклон – от полуторного до тройного в зависимости от характера грунта, из которого состоит берег. Для грунтов более слабых

принимают более пологий откос. По спланированному откосу устраивают тот или другой тип покрытия в зависимости, главным образом, от величины весенних скоростей течения и мощности весеннего ледохода.

Различают береговые укрепления активного и пассивного действия. Первые заметно влияют на структуру потока в районе берега, а вторые – только защищают береговой откос от размыва.

Основными укреплениями, влияющими на структуру потока у берега, являются берегозащитные шпоры (короткие высокие полузапруды). Система таких шпор обычно располагается у вогнутого берега, способствуя уменьшению скоростей течения вдоль защищаемого берегового откоса, что приводит к уменьшению и даже к прекращению размыва берега, а в ряде случаев и к образованию нового берегового откоса после заполнения наносами промежутков между шпорами. Иногда шпоры возводят при строительстве полузапруд для обеспечения устойчивости противоположного легкоразмываемого прямолинейного или слабоизогнутого берега, чтобы обеспечить необходимый размыв дна в пределах судового хода.

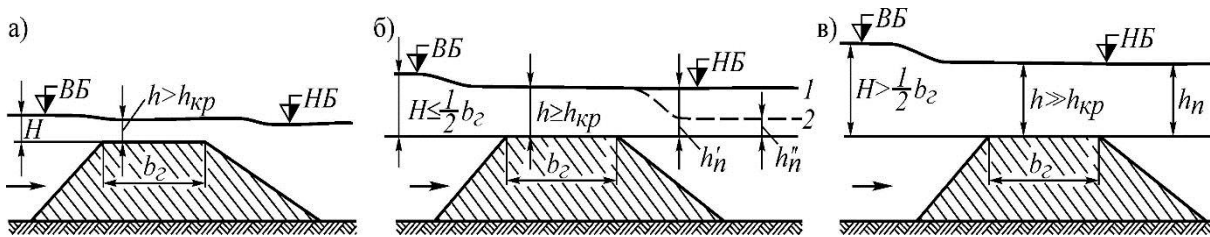
Берегоукрепительные высокие шпоры особенно эффективны на средних реках, где после непродолжительного высокого паводка с большими скоростями течения наблюдается длительная межень с малыми скоростями течения. На таких реках только в половодье наблюдается размыв берегов, который удается предотвратить такими шпорами.

В конце затруднительного участка воздействие полузапруд на поток должно постепенно ослабляться за счет уменьшения отметок гребней расположенных там полузапруд, что обеспечивает удобный переход потока к нижней плёсовой ложине. Таким образом, после возведения полузапруд как бы создается искусственный побочень с повышенными отметками в его средней части, что благоприятно сказывается на улучшении судоходных условий затруднительного участка.

Возводимые в несудоходных рукавах речного русла запруды служат для увеличения расхода воды в судоходных рукавах. В большинстве случаев они являются сооружениями меженного регулирования. Запруды заметно перераспределяют расход воды в конце спада паводка и в межень. Под действием увеличенного расхода воды в судоходных рукавах усиливается саморазмыв гребней расположенных там перекатов и происходит их углубление.

В некоторых случаях запруды могут устраиваться и для общего развития судоходного рукава, т.е. для размыва его не только по глубине, но и по ширине.

Вместе с увеличением расходов воды перераспределяются также и твердые расходы (наносы) в пользу судоходных рукавов, что является отрицательной стороной работы запруд в потоке. Между тем, основная часть твердого стока наносов равнинных рек проходит при высоких уровнях, когда влияние запруд на поток сказывается мало. Так как запруды меженного действия имеют низкие отметки гребней, они работают преимущественно в затопленном состоянии как водослив, через который под напором происходит перелив воды из верхнего бьефа в нижний.



**Рисунок 4** - Схемы перелива воды через запруду:

а – короткий лоток с горизонтальным дном; б – водослив с широким порогом (затопленный – 1 и незатопленный – 2); в – водослив практического профиля

При переливе воды через запруду может наблюдаться три стадии движения потока: короткий лоток с горизонтальным дном при весьма малых толщинах переливающегося через запруду слоя воды; водослив с широким порогом при напорах, не превосходящих половины ширины гребня запруды; водослив практического профиля при напорах более половины ширины гребня запруды.

Обычно при пропуске меженного расхода воды запруды работают в потоке в качестве незатопленных или затопленных водосливов с широким порогом. С повышением уровня и увеличением расхода воды более вероятной становится работа запруды в качестве затопленного водослива с широким порогом или водослива практического профиля, с глубинами на гребне запруды больше критических значений, определяемых по формуле:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{q^2 / g} \quad (4)$$

где  $q$  – удельный расход воды, приходящийся на единицу длины запруды.

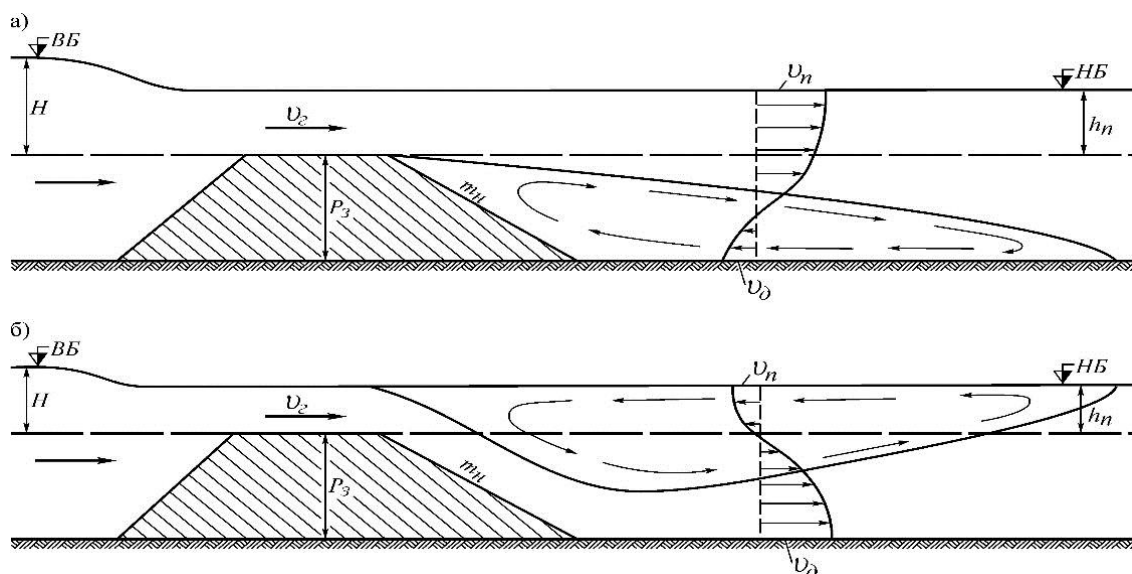
Расход воды, переливающийся через запруду, оценивается по формуле водослива:

$$Q = \sigma_n m_p \sqrt{2gb} H_0^{3/2}, \quad (5)$$

где  $\sigma_n$  – коэффициент подтопления, зависящий от напора воды и положения уровня в нижнем бьефе запруды;  $m_p$  – коэффициент расхода, зависящий от ширины гребня и конструкции запруды;  $b$  – ширина водослива (длина запруды);  $H_0$  – полный напор воды на запруде с учетом скорости течения на подходе.

Весьма важным для работы запруды является режим сопряжения переливающегося через гребень сооружения потока с нижним бьефом. Как показали натурные наблюдения и лабораторные исследования, возможны два режима сопряжения потока с нижним бьефом: поверхностный и донный (рисунок 5).





**Рисунок 5** - Режимы сопротивления бьефов запруды (схемы):  
а – поверхностный; б – донный

При поверхностном режиме транзитная струя, сходящая с гребня запруды, продолжает движение в верхнем слое потока, медленно расширяясь в счет своей нижней границы. Между расширяющейся транзитной струей, низовым откосом запруды и дном образуется большая водоворотная область с обратной скоростью течения у дна. Длина водоворотной зоны составляет в среднем  $L_6 = 6P_3$ , где  $P_3$  – высота запруды. Придонные скорости течения, имеющие обратное по отношению к основному потоку направление течения, по своей абсолютной величине невелики и составляют примерно

$$v_0 = (1/4 \div 1/3) v_2, \quad (6)$$

где  $v_2$  – скорость течения на гребне запруды.

Кроме того, на участке, прилегающем к низовому откосу запруды, наблюдаются нестационарные восходящие токи – вихри с вертикальной скоростью подъема  $v_6 = (1/50 \div 1/25) v_2$ .

Другая картина сопряжения транзитного потока с нижним бьефом наблюдается при донном режиме. В этом случае струя потока, сходящая с гребня запруды, устремляется вдоль ее низового откоса до дна нижнего бьефа, сохраняя большую скорость течения, примерно равную значению скорости потока на гребне  $v_0 \approx v_2$ . Оказавшись на горизонтальном дне нижнего бьефа, транзитная струя начинает постепенно расширяться за счет своей верхней границы. Над транзитным потоком образуется значительная водоворотная область с обратными скоростями течения у поверхности воды.

Для обоснования устойчивости сооружения во время эксплуатации, в зависимости от режима сопряжения бьефов находится длина крепления дна ниже запруды.

В поперечном сечении профиль полузапруды из каменной наброски имеет форму трапеции с шириной по гребню 2–4 м и откосами: верховым (напорным) от 1:1 до 1:1,5, низовым (сливным) от 1:1,5 до 1:2 и речным в районе головы сооружения от 1:3 и более.

Гребень полузапруды обычно делают с продольным уклоном от 1:300 до 1:100 с подъемом от головы сооружения к корню (берегу). На подходе к берегу гребню сооружения придают более крутой подъем с уклоном от 1:25 до 1:10. Это делается для более плавного отклонения потока в сторону выправительной трассы и лучшей сохранности тела сооружения, особенно в районе корня (в месте примыкания к берегу). Отметка гребня полузапруды меженного действия определяется расчетом [7, 8].

На основе расчетных параметров приняты следующие размеры берегоукрепительных сооружений.

#### *Участок Красово*

На участке Красово для смещения гидродинамической оси потока от левого размываемого берега принято возведение системы из шести полузапруд, и уполаживание берегового откоса до заложения 1:3 путем подсыпки откоса грунтом, разрабатываемым грейфером на понтоне, и крепление откоса каменной наброской крупностью 10...20 см толщиной 40 см по щебню толщиной 10 см с устройством зуба из камня 20...30 см. Протяженность берегоукрепления составляет 290 м. Берегозащитные мероприятия на вогнутом левом берегу р. Припять в местах наиболее интенсивного размыва берега (по результатам многолетних натуральных наблюдений) и месте, наиболее приближенном к постройкам. В качестве берегозащитных сооружений приняты поперечные полузапруды меженного типа. По отметке минимального уровня ледохода  $p = 90\%$  134,72 м и средней толщине льда  $t = 31$  см принимаем отметку гребня полузапруды – 134,40 м. Поперечные полузапруды, устраиваемые под углом  $60^\circ$  к гидродинамической оси потока, образуют впереди себя подпор отжимающий поток к середине русла. За полузапрудой создаются зоны пониженного давления с интенсивным всасыванием донных течений, насыщенных наносами, которые отвлекаются с судового хода и откладываются между полузапрудами.

Конструкция выправительных сооружений (берегозащитных) сооружений в виде поперечных дамб способствует образованию устойчивого левого берега и не допустит размыв и разрушение крепления откосов берега.

Поперечные полузапруды устраиваются из камня крупностью 10...20 см, голова полузапруды из камня крупностью 20...30 см и имеет форму трапеции.

Так как русло реки в местах устройства полузапруд максимально стеснено, скорости у головы сооружения максимально возрастают, поэтому необходимо устройство крепления вокруг полузапруд. Вокруг сооружения укладывается постель из щебня фр. 40...70 мм. С напорной стороны постель укладывается на расстояние 3 м, со сливной стороны – 4 м, а со стороны головы – 4 м. Толщина постели из щебня принята  $t = 30$  см.

Для сохранения параметров живого сечения реки и для исключения подмыва правого берега русло реки углубляется. Стеснение потока не происходит, поэтому скорости в расчетных условиях практически не изменяются. Вырабатываемый грунт используют для выполаживания откосов.

Используя программный комплекс COMSOL Multiphysics, смоделирован водный поток в исследуемом русле р. Припять. COMSOL Multiphysics – универсальная среда для моделирования сложных физических процессов. Пакет

COMSOL Multiphysics позволяет моделировать практически все физические процессы, которые описываются частными дифференциальными уравнениями [3]. Основная идея метода состоит в том, что любую непрерывную величину можно аппроксимировать дискретной моделью, являющейся множеством кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей [9–11]. В общем случае непрерывная величина заранее неизвестна и нужно определить значение этой величины на исследуемой области. Закон изменения непрерывной величины чаще всего задается дифференциальным уравнением.

Построение дискретной модели можно разбить на несколько этапов:

1. В рассматриваемой области определяется конечное число точек. Эти точки называются узловыми точками или просто узлами. Узловые точки могут располагаться на разном, нефиксированном расстоянии друг от друга.

Значение непрерывной величины в каждом узле далее становится переменной, которая должна быть определена.

1. Область определения непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами. Эти элементы неразрывны, пересекаются только на границах, а значит имеют общие узловые точки и в совокупности охватывают всю исследуемую область. Одномерными конечными элементами являются отрезки, в качестве двумерных конечных элементов чаще выступают треугольники и четырехугольники, в качестве трехмерных конечных элементов чаще используют тетраэдры и параллелепипеды.

2. Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе базисными (интерполяционными) функциями, которые задаются с помощью узловых значений этой величины. Для каждого  $i$ -го элемента определяется своя интерполяционная функция  $h_i(r_i)$ , где  $r_i$  – радиус вектор, описывающий геометрическое положение  $i$ -го элемента. Базисные функции задаются таким образом, чтобы сохранялась непрерывность величины на границах элементов. В зависимости от интерполяционной функции различают наиболее часто используемые симплекс- и комплекс-элементы [1].

Симплекс-элементами являются элементы с аппроксимирующей функцией-полиномом первой степени, а комплекс-элементами являются элементы с аппроксимирующей функцией-полиномом 2-го или более высоких порядков. Использование комплекс-элементов позволяет аппроксимировать область более точно, но при этом возрастает количество узловых точек, необходимых для аппроксимации конечного элемента такой функцией. При этом число узлов в элементе зависит от степени интерполяционного полинома и размерности пространства расчетной области. Для одномерного элемента  $i$  выполняется следующее соответствие:

$$n_k = k_i + 1, \quad (7)$$

где  $n_k$  – количество узлов, необходимое для построения полинома  $k_i$  степени.

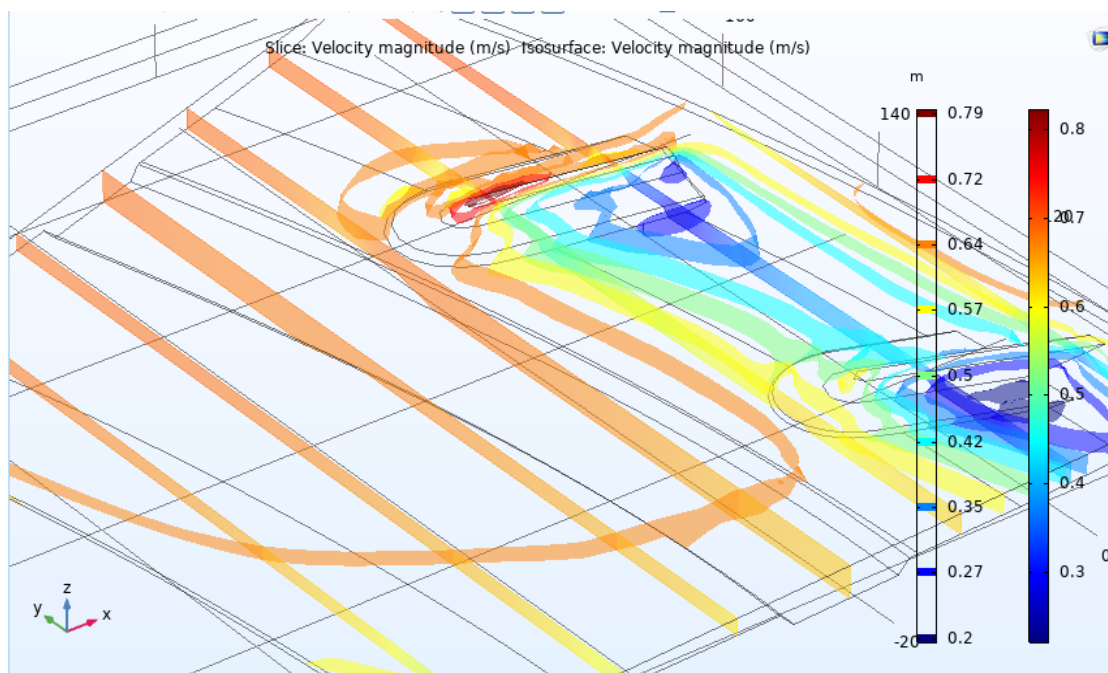
Симплекс-элементами в одномерном пространстве являются отрезки, в двумерном пространстве – треугольники, в трехмерном пространстве – тетраэдры. Комплекс-элементы могут быть той же формы, что и симплекс-элементы, но имеют при этом дополнительные узлы. Дополнительные узлы в двумерных и трехмерных комплекс-элементах располагаются таким образом,

чтобы, с одной стороны, равномерно распределить их по пространству. С другой стороны, чтобы поставить наибольшее количество узлов на границы между элементами, тем самым уменьшая  $N_u$  общее количество узлов в конечно-элементной сетке.

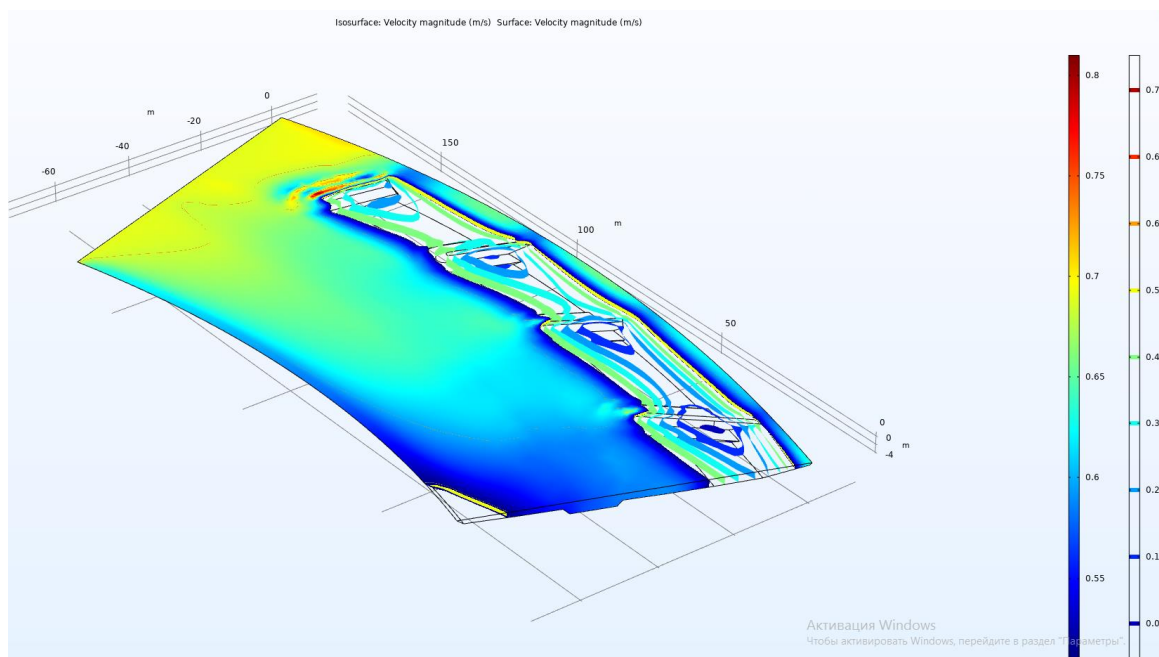
Наиболее важной характеристикой конечно-элементной сетки выступает количество степеней свободы. Количество степеней свободы  $N$  – это количество вычисляемых переменных в дискретной модели, находящееся как произведение количества неизвестных величин (для задачи с несколькими неизвестными или векторными величинами) на число узлов  $N_u$  в конечно-элементной сетке после построения дискретной модели [10].

После построения дискретной модели значения в узлах должны быть подобраны таким образом, чтобы получить наилучшее приближение к истинному распределению значений искомой величины в узлах. Такой подбор должен быть проверен нахождением невязки  $\varepsilon$ , где  $\varepsilon$  должна стремиться к нулю. Под невязкой  $\varepsilon$  понимают ошибку вычисления, равную различию между значениями исходного дифференциального уравнения, описывающего изучаемый процесс, и результатом, полученным подстановкой значений вычисления в дифференциальное уравнение. Другими словами, на множестве элементов осуществляется минимизация функционала вариационной задачи. Чтобы исключить необходимость вариационной формулировки задачи, в 1915 г. Галёркиным был предложен метод приближенного решения краевой задачи. Метод Галёркина заключается в том, что должно выполняться следующее условие: невязка должна быть ортогональна функциям, используемым при аппроксимации. Метод Галёркина имеет также усовершенствованный вариант – метод Галёркина-Петрова, при котором разложение решения производится по одному базису, а ортогональность невязки требуется к другому [12].

На основе описанных методик были получены следующие расчетные модели, представленные на рисунках 6–7.



**Рисунок 6** – Модель эпюр расчетных средних скоростей потока



**Рисунок 7** – Численное моделирование поверхностных скоростей со скоростью более 0,51 м/с (средняя не размывающая скорость для мелкозернистого песка с крупностью 0,1–0,25 мм принята по таблице 3.10 «Гидротехнические сооружения / Г. В. Железняков» при глубине потока 1–2 м равной 0,51 м/с)

**Заключение.** Весь процесс формирования русла очень тесно связан с неустановившимся режимом движения потока, создающимся в результате смены высоких и низких горизонтов и расходов. Деформации, осуществляемые проходящим паводком, находятся в большой зависимости от скорости, расхода, интенсивности нарастания, спада и длительности паводочной волны. С целью определения влияния водного режима р. Припять на формирования русла, нами было проведено численное моделирование скоростей потока.

Численное моделирование с помощью дифференцированного метода конечных элементов проводилось для средней скорости потока 0,69 м/с, рассчитанной для периода летней межени расчетного расхода 50%-ой обеспеченности отнесенного к площади живого сечения потока, а также с учетом запроектированных параметров запруд. Распределение скоростей потока в живом сечении принималось равномерным.

В результате исследований оценивалось перераспределение поля скоростей потока на поверхности и у дна. Моделировался наиболее неблагоприятный расчетный случай с высокими придонными скоростями. За среднюю не размывающую скорость принята скорость 0,51 м/с.

Установлено, что в районе установки запруд поток теряет свою энергию, однако при этом скорость потока вне запруд и вдоль береговой линии остаётся больше размывающей, что свидетельствует о необходимости крепления береговых откосов.

Численное моделирование придонных скоростей в русле также показало их снижение уже на подходе к 4 запруде, что при определенных условиях будет способствовать отложению влекомых взвешенных наносов. Однако начиная с

первой запруды и далее с каждой последующей запрудой, за ними формируются скорости, превышающие скорость размыва.

Устройство запроектированных запруд позволит снизить скорости течения и на противоположном берегу, однако в средний по водности год будут формироваться размывающие скорости.

#### Список цитированных источников

1. Анкудинов, В. Е., Афлятунова, Д. Д., Кривилев, М. Д., Гордеев, Г. А. Компьютерное моделирование процессов переноса и деформаций в сплошных средах: Учебное пособие. 1-е издание / В. Е. Анкудинов и др. – Ижевск : Изд-во «Удмуртский университет», 2014. – 108 с.
2. Желязняков, Г. В. Точность гидрологических измерений и расчетов / Г. В. Желязняков, Б. Б. Данилевич. – Л. : Гидрометеорологическое изд-во, 1966. – 240 с.
3. Курушин, А. А. Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL / А. А. Курушин. – М., «One-Book», 2016. – 376 с.
4. Логинов, В. Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек. – Минск : Тонпик, 2006. – 160 с.
5. Макаревич, А. А. Речной сток и русловые процессы : пособие / А. А. Макаревич, А. Е. Яротов. – Минск : БГУ, 2019 – 115 с.
6. Мележ, Т. А. Инженерно-геологическая оценка экзодинамических режимов долины реки Припять и прилегающих территорий / Т. А. Мележ, А. И. Павловский // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2015. – № 3. – С. 122–124.
7. Михневич, Э. И. Левкевич, В. Е. Устойчивость берегов водохранилищ при формировании профиля динамического равновесия в несвязных грунтах / Э. И. Михневич и др. // Мелиорация. – 2016. – № 4 (78). – С. 18–23.
8. Михневич, Э. И. Пропускная способность русел регулируемых рек и водоотводящих каналов / Э. И. Михневич // Природная среда Полесья: особенности и перспективы развития: сб. науч. тр. Вып. 1: в 2 т. – Т. 2. Водные ресурсы Полесья. – Брест : Альтернатива, 2008. – С. 38–41.
9. Официальный сайт ComsolMultiphysics. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.comsol.com/>, свободный.
10. Ошовский, В. В. Использование компьютерных систем конечно-элементного анализа для моделирования гидродинамических процессов / В. В. Ошовский, Д. И. Охрименко, А. Ю. Сысоев // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія, 2010. – Вип. 15(163). – С. 163–173.
11. Трусков, П. В. Введение в математическое моделирование : Учебное пособие / П. В. Трусков. – М. : Университетская книга, Логос, 2007. – 440 с.
12. Флетчер, К. Численные методы на основе метода Галёркина / К. Флетчер. – М. : Изд-во «Мир», 1988. – 353 с.
13. Волчек, А. А. Методика оценки трансформации гидрографической сети (на примере ООПТ «Беловежская пуца») / А. А. Волчек, Н. Н. Шешко // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2011. – № 2 (68) : Водохозяйственное строительство и теплотехника. – С. 20–25.