

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЫВА БЕРЕГОВ РЕКИ ЗАПАДНЫЙ БУГ

**Волчек¹ А. А., Кухаревич² М. Ф., Парфомук³ С. И.
Сидак⁴ С. В., Шешко⁵ Н. Н., Шпендик⁶ Н. Н.**

¹ Д.г.н., профессор, профессор кафедры природообустройства
УО «Брестский государственный технический университет»
Брест, Беларусь, volchak@tut.by

² Магистр, ассистент кафедры природообустройства
УО «Брестский государственный технический университет»
Брест, Беларусь, kukharevichmikhail@gmail.com

³ К.т.н., доцент, заведующий кафедрой математики и информатики
УО «Брестский государственный технический университет»
Брест, Беларусь, parfom@mail.ru

⁴ Магистр, старший преподаватель кафедры математики и информатики
УО «Брестский государственный технический университет»
Брест, Беларусь, harchik-sveta@mail.ru

⁵ К.т.н., доцент, начальник научно-исследовательской части
УО «Брестский государственный технический университет»
Брест, Беларусь, optimum@tut.by

⁶ К.г.н., доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции
УО «Брестский государственный технический университет»
Брест, Беларусь, shpendik@tut.by

Река Западный Буг – трансграничная река в Восточной Европе. Среднегодовой расход воды на границе Украины и Беларуси составляет 50 м³/с, при выходе за пределы Беларуси – 100 м³/с. Ретроспективный анализ данных аэрофотосъемки за период с 2004 по 2022 гг. показал, что значительные изменения береговой линии происходят со стороны правого (белорусского) берега из-за характера течения реки с юга на север и направления вектора силы Кориолиса со среднегодовой скоростью перемещения береговой линии – 0,85 м/год.

Основными факторами, которые приводят к смещению фарватера р. Западный Буг, выступают: абразия (размыв) берегов, прорыв меандров, многорукавность (образование отмелей и островов). Максимальное установленное смещение составило 470 м. В результате проведенных ранее исследований установлено 36 участков р. Западный Буг со значительным (более 100 м) смещением фарватера реки за 35-летний период (1981–2016 гг.). Выявлено 198 участков многорукавности и 93 участка абразии правого берега. При этом величина абразии правого берега на 255 участках составила 3,665 км². Естественные гидроморфологические изменения р. Западный Буг привели как к абразии правого берега (смещения русла вправо), так и к аккумуляции правого берега (смещения русла влево). Величина аккумуляции правого берега на 252 участках составила 4,137 км². Несмотря на то, что общий баланс абразии и аккумуляции правого берега положительный для Беларуси на всем трансграничном участке протекания р. Западный Буг (+47,2 га), следует отметить интенсивную превалирующую

абразию правого берега на «верхнем участке» р. Западный Буг от государственной границы «Беларусь – Украина» до н. п. Домачево, а также ряд отдельных участков с интенсивной абразией правого берега (более 3 га) на «среднем участке» от н. п. Домачево до г. Бреста и «нижнем участке» от г. Брест до н. п. Крынки.

Наиболее проблематичным является участок р. Западный Буг ниже г. Бреста, где существующая меандра может сомкнуться и в корне поменять фарватер реки. Средний многолетний расход воды в исследуемом створе составляет $80,2 \text{ м}^3/\text{с}$, а весеннего половодья 1 % обеспеченности – $818 \text{ м}^3/\text{с}$. В связи с происходящими процессами береговой эрозии на пограничном участке р. Западный Буг нами дано гидрологическое обоснование для проведения руслорегулирующих и берегоукрепительных мероприятий.

С этой целью создана цифровая модель рельефа местности водосбора и построена детальная модель русла, которая основана на использовании уравнений малой воды и Навье-Стокса. Выделены участки подверженные риску размыва.

Первоочередным этапом разработки программы явилось проектирование ее архитектуры, включая в себя определение структуры данных, выбор методов численного анализа и интеграцию с интерфейсом MIKE 3. На этапе реализации математической модели написаны алгоритмы, основанные на уравнениях малой воды. Используемые численные методы для решения дифференциальных уравнений обеспечивают стабильность и точность расчетов.

Интеграция программы с MIKE 3 потребовала взаимодействия с API и техническими спецификациями MIKE 3. Это включало в себя корректную передачу данных между программой и платформой MIKE 3, а также обеспечение соответствия стандартам и требованиям MIKE 3.

Тестирование программы проводилось на различных тестовых сценариях, включая различные гидродинамические условия и географические особенности. Далее программа подвергалась валидации и калибровке. Этот этап включал в себя сравнение результатов моделирования с реальными данными и регулировку параметров модели для достижения оптимального соответствия реальным условиям.

Для реализации программы выбран язык программирования, обеспечивающий эффективные вычисления и удобное взаимодействие с существующей средой MIKE 3. В результате выбора был сделан в пользу Python/C++, обеспечивающего гибкость и высокую производительность.

Для ускорения разработки и обеспечения стабильности программы использованы соответствующие библиотеки и фреймворки. Это включало в себя библиотеки для численных вычислений, обработки данных и взаимодействия с интерфейсом MIKE 3.

Программа разрабатывалась с учетом модульной архитектуры, позволяющей легкость в поддержке и дальнейшем расширении. Модули включали в себя основные вычислительные блоки, интерфейс взаимодействия с MIKE и компоненты для обработки входных и выходных данных.

Решение системы уравнений малой воды реализовано с использованием численных методов. Для успешной интеграции программы с MIKE осуществлялось

во взаимодействие с API. Это включало передачу данных о гидродинамической модели между программой и MIKE, а также управление процессами моделирования через интерфейс MIKE.

Настройка параметров модели осуществлялась на основе калибровочных данных в виде максимального расхода весеннего половодья 50 % расчетной обеспеченности и при отсутствии влияния планируемых к возведению оградительных дамб при следующих параметрах: среднегодовой сток р. Западный Буг – исследуемы створ – 80,2 м³/с, отметка во входном сечении 126,58 м БС, гидравлический уклон 0,122 ‰. Используя данные параметры модели, производилась настройка естественной шероховатости русла реки. В модели учитывалось влияние ускорения Кориолиса, а также неравномерность модельной сетки.

Расчеты проводились с применением серверного вычислительного оборудования БрГТУ и позволили построить картину пространственных временных закономерностей уровней свободной поверхности потока, а также поля скоростей. Общее пространственно-временное разрешение модели 371000 ячеек с 100–200 временными интервалами при 10–20 слоях вертикальной сетки. Таким образом, максимальное количество расчетных ячеек 1484 млн и соответственно тоже количество уравнений в системе. Настройка осуществлялась за счет корректировки параметров шероховатости русла, а также структуры и параметров расчетной сетки. Количество временных интервалов корректировалось с целью достижения установившегося режима, как правило, стабилизация наблюдалась на 80–90 временном шаге.

По результатам анализа выделены участки подверженные риску размыва, а именно прибрежная/береговая зона по правому берегу в районе излучины как перед ней, так и после нее. Второй участок относится к пойменной зоне, затопление которой происходит в период весеннего половодья соответствующий максимальному сближению меандр русла. Определены расчетные скорости и участки, рекомендуемые к креплению. Так как полученные в результате моделирования скорости не превышают 2 м/с в русловой части рекомендуемым методом крепления является каменная наброска или каменное мощение. Для пойменной части вблизи двух меандр также необходимо предусмотреть крепление в виде каменной наброски с устройством сопрягающего сооружения для пропуска паводковых вод. Размеры сооружения и параметры крепления определить проектом исходя из фактических геологических условий, устойчивости к размыву и доступности применимых материалов.