

УДК 502/504:532.5

М. А. ВОЛЫНОВ

Государственное научное учреждение

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова

УРАВНЕНИЕ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ НА РЕЧНЫХ ПЕРЕКАТАХ

Рассмотрено ускоряющееся течение речного потока в пределах переката. С использованием приближений теории пограничного слоя получено уравнение импульсов действующих сил в двумерной постановке. Особенность такого подхода состоит в учете продольного градиента давления и изменения коэффициента гидродинамического сопротивления по длине потока. Показано, что для рассматриваемых условий уравнение импульсов совпадает по форме с известным уравнением Т. Кармана для пограничного слоя на плоской пластине, обтекаемой потоком с постоянной скоростью.

Речной перекат, неравномерное ускоренное течение, пограничный слой, коэффициент гидродинамического сопротивления, уравнение импульсов.

The article considers the accelerated flow within the river crossover. There are received momentum equations of acting forces in the two-dimensional formulation using approximations of the boundary layer theory. The feature of the approach is accounting of the longitudinal pressure gradient and change of the hydraulic resistance coefficient along the river flow. It is shown that for the conditions under consideration the momentum equation coincides with the T. Karman equation for a boundary layer on the flat plate flowed round by a flow with a constant speed.

River crossover, irregular accelerated river flow, boundary layer, coefficient of hydraulic resistance, momentum equation.

Речные перекаты являются распространенными русловыми образованиями, морфометрическое строение которых разнообразно [1]. Однако во всех случаях на подходе к перекаату располагается плесовая лощина с глубинами, существенно большими, чем на самом перекаате. Поток, покидающий плесовую лощину, переливается через гребень переката и поступает на его низовую часть, которая, по данным Г. И. Шамова, может иметь протяженность от нескольких десятков метров до нескольких километров [2]. Перекааты создают препятствия для судоходства, и для поддержания судового хода требуется периодическое углубление русла. Для прогнозирования процессов отложения наносов и русловых деформаций на перекаатах, планирования дноуглубительных работ

необходим расчет изменения скорости течения и глубин. В связи со сложной пространственной геометрией русловых мезоформ, к которым относится перекат, возможно только численное 3D моделирование течения при наличии детальной информации о граничных и начальных условиях на расчетном участке (рис. 1).

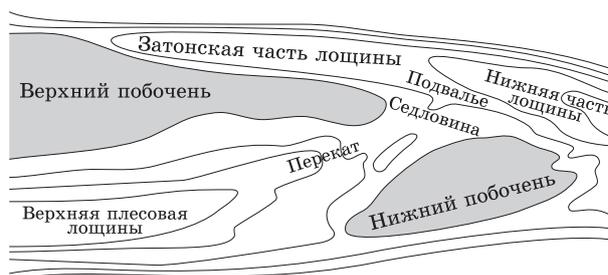


Рис. 1. Элементы речного переката

Известно, что течение на перекатах качественно различно в период межени и в половодье. В настоящей статье делается попытка рассчитать течение в так называемом «корыте» переката в приближениях теории пограничного слоя.

В пределах плесовой лоцины в меженные периоды имеют место максимальные глубины и весьма малые скорости течения. Глубины на плесах в 3–5 раз превышают среднюю глубину на примыкающем участке и достигают 12...15 м и более. Глубины на перекатах в межень существенно меньше средней глубины речного потока.

Таким образом, даже в цилиндрическом русле речной поток является в значительной степени локально неоднородным и неравномерным. Традиционные методы расчета в значительной мере сглаживают эти локальные неравномерности, устанавливая усредненное положение кривой свободной поверхности.

В пределах перекатов характеристики потока резко отличаются от тех, которые были на плесовых лоцинах, приближаясь к значениям, отвечающим новым условиям течения (уклон, шероховатость, глубина). Для расчета характеристик течения на перекате может быть использована теория пограничного слоя, которая позволяет более точно учитывать изменение коэффициента сопротивления на участке неравномерного движения.

Прежде чем переходить к детальному анализу течения, следует установить тип кривой свободной поверхности при переходе потока из плесовой лоцины на перекат. Рассматривая случай спокойного течения на перекате (при уклоне дна $i > 0$) и на плесе, имеем: уклон – меньше критического ($i < i_{кр}$); глубина – больше критической ($h > h_{кр}$).

В зависимости от режима уровней ниже переката (глубина в конце переката h больше или меньше нормальной глубины) на перекате возможна кривая спада либо кривая подпора [3]. При дальнейшем анализе формирования потока на перекате рассматривается кривая спада, русло считается призматическим, перекатный участок достаточно длинным ($L_{II} \gg h$) и уклон дна постоянным.

В рамках предлагаемой расчетной схемы считается, что при входе на перекат распределение скоростей по нормали к дну равномерное ввиду малости скоростей течения, малости сил трения и некоторого стеснения потока, что, как известно, при-

водит к выравниванию распределения скоростей по поперечному сечению (рис. 2).

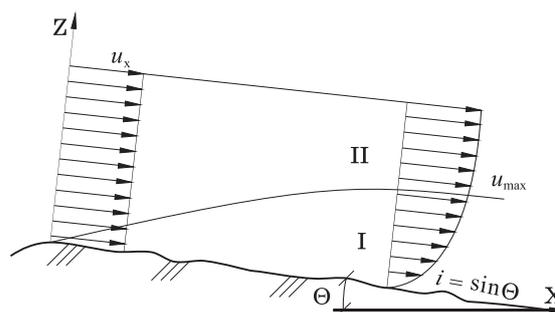


Рис. 2. Схема развития пограничного слоя при ускорении потока: I – пограничный слой; II – потенциальное ядро потока; Θ – угол наклона дна к горизонту; X – продольная координата; Z – расстояние от дна

Скорости течения вблизи дна в пределах перекатного участка уменьшаются под действием трения. Слой воды, в пределах которого заметно тормозящее действие сил трения и уменьшение скорости течения, называется пограничным слоем. Толщина этого слоя δ увеличивается по направлению течения. Выше пограничного слоя течение не возмущено влиянием сил трения, и здесь слой движется со скоростью u_{max} – это потенциальное ядро потока. Разделение потока на пограничный слой и потенциальное ядро потока в значительной степени условно.

За толщину пограничного слоя δ принимают расстояние от дна до точки, в которой скорость составляет 99 % скорости в потенциальном ядре потока. Трудность точного определения толщины пограничного слоя приводит к необходимости введения дополнительных линейных характеристик: толщины вытеснения δ_1 и толщины потери импульса δ_2 .

Толщина вытеснения δ_1 находится из соотношения $u_{max} \delta_1 = u_{max} \delta - \int_0^{\delta} u dz$ и имеет следующий вид:

$$\delta_1 = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{u_{max}} \right) dz. \quad (1)$$

Из (1) видно, что δ_1 характеризует уменьшение расхода в реальном пограничном слое по сравнению с течением без трения. Она практически не зависит от способа выбора δ и определяется только законом распределения скоростей в пограничном слое.

В реальном пограничном слое действие сил трения приводит к уменьшению количества движения J по сравнению с

невозмущенным течением. Эту разницу можно представить так:

$$J = \rho u_{\max}^2 \delta - \rho \int_0^{\delta} u^2 dz - \rho u_{\max} \left(u_{\max} \delta - \int_0^{\delta} u dz \right), \quad (2)$$

где ρ – плотность воды.

В (2) последнее слагаемое связано с уменьшением количества движения вследствие вытеснения части расхода из пограничного слоя через его верхнюю границу при торможении потока. Величину J можно также представить в виде $\rho u_{\max}^2 \delta_2$.

Тогда для толщины потери импульса получим:

$$\delta_2 = \int_0^{\delta} \frac{u}{u_{\max}} \left(1 - \frac{u}{u_{\max}} \right) dz. \quad (3)$$

Таким образом, для того чтобы реальный поток обладал тем же количеством движения, что и идеальный, толщина его должна быть больше (по сравнению с идеальным) на толщину δ_2 .

Для установления связи между толщиной пограничного слоя δ , толщиной вытеснения δ_1 , толщиной потери импульса δ_2 воспользуемся степенным законом распределения скоростей по глубине потока:

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{z}{\delta} \right)^n. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (1) и в (3), получим:

$$\delta_1 = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{u_{\max}} \right) dz = \delta \frac{n}{n+1}; \quad (5)$$

$$\delta_2 = \int_0^{\delta} \frac{u}{u_{\max}} \left(1 - \frac{u}{u_{\max}} \right) dz = \delta \frac{n}{(n+1)(2n+1)}. \quad (6)$$

Разделив (5) на (6), получим:

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = 2n+1. \quad (7)$$

Таким образом, определены геометрические характеристики пограничного слоя потока, необходимые для расчета течения на перекате.

Изменение количества движения в пограничном слое по мере его развития связано с действием системы сил, включая силу сопротивления по дну. Расчет пограничного слоя с использованием теоремы импульсов был предложен Т. Карманом. Уравнение импульсов в интегральной фор-

ме может быть получено либо интегрированием уравнения движения, либо с помощью теоремы импульсов для контрольного объема пограничного слоя (рис. 3).

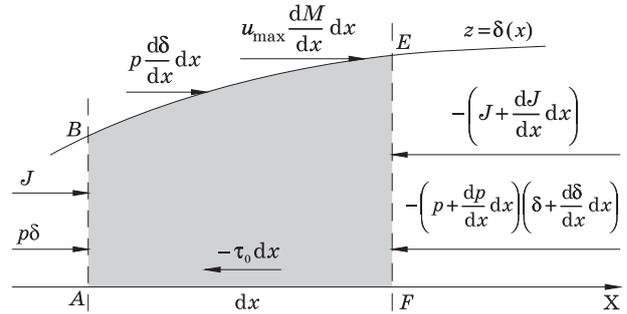


Рис. 3. Расчетная схема к уравнению импульсов для пограничного слоя: p – давление

Опуская здесь вывод этого уравнения для случая обтекания наклонной плоскости потоком переменной глубины, что отвечает схеме течения на перекате речного русла, приведем его окончательный вид:

$$-\frac{d}{dx} \left(\int_0^{\delta} \rho u^2 dz \right) + u_{\max} \frac{d}{dx} \left(\int_0^{\delta} \rho u dz \right) - \delta \frac{dp}{dx} + \rho g \delta i_g - \tau_0 = 0. \quad (8)$$

После некоторых преобразований с учетом значения u_{\max} , полученного из уравнения Бернулли (составленного для поверхностной струйки без учета потерь), и принимая во внимание (5) и (6), из (8) получим:

$$\tau_0 = \rho u_{\max} \frac{d\delta_2}{dx} + 2\rho u_{\max} \frac{du_{\max}}{dx} \delta_2 + \rho u_{\max} \frac{du_{\max}}{dx} \delta_1. \quad (9)$$

Известно, что $\tau_0 / \rho u_{\max}^2 = 0,5 C_f$, где τ_0 – касательное напряжение, тогда

$$\frac{C_f}{2} = \frac{d\delta_2}{dx} + \frac{\delta_2}{u_{\max}} \left(2 + \frac{\delta_1}{\delta_2} \right) \frac{du_{\max}}{dx}, \quad (10)$$

где C_f – коэффициент гидродинамического сопротивления.

Полученное уравнение импульсов совпадает по форме с традиционной записью уравнения для пограничного слоя на плоской пластине при $u_{\max} = \text{const}$ [4]. Следует, однако, иметь в виду, что при выводе уравнения (8) дополнительно учитывались: составляющая силы тяжести, продольный градиент давления, изменение u_{\max} по длине переката и связь между продольными градиентами давления и скорости.

Для интегрирования уравнения импульсов необходимо иметь зависимости $u_{\max} = f(x)$ и $C_f = f(\delta_2)$. При этом в

уравнении зависимость δ_2 остается неопределенной от расстояния x (она находится в результате интегрирования). Поскольку связь $C_f = f(\delta_2)$ приходится устанавливать экспериментальным путем, рассмотренный метод расчета течения на речном перекате является полумпирическим. Достаточно сложная процедура интегрирования с использованием различных предположений относительно поведения C_f и показателя степени n при течении на перекате будет рассмотрена в отдельной статье.

Выводы

Развитый подход, основывающийся на представлениях теории пограничного слоя, позволяет производить расчет неравномерного течения, в том числе с учетом изменения гидравлического сопротивления потока, развивающегося на речных перекатах, преимущественно для периодов летних межений.

Предлагаемый метод расчета позволяет решать многие практические задачи

речной мелиорации, судовождения и регулирования русла более точно и эффективно по сравнению с традиционными гидравлическими методами.

1. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Сниценко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 270 с.

2. Шамов Г. И. Речные наносы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1954. – 346 с.

3. Киселев П. Г. Гидравлика. Основы механики жидкости. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.

4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 742 с.

Материал поступил в редакцию 26.09.12.

Вольнов Михаил Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, зам. директора по научной работе

Тел. 8 (499) 153-21-33

E-mail: V1532133@yandex.ru

УДК 502/504:556

А. В. РОМАНОВ

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России

В. В. ИЛЬНИЧ

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ И ПРОГНОЗОВ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Рассмотрены подходы к решению обратных задач относительно морфометрических и гидравлических характеристик русла в рамках одномерной модели неустойчивого движения воды. Показана принципиальная возможность уточнения этих характеристик с помощью оперативной информации об уровнях и расходах воды на ограниченных по длине участках водотока.

Уровни и расходы воды, речные системы, характеристики русла, обратные задачи, интегральные уравнения.

There are considered approaches to the solution of reverse problems regarding morphometric and hydraulic riverbed characteristics in the frames of one-dimensional model of the unsteady water flow. There is shown a principal possibility of specifying the riverbed characteristics by means of the operative information on water levels and discharges within the limited watercourse length parts.

Water levels and discharges, river systems, characteristics of riverbed, inverse problems, integral equations.