

*Д.И. Исаев, М.В. Соболев*

## **РАСЧЕТ СТОКА НАНОСОВ РЕКИ НЕВЫ**

*D.I. Isaev, M.V. Sobolev*

## **THE NEVA RIVER SOLID MATTER FLOW COMPUTATION**

*Изложен метод расчета стока взвешенных и донных наносов при наличии нескольких форм их перемещения на примере р. Невы.*

*Ключевые слова: сток наносов, мутность.*

*In this paper an approach to the suspended and bottom sediments flow computation for their various combinations is presented.*

*Key words: sediment, flow computation.*

Сведения о стоке донных наносов в значительной степени определяют условия судоходства на реках России, надёжность и стоимость различных гидротехнических сооружений и различных водохозяйственных мероприятий. Перемещаясь в различных формах (влечение, качение, сольтация, гряды и др.), речные наносы непосредственно определяют общий режим, лимитирующие глубины, а также направление и характер свальных течений. Принято считать, что на р. Неве сток наносов незначителен, русловые мезоформы отсутствуют или слабо выражены и потому внимание к изучению стока наносов было недостаточным.

По характеру перемещения наносы принято разделять на взвешенные и донные. Сначала рассмотрим взвешенные наносы. По происхождению их можно разделить на два класса: естественные и антропогенные. К антропогенным могут быть отнесены наносы, поступающие при сбросе промышленных и канализационных вод, и др. Естественный источник поступления наносов делится на две категории: поступление из притоков (Ижора, Тосна, Мга, Славянка, а также ручьи) и из Ладожского озера. Как показали непосредственные измерения мутности в притоках, их вклад в общий сток наносов р. Невы составляет менее 3 %. Мутность воды р. Невы, берущей свое начало из Ладожского озера, также мала и в среднем составляет 5–7 мг/л, незначительно изменяясь от истока к устью.

Несмотря на малую мутность, ежегодный вынос наносов р. Невы в Невскую губу измеряется сотнями тысяч тонн и может оказывать значительное влияние на процессы формирования качества воды и рельефа дна.

Однако бывают условия, когда мутность в р. Неве за короткий период может достигать 160 мг/л. Как показывают наши исследования, причиной такого явления являются шторма в Шлиссельбургской губе Ладожского озера. В результате штормов происходит взмучивание донных отложений, что приводит к поступлению наносов в р. Неву, создавая проблему на водозаборах. Эти же наносы составляют значительную часть илистых донных отложений рукавов дельты р. Невы и Финского залива.

Процессы взмучивания в результате воздействия волны на подвижное дно рассматривались в работах океанологов по изучению проблем переформирова-

ния пляжей. Впервые А.В. Караушев [Караушев, 1977] совместил взвешивающие силы в результате волнового воздействия и силы, возникающие при поступлении движущейся воды.

Основная задача предлагаемой методики – определить значения мутности взмыва в Шлиссельбургской губе по методике Караушева при различных метеорологических условиях и разработать прогноз поступления наносов в р. Неву. Для этого были использованы данные об измеренных расходах взвешенных наносов за 1948, 1949 и 1952, 1953 гг. и данные наблюдений за мутностью воды по четырём водозаборам в 2004 г. На основе лоцманских карт была разбита координатная сетка, в узлах которой задавались отметки глубин и средний диаметр донных отложений. Затем по методике В.Г. Андреянова [Самохин, 1980] были рассчитаны средние высоты волн. Высота волны для бухты Петрокрепость зависит как от скорости ветра, так и от его направления. Так, при северных ветрах, даже при относительно небольшой скорости, высота волны достигает 1 м.

Для различных направлений ветра были построены карты изолинии мутности. Как показали результаты расчетов, при западном, южном и восточном ветрах поле мутности примерно одинаковое. При северном ветре зона распространения повышенной мутности составляет более 1/3 зеркала бухты. Соответственно поступление наносов в р. Неву при штормах северного направления значительно увеличивается.

Результаты расчетов были сопоставлены с натурными данными. Анализ результатов показал наличие связи между расчетными данными и наблюдаемыми. Проверка на независимом материале показала хорошее соответствие результатов расчётов при северных ветрах с натурными данными, при остальных направлениях ветра получены недостаточно удовлетворительные результаты. По-видимому, это объясняется прежде всего тем, что расчетная схема никак не учитывает продолжительность действия ветра. По нашему мнению, более значимым предиктором является высота волны на акватории.

Донные наносы составляют около 10 % всего стока наносов. Происхождение этих наносов, по нашему мнению, более сложное. Одной из причин их образования, по-видимому, является врезание русла р. Невы, приводящее к размыву песчаных отложений, а также их поступление с водосбора. Структурные формы их перемещения в р. Неве своеобразны. На стрежнях потока наносы перемещаются сальтацией – перебрасыванием частиц наносов на короткие расстояния в придонном слое водного потока. У берегов и в устьевой зоне формируются гряды, они являются дефицитными, т.е. сформированными в условиях недостаточного поступления твердого материала. Гряды – собирательный термин, которым, как правило, подчеркивается специфическая конфигурация руслового образования, имеющего относительно пологий верховой и крутой низовой склоны. В этом смысле к грядам относятся рифеля, барханы и другие русловые образования грядовой формы (побочни, осередки и косы).

Нами была разработана методика расчетов расходов донных наносов при наличии в створе одновременно двух форм движения – грядовой и безгрядовой.

В настоящее время наилучшие результаты получаются по формуле ГГИ для расчета расхода донных наносов в грядовой форме [Каполиани, 2004]:

$$q_b = 0,11h_r V Fr^3. \quad (1)$$

В этой зависимости высоту гряд рекомендуется определять в общем случае по формулам Сниценко:

$$h_r = 0,25H \quad (2)$$

при  $H < 1$  м,

$$h_r = 0,2 + 0,1H \quad (3)$$

при  $H > 1$  м.

При наличии данных о скорости потока и крупности частиц высоту гряд рекомендуется определять по формулам Каполиани:

$$h_r = 0,39d(V/V_0)^{2,5} Fr^{-3,75}, \quad (4)$$

$$V_0 = 3H^{0,2}(d + 0,0014)^{0,3}. \quad (5)$$

Для крупных наносов в диапазоне изменения гладкости потока  $15 < H/d_{0,5} < 150$  высоту гряд рекомендуется определять по формуле Носелидзе:

$$h_r = (0,07V/V_0 + 0,02)H. \quad (6)$$

В приведенных формулах использованы следующие обозначения:  $q_b$  – удельный расход донных наносов;  $h_r$  – высота гряд;  $V$  – средняя скорость потока на вертикали;  $Fr$  – число Фруда;  $H$  – глубина потока;  $V_0$  – скорость потока, соответствующая началу движения частиц;  $d$  – диаметр частицы.

В результате анализа данных измерений с помощью гидролокатора бокового обзора и продольного эхолотирования были получены средние характеристики гряд. Высота гряды составила 0,09–0,11 м, длина – 5–7 м, крутизна 0,02.

Для расчета расхода влекомых наносов в безгрядовой форме применялась формула Гончарова [Гончаров, 1962]:

$$q_b = 3(1 + \varphi)V_n k \left( \frac{V}{V_n} - 1 \right) \left( \frac{V^3}{V_n^3} - 1 \right), \quad (7)$$

где  $\varphi$  – параметр турбулентности;  $V_n$  – средняя несдвигающая критическая скорость потока;  $k$  – средняя крупность частиц.

В качестве исходных данных для расчета расходов донных наносов из «Атласа единой глубоководной системы Европейской части РСФСР» [1990] было выбрано 4 створа на различных участках р. Невы. Первый створ расположен на участке Шереметьевской отмели в районе Петрокрепости, второй – около г. Кировска, третий – в районе Ивановских порогов, четвертый – около Петропавловской крепости. Затем по каждому створу были выписаны глубины, характерные для данного участка реки, и определены расстояния до промерных вер-

тикалей. Далее по исходным данным были построены поперечные профили и по методике А. В. Караушева (основанной на формуле Шези) рассчитаны средние скорости на вертикалях. Для расчета использовались следующие формулы:

$$V = nh_B^{2/3}; \quad (8)$$

$$n = V_{cp} / h_{cp}^{2/3}; \quad (9)$$

$$V_{cp} = Q / \omega; \quad (10)$$

$$h_{cp} = \omega / B, \quad (11)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости;  $h_B$  – глубина на вертикали;  $V_{cp}$  – средняя скорость течения на данном участке реки;  $h_{cp}$  – средняя глубина на данном участке реки;  $Q$  – расход р. Невы, принятый равным 2500 м<sup>3</sup>/с;  $\omega$  – площадь поперечного сечения;  $B$  – ширина реки.

Затем на каждом поперечном профиле были построены эпюры скоростей. Далее на основании критериальных зависимостей В. Н. Гончарова были определены критические скорости движения потока по формулам:

$$V_H = \lg \frac{8,8H}{k_5} \sqrt{\frac{2g(\rho_1 - \rho)k}{3,5\rho}}; \quad (12)$$

$$\frac{V^I}{V_H} = 2,5 \left( \frac{k_5}{H} \right)^{1/12}; \quad (13)$$

$$\frac{V^{II}}{V_H} = \frac{0,75V^{III} + 0,25V^I}{V_H}; \quad (14)$$

$$\frac{V^{III}}{V_H} = 2,5 \left( \frac{H}{k_5} \right)^{1/12}, \quad (15)$$

где  $k_5$  – крупность частиц 95 %;  $g$  – ускорение свободного падения (9,81 м/с<sup>2</sup>);  $\rho_1$  – плотность наносов, принятая 2650 кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность воды;  $V^I$ ,  $V^{II}$  и  $V^{III}$  – соответственно первая, вторая и третья критические скорости. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов критических скоростей на различных участках р. Невы

Створ	$V_H$ , м/с	$V^I$ , м/с	$V^{II}$ , м/с	$V^{III}$ , м/с
Петрокрепость	0,38	0,48	1,52	1,87
Кировск	0,38	0,48	1,52	1,87
Ивановские пороги	0,37	0,48	1,52	1,87
Петропавловская крепость	0,34	0,44	1,51	1,86

По полученным данным о поперечных профилях были выявлены участки, на которых движение наносов происходит в различных формах. Эти участки были установлены на основе следующих соотношений критериальных зависимостей, разработанных В.Н. Гончаровым:

а) в области скоростей  $V^I/V_H > V/V_H > V_H/V_H$  поверхность деформируемого русла остается в общем плоской, и режим перемещения называют первым безгрядовым;

б) в области скоростей  $V^III/V_H > V/V_H > V^I/V_H$  на дне появляется система гряд, поэтому режим перемещения называют донногрядовым, причем гряды возникают при скорости потока, равной первой критической, а при скорости потока, равной второй критической, гряды достигают максимального размера и скорости перемещения;

в) при скорости потока  $V/V_H > V^III/V_H$  перемещение наносов совершается потоком при сохранении плоского рельефа дна, и режим перемещения называют вторым безгрядовым.

Как показали расчеты, значительную часть ширины русла занимают гряды. На стрежне Невы транспорт наносов происходит при ковровом перемещении (второй безгрядовый режим). Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Рассчитанные значения расходов донных наносов

Створ	$q_b$ по ф-ле (7), кг/с	$q_b$ по ф-ле (1), кг/с	$\Sigma q_b$ , кг/с	$\Sigma q_b$ , тыс.т/год
Петрокрепость	194	166	360	11340
Кировск	21	4,2	25,2	794
Ивановские пороги	45,6	13,2	58,8	1852
Петропавловская крепость	15,4	2,2	17,6	554

Из анализа данных табл. 2 вытекает, что расход наносов в створе Петрокрепости на порядок выше, чем в нижележащих створах. Это можно объяснить тем, что донные наносы транспортируются Невой в условиях дефицита поступления твердого материала, а в формулах ГГИ и Гончарова расход донных наносов должен быть близок к транспортирующей способности потока. Отсюда следует, что предложенная методика применима для рек, чья транспортирующая способность близка к расходу донных наносов. Для р. Невы наиболее близкими к физически обоснованным пределам следует считать расходы донных наносов, рассчитанные для створа Нева–Петропавловская крепость.

### Литература

1. Атлас единой глубоководной системы Европейской части РСФСР. Т. 3. Волго-Балтийский водный путь им. В.И. Ленина от Ленинграда до Рыбинска. – Л.: ЦКП ВМФ, 1990. – 315 с.
2. Гончаров В. Н., Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеоздат, 1962. – 376 с.
3. Каполиани З.Д., Костюченко А.А. Расчёты расхода донных наносов в реках // Сб. работ по гидрологии, 2004, № 27, с. 25–40.
4. Караушев А.В. Теория и методы расчётов речных наносов. – Л.: Гидрометеоздат, 1977. – 272 с.
5. Самохин А.А., Соловьёва Н.Н., Догановский А.М. Практикум по гидрологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 296 с.