

Будник С.В.

## КИНЕТИЧНОСТЬ ВРЕМЕННЫХ ВОДОТОКОВ НА СКЛОНАХ

В настоящее время в методических рекомендациях по регулированию стока и смыва на склонах не учитываются кинетичность и режим потоков. Причиной пренебрежения столь важными гидравлическими характеристиками является как недостаточная изученность связи энергетических характеристик потоков и размыва почвы, так и недостаточное понимание их важности в формировании эрозионных процессов на склонах.

Такая характеристика кинетичности водотоков, как число Фруда, определяет наличие в потоке [5] антидюн, стоячих, косых и обратных волн, гидравлического прыжка, что, в свою очередь связано с динамикой морфометрии русел. Кроме того, по величине числа Фруда можно судить о степени аэрирования потока [1], что обеспечивает наличие кавитационных процессов в водотоке и усиливает окисляемость транспортируемого вещества. За границу раздела между бурным и спокойным течением принята величина  $Fr=1$ . Начало аэрации по [1] наблюдается при  $Fr=4,15-68,69$ .

Исследования гидравлики склоновых потоков показывают несколько противоречивые сведения о величинах числа  $Fr$ , это связано, по всей видимости, с различной водностью года, в который проводились исследования, и характером объектов, на которых проводились измерения. Так, по данным М.С. Кузнецова [3] при снеготаянии на дерново-подзолистых и серых лесных почвах «характер кинетичности потоков большей частью спокойный, число  $Fr$  редко превышает 1», тот же вывод можно найти и у Г.И. Швебе [6] для других почв. По В.П. Лидову [4] на дерново-подзолистых почвах склоновые потоки в большинстве случаев характеризуются бурным состоянием  $Fr>1$ . В исследованиях К.М. Зубкова [2] на дерново-подзолистых почвах на зяби в промерзших руслах на ледяной корке  $Fr=1.2-2.5$ , в непромерзших руслах  $Fr<1$ .

Нами рассматривались натурные данные по талому и ливневому стоку. Измерения морфометрических и гидравлических характеристик склоновых водотоков проводились в естественных условиях в нескольких створах по длине водотоков, при возможности в каждом створе проводилось по несколько измерений.

Выборка наблюдений за талым стоком составила 259 измерений (в 59 створах на 18 водотоках) на различных агрофонах и почвенных разностях. Измерения проводились в различные по водности годы (1996-2000гг.) и при различных типах снеготаяния. За исследуемый период величина расхода воды варьировала в пределах  $0,0000043 - 0,021$  м<sup>3</sup>/с (табл.1), вероятность того, что расход воды превысит  $0,0016$  м<sup>3</sup>/с составляет 10%. Величина мутности склоновых водотоков в среднем по сечению варьировала в пределах  $0 - 99,99$  кг/м<sup>3</sup>, в то время, как в придонной области величина мутности достигала  $139,15$  кг/м<sup>3</sup>. В 7,7% случаев наносы потоком не транспортировались. Вероятность того, что величина мутности превысит  $50,0$  кг/м<sup>3</sup>,

составляет 2,5%, в 13% случаев мутность превышает  $14,40$  кг/м<sup>3</sup>. Скорость воды в водотоках варьировала в пределах  $0,0182-0,85$  м/с, в 55% случаев скорость превысила  $0,17$  м/с. Максимальные глубины потоков были в пределах  $0,004-0,07$  м, вероятность того, что максимальная глубина превысит  $0,05$  м, составляет 2%. При любых условиях формирования талого стока в склоновых водотоках преимущественно наблюдается переходный режим течения. По длине склона наблюдаются колебания величин чисел Рейнольдса. Наибольшее влияние на величину числа Рейнольдса оказывают расход воды в водотоке, форма русла и длина склона.

В наших исследованиях при талом стоке диапазон изменения числа Фруда составил  $0,00193-6,19$ , в 5,8% случаев  $Fr>1$  (табл.1), причем прослеживается тенденция увеличения вероятности появления величин  $Fr>1$  с увеличением длины склона. Наибольшее число случаев  $Fr>1$  наблюдалось при уклонах склона 10-50%, и с увеличением уклона вероятность появления величин  $Fr>1$  убывает. В основном, величины  $Fr>1$  наблюдались на зяби (8,7% случаев), на озимых и многолетних травах вероятность появления  $Fr>1$  незначительна (1,6 и 1,8%). Наибольший процент встречаемости  $Fr>1$  наблюдается на черноземах и на песках (17,6%). Величины  $Fr>4$  встречались всего в 2-х случаях (менее 1%).

Как и следовало ожидать, вероятность формирования бурного состояния потока несколько выше при турбулентном режиме течения, чем при переходном (табл. 2), при ламинарном же величин  $Fr>1$  не наблюдались.

Распластанность потоков ( $V/h<7$ ) также изменяется с изменением числа  $Fr$ , так, при  $Fr>1$  при талом стоке в 85,7% случаев наблюдались распластанные русла ( $V/h>7$ ). С увеличением числа  $Re$  число случаев  $V/h<7$  убывает. Величина расхода наносов увеличивается с увеличением чисел  $Re$  и  $Fr$ .

Статистический анализ взаимосвязей величин  $Fr$  и характеристик подстилающей поверхности, морфометрии склона и агрофона показал, что от года к году значимость факторов в зависимостях меняется, т.к. меняются сами условия формирования стока, тип снеготаяния и пр. Однако, среди исследованных факторов наибольшее влияние на формирование величины числа  $Fr$  оказывают влажность почвы, её глубина оттаивания, уклон и длина склона, гранулометрический состав почвы.

При ливнях объем выборки составил 93 измерения (в 30 створах на 11 водотоках) на различных агрофонах и почвенных разностях (1997-2000 гг.). Исследовались водотоки, формирующиеся от естественных ливней. Здесь исследуемые водотоки характеризовались следующими величинами гидравлических параметров (табл.3).

Расходы воды в водотоках колебались от  $0,0000018$  до  $0,0945$  м<sup>3</sup>/с при  $Cv=3,39$ . Вероятность того, что расход воды превысит  $0,007$  м<sup>3</sup>/с,

## КИНЕТИЧНОСТЬ ВРЕМЕННЫХ ВОДОТОКОВ НА СКЛОНАХ

составляет 10%. Мутность потоков менялась в пределах от 2,212 до 434,74 кг/м<sup>3</sup> при  $C_v = 1,94$ . Вероятность того, что мутность превысит величину 50,0 кг/м<sup>3</sup> составляет 13%. Скорость потоков изменялась от 0,015 до 1,5 м/с при  $C_v = 0,83$ . Вероятность того, что скорость потока превысит 0,3 м/с, составляет 40%. Максимальная глубина потоков изменялась в пределах 0,003-0,08 м при  $C_v = 0,74$ . В 5% случаев максимальная глубина потоков превысила 0,05 м. Движение воды по склону при ливнях носит как ламинарный, так и турбулентный характер. Причем характер движения воды в водотоке по длине склона может существенно меняться. Характер режима движения воды по склону существенно зависит от агрофона, даже значимость влияния факторов на число Рейнольдса на различных агрофонах различно. Так, если для многолетних трав и пропашных наиболее значимы такие факторы, как интенсивность осадков, продолжительность дождя, время от начала дождя до момента измерения, то для пара наиболее значимы плотность почвы, время от начала дождя до момента измерения и длина склона от водораздела до створа, на естественном изреженном кормовом угодье наиболее значимы максимальная глубина потока, уклон склона и влажность почвы.

При ливнях число  $Fr$  изменялось в пределах 0,0076-5,09 при  $C_v = 1,21$ . Вероятность формирования потоков с величинами  $Fr > 1$  составляет 27%. Причем в переходном режиме течения ( $700 < Re < 5000$ ) в 22% случаев наблюдается бурное состояние потока. На пропашных и пару бурное состояние течения практически не наблюдалось. В основном все случаи  $Fr > 1$  наблюдались в водотоках на естественном кормовом угодье. С увеличением длины и уклона склона вероятность формирования потоков с  $Fr > 1$  возрастает. Величина  $Fr > 4$  наблюдалась всего в 4 случаях (4,3%).

Вероятность формирования бурного состояния потока выше при турбулентном режиме течения (табл. 2), однако и при  $Re < 700$  в 5,9% случаев потоки находились в бурном состоянии, что, скорее всего, говорит о неточности принятой границы для критического  $Re$  в склоновых водотоках.

Вероятность формирования нераспластанных

потоков ( $B/h < 7$ ) выше при  $Re < 5000$  и  $Fr < 1$ , в случаях  $Re > 5000$  и  $Fr > 1$ , в наших исследованиях, потоков с  $B/h < 7$  не формировалось.

На формирование величины  $Fr$  при ливнях оказывают преимущественное влияние влажность почвы, уклон и длина склона, характеристики дождя и др.

Выводы.

При ливнях склоновые водотоки чаще пребывают в бурном состоянии чем при снеготаянии (соответственно 27% случаев и 5,8%). Вероятность их аэрирования при ливнях также выше.

Вероятность формирования бурного состояния потока выше при турбулентном режиме течения, чем при переходном.

Вероятность формирования нераспластанных потоков ( $B/h < 7$ ) выше при  $Re < 5000$  и  $Fr < 1$ .

На формирование величины числа  $Fr$  как при ливнях, так и при талом стоке преимущественно влияют влажность почвы, уклон и длина склона, гранулометрический состав почвы.

1. Айвазян О.М., Каримов А.М. Опытное исследование параметров бурных равномерных потоков в момент возникновения аэрации. // Гидротехническое строительство. - 1993. - № 7. - С. 30-36.

2. Зубкова К.М. Исследование гидравлических и морфометрических характеристик склоновых потоков. // Сб. работ по гидрологии. - 1977. - № 12. - С. 100-107.

3. Кузнецов М.С. Противозерозионная стойкость почв. - М.: Изд-во МГУ, 1981. - 135 с.

4. Лидов В.П. Процессы водной эрозии в зоне дерново-подзолистых почв. - М.: Изд. МГУ, 1981. - 168 с.

5. Ющенко Ю.С. Бурхливість течії та процеси формування русел річок / В зб.: Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 2000. - Т.1. - С. 141-144.

6. Швец Г.И. Формирование водной эрозии стока наносов и их оценка. - Л.: Гидрометиздат, 1974. - 183 с.

Таблица 1

Изменения основных гидравлических характеристик склоновых водотоков при снеготаянии в различных диапазонах влияющих факторов

Фактор	Диапазон изменения факторов	Диапазон изменения мутности водотоков, кг/м <sup>3</sup>	Диапазон изменения расходов воды, м <sup>3</sup> /с	Вероятность формирования потоков с $Fr > 1, \%$	Диапазон изменения числа Фруда
Длина склона, м	0-50	2,21-289,83	0,0000018-0,0099	-	0,008-0,857
	50-90	2,58-176,08	0,0000158-0,0188	37,9	0,009-5,09
	140-300	3,32-434,74	0,0000092-0,0945	32,6	0,074-4,17
	36-50	2,58-24,33	0,0000995-0,0188	6,2	0,009-4,22
Уклон склона, ‰	50-100	2,21-289,83	0,0000018-0,0099	-	0,008-0,689
	100-160	3,32-434,74	0,0000092-0,0945	29,8	0,082-4,17
	250-300	9,44-176,1	0,0000158-0,0023	91	0,661-5,09
	Пар	2,86-41,71	0,0000018-0,0099	6,7	0,0076-4,22
Агрофон	Пропашные	16,05-289,83	0,0000469-0,0003	-	0,0849-0,36
	Многолетние травы	2,58-19,03	0,0000429-0,0188	5,9	0,0089-2,04
	Естественное кормовое угодье	6,67-434,74	0,0000092-0,0945	46	0,0736-5,09

Таблица 2

Изменчивость характеристик склоновых потоков в различных диапазонах Re и Fr.

Фактор	Диапазон изменения Fr	Вероятность формирования потоков с Fr>1, %	Диапазон изменения мутности водотоков, кг/м <sup>3</sup>	Диапазон изменения расходов воды, м <sup>3</sup> /с	Вероятность формирования потоков с V/h<7, %
При ливнях					
Re<700	0,008-5,09	5,6	3,64-289,83	0,0000018-0,000274	11,1
700<Re<5000	0,074-2,97	21,6	2,21-63,24	0,0000315-0,00245	9,8
5000<Re	0,138-4,68	54,2	3,35-434,74	0,00093-0,0945	-
Fr<1			2,21-289,83	0,0000018-0,0193	11,8
Fr>1			3,35-434,74	0,0000158-0,0945	
При талом стоке					
Re<700	0,00193-0,899	-	0-76,67	0,0000043-0,000204	42,1
700<Re<5000	0,033-6,19	3,3	0-99,99	0,00007-0,00279	24,0
5000<Re	0,228-4,02	36,8	0,59-46,6	0,00123-0,021	26,3
Fr<1			0 - 99,99	0,0000043-0,0051	29,0
Fr>1			0 - 27,17	0,000164-0,021	14,3

Таблица 3

Изменения основных гидравлических характеристик склоновых водотоков при ливнях в различных диапазонах влияющих факторов

Фактор	Диапазон изменения факторов	Диапазон изменения мутности водотоков, кг/м <sup>3</sup>	Диапазон изменения расходов воды, м <sup>3</sup> /с	Вероятность формирования потоков с Fr>1, %	Диапазон изменения числа Фруда
Длина склона, м	0-50	0-86,63	0,0000043-0,021	2,9	0,00193-6,19
	50-90	0-99,99	0,000086-0,00204	2,0	0,013-1,03
	90-150	0,063-70,13	0,0000251-0,00187	12,8	0,0209-2,97
	150-350	0-76,41	0,0000086-0,00392	5,9	0,00815-4,02
Уклон склона, %	10-50	0-70,13	0,0000043-0,00886	13,75	0,00815-4,02
	50-100	0-99,99	0,0000251-0,021	1,3	0,00193-1,25
	100-170	0-86,63	0,0000086-0,00392	3,6	0,031-6,19
Агрофон	Зябрь	0-86,63	0,0000086-0,00392	8,67	0,00193-4,02
	Озимые	0-99,99	0,0000081-0,021	1,6	0,0152-6,19
	Многолетние травы	0-32,87	0,0000043-0,00279	1,8	0,0313-1,27
	Мергель	0-27,83	0,0000896-0,000766	-	0,043-0,99
Почвогрунты	Чернозем обыкновенный на слабомощном лессе, подстилаемом мергелем	0-5,53	0,0000086-0,000755	12,5	0,059-1,27
	Черноз. обыкн. на песках	2,26-70,13	0,000031-0,00145	17,6	0,0698-2,28
	Черноз. обыкн. на лессе	0-86,63	0,0000043-0,021	3,5	0,00193-6,19
	Серые лесные	2,55-99,99	0,0000213-0,00047	-	0,013-0,73