

УДК 626.01

## ОЦЕНКА УДАРНОЙ НАГРУЗКИ СЕЛЕВОГО ПОТОКА НА ПОПЕРЕЧНУЮ ЖЕСТКУЮ ПРЕГРАДУ

Молжигитов С.К.

*КазННТУ «Казахский Национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева Министерства Образования и Науки Республики Казахстан», Алматы, e-mail: mserik007@mail.ru*

Анализируются основные модели оценки максимальной нагрузки селевого потока предлагаемых отечественными и зарубежными авторами. Обосновывается преимущества ударно-волновой модели воздействия селевого потока на противоселевые сооружения. На основе результатов экспериментальных исследований воздействия селевого потока на поперечную жесткую преграду в виде глухой стены а, также учета газовой компоненты селя проводится оценка верхнего предела ударной нагрузки селя на противоселевые сооружения.

**Ключевые слова:** селя, нагрузка, селевые потоки, скорость звука, водонасыщенный грунт, газовая компонента

## ESTIMATING THE IMPACT LOAD OF MUDFLOW ON THE TRANSVERSE RIGID OBSTACLE

Molzhigitov S.K.

*Kazakh National Reseach Technical University n.a. K.I. Satpaev, Almaty, e-mail: mserik007@mail.ru*

We analyze the main models for assessing the maximum load of debris flow offered by domestic and foreign authors. Substantiates the advantages of hydraulic shock wave model of debris flow on the transverse rigid obstacle. Based on the results of experimental studies on the effects of debris flow on the transverse rigid barrier in the form of a blank wall and taking into account the gas component of the debris. Provides an assessment of the upper limit of the load of debris flow on the transverse rigid obstacle.

**Keywords:** debris, load, debris flows, velocity of sound, water-saturated soil, the gas component

Расчет нагрузки селевого потока на противоселевые сооружения является важным этапом при проектировании защитных сооружений. Но данный этап осложняется большим разнообразием существующих формул. Такое разнообразие формул является следствием не только сложностью самой природы оползней и селевых потоков в горных районах страны, но и сложностью выбора модели воздействия грязевых потоков на противоселевые сооружения. Большинство исследователей предлагают формулы расчета на основе гидродинамической модели воздействия селевых потоков на противоселевые сооружения. Но все уравнения гидродинамики основаны на свойствах бесконечного потока в то время как горные паводки и селевые потоки являются относительно кратковременными явлениями длительностью от пяти до получаса. По характеру воздействия селевым потокам близка волновая модель гидравлического удара.

### Цель исследования

На основе экспериментальных исследований в данной статье обосновывается ударно волновая модель воздействия на противоселевые сооружения и приводится оценка верхнего предела нагрузки селевого потока.

### Материалы и методы исследования

Для расчета нагрузки селевого потока исследователями предложены в основном четыре модели воздействия селевого потока на преграду:

- гидростатическая модель;
- гидродинамическая модель;
- комбинированная модель гидростатического и гидродинамического воздействия;
- волновая модель гидравлического удара.

Формула расчета пиковой нагрузки селевого потока на преграду на основе гидростатической модели предложены Лихтенханом (1973), Арманини (1997), Скоттон и Деганутти (1997)

$$p_{\text{peak}} = k \cdot \rho \cdot g \cdot h$$

где  $p_{\text{peak}}$  – пиковая нагрузка селевого потока,  $k$  – эмпирический коэффициент,  $\rho$  – плотность селя,  $h$  – высота потока. Эмпирический коэффициент  $k$  предложен Лихтенханом (1973) в интервале 2,8–4,4. Арманини предложил этот коэффициент взять равным 5. Скоттон и Деганутти предложили эмпирический коэффициент взять в интервале 2,5–7,5 [6].

В основу расчета нагрузки от селя многими исследователями берутся принцип гидродинамическое давления обтекания преграды струей. Этот принцип положен в основу вывода формул С.М. Амирджанова, У.Р. Мирза-заде [1], Г.М. Беручашвили, Херхеулидзе, Сохадзе и других исследователей.

Приведем известные формулы расчета нагрузки селя на поперечную глухую преграду в виде табл. 1.

В формуле расчета ГрузНИИГиМ коэффициент  $K$  определен экспериментально на лабораторной установке в диапазоне изменения скоростей течения селя

от 1,5 до 4,3 м/с, глубин потока от 4 до 10 см. Суммарное давление селя на плоский щит (преграду высотой 30 см) измерялось динамометром и тензодагчиками.

**Таблица 1**

Формулы расчета давления

ГрузНИИГиМ	$P = K \cdot \frac{\rho \cdot V_c^2}{g}, K = 4,5$
Ржевский Б.Н., Нечаев Н.Ф.	$P = 2,15 \cdot (\rho \cdot V)^{1,33}$
Херхеулидзе И.И.	$P = 3,5 \cdot (1,35 \cdot \frac{V^2}{g} \cdot \rho^{1,5})^{0,45}$

**Примечания.**  $\rho$  – плотность селя, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – скорость селя, м/с.

Приведем сравнительные графики этих формул рис. 1.

В основу формулы расчета зарубежных авторов, на основе гидродинамической модели, положена формула

$$P_{\text{peak}} = a \cdot \rho \cdot V^2$$

где эмпирический коэффициент «а» зависит от режима движения потока [6]. Все основные значения данного коэффициента, предложенные различными исследователями, сведены в табл. 2.

Хиублем и Холцинером предложены формулы расчета на основе комбинированной модели гидростатического и гидродинамического воздействия

$$p_{\text{max}} = 5 \cdot \rho \cdot v^{0,8} (g \cdot h)^{0,6}$$

По волновой модели гидравлического удара была предложена Гонором А.Л. и Пик-Пичаком Е.Г. [3] следующая формула расчета:

$$P = a \cdot \rho \cdot c \cdot V$$

где  $\rho$  – плотность селя, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – скорость селя, м/с;  $a$  – процентное содержание воздуха в водонасыщенном грунте, меняется в пределах 0÷0,04.

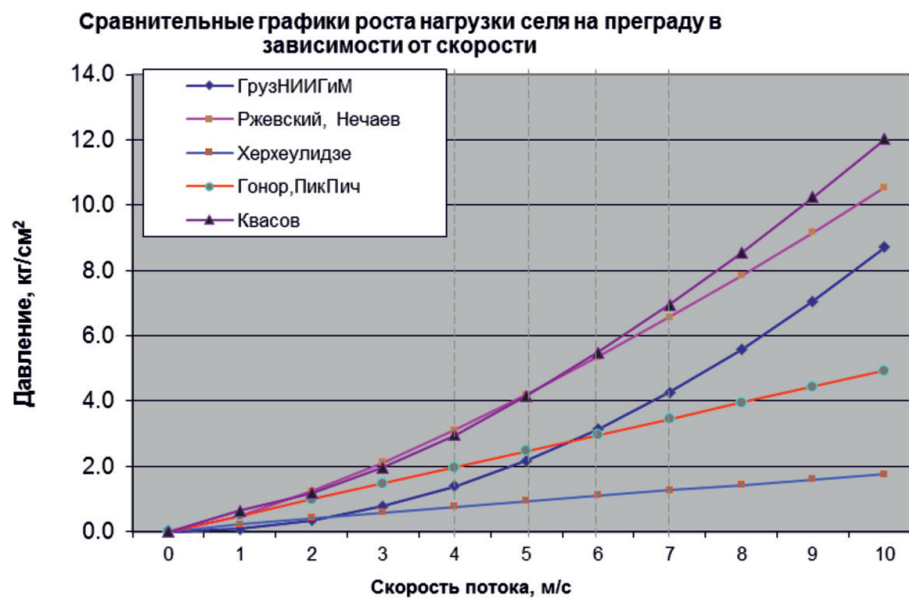


Рис. 1. Сравнительные графики давления селя в зависимости от скорости

**Таблица 2**

Эмпирические коэффициенты зарубежных авторов

Исследователи	год	Эмпирический коэффициент а	Примечание
VanDine	1996	1,5А	Вводится площадь сечения А
Watanabe и Ike	1981	4,0	Гранулированный ламинарный поток
Zhang	1993	6,0–10,0	На основе натурных замеров
Egli	2005	4,0	Крупнообломочный материал
Wendeler	2008	1,4–4,0	Воздействия на нежесткие податливые преграды
Bugnion и др.	2011	0,8–1,6	Натурные эксперименты на склоне холма

Таблица 3

## Модели воздействия селевого потока на жесткую преграду

Модель воздействия селевого потока	Особенность воздействия	Режим воздействия
Гидростатическая	Селевая масса покоится и величина воздействия зависит от высоты и плотности	Установившаяся, равновесно-статическая.
Гидродинамическая	Селевая масса движется и величина воздействия зависит от скорости и плотности	Установившаяся, равновесно-динамическая.
Волновая модель	Селевая масса движется и величина воздействия зависит от скорости и массы потока	Импульсная, неравновесная

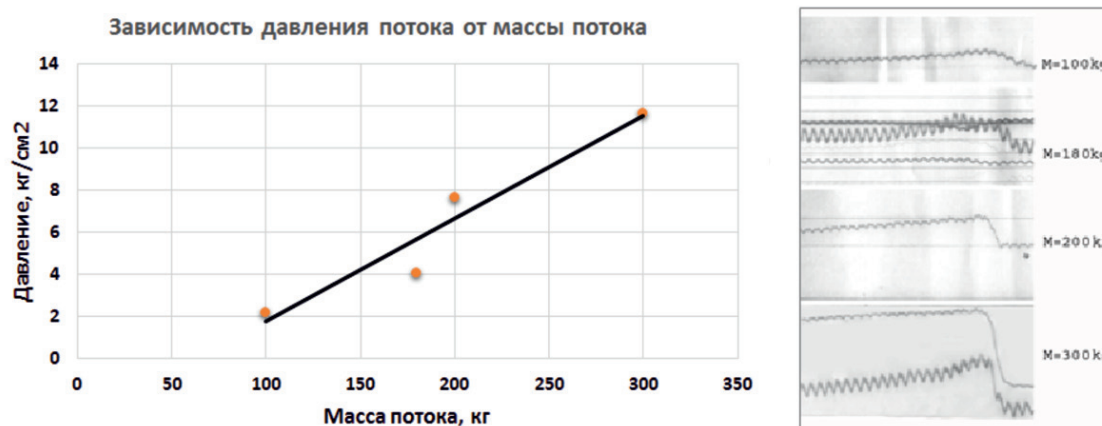


Рис. 2. График изменения давления потока в зависимости от массы

Как видим эмпирические коэффициенты в приведенных формулах меняются в значительных пределах. Данные значения получены в лабораторных условиях. Недостаточно обоснованы перенос этих значений на натурные масштабы. В этих формулах фигурируют только два параметра, это скорость и плотность селевого потока, т.е. давление выражается в виде  $P = f(\rho, V)$ . На наш взгляд значения этих формул недостаточно отражают реальные давления, оказываемые селевыми потоками на преграды. Как известно, ранее приведенные формулы обоснованы на известной формуле гидравлического обтекания тела потоком.

Рассмотрение моделей воздействия селевого потока на поперечную жесткую преграду показывает что основная часть исследователей не считают воздействие селевого потока на преграду процессом ударного воздействия. Так как большинство предлагаемых расчетных формул основаны на гидродинамической модели воздействия. Рассмотрим основные особенности гидростатической, гидродинамической и ударно-волновой модели воздействия селевого потока на поперечную жесткую преграду (смотрите табл. 3).

Таким образом из таблицы видно основные отличия гидродинамической модели от ударно-волновой модели. По гидродинамической модели воздействия не имеют значения длина, объем, масса потока. Между потоком и преградой устанавливаются равновесное состояние и величина воздействия пропорционально квадрату скорости. На наш взгляд данная модель

подходить только для сквозных противоселевых сооружений. Так как именно в этом случае происходит обтекание преграды потоком. По ударно волновой модели воздействия величина воздействия пропорционально первой степени скорости потока и зависит от массы потока вовлеченную в начальную стадию ударного воздействия потока.

Селевые потоки 1973 г. на р. М. Алматинка, 1975 и 1977 гг. на р. Б. Алматинка показали, что проблема динамического воздействия селя на преграду значительно сложнее, чем представляется теоретически. В 1977 г. на р. Б. Алматинка селом были разрушены опоры ЛЭП, водозаборы каскада ГЭС, кирпичные дома, причем нагрузки, которые способны были выдерживать эти разрушенные сооружения, в несколько раз превышали давления, подсчитанные по общеизвестным формулам обтекания. Ясно что, причиной разрушения этих сооружений явились импульсные нагрузки.

Результаты проведенных нами экспериментальных исследований в лабораторных условиях [2] показали зависимость нагрузки селя от массы потока (смотрите рис. 2).

Также было выявлено, что максимальная нагрузка от удара селевого потока приходится на первые 50÷100 мсек времени воздействия потока. Учитывая высокую вязкость селевой массы необходимо констатировать большую погрешность модели обтекания тела потоком т.к. за короткое время удара селя не успевает изменить форму.

### Результаты исследования и их обсуждение

Как мы видим, давление возрастает примерно пропорционально относительной массе. При волновом процессе удара волна возмущений распространяется со скоростью звука от передней части селя на заднюю часть. Таким образом, процесс нарастания давления, а также длительность воздействия селя является сложным процессом, который зависит как от скорости самого потока, так и от скорости распространения фронта возмущений внутри селевого потока. Также на характер воздействия потока на препятствие влияет скорость распространения возмущения внутри селя. Скорость звука внутри селя определяется физическими свойствами селевой массы. Как известно скорость звука в жидкостях определяется по формуле:

$$c = \sqrt{\frac{1}{v \cdot \rho}}$$

где  $v$  – коэффициент сжимаемости жидкости,  $\rho$  – плотность жидкости.

Так как селя является многокомпонентной средой, то сжимаемость селя определяется не только водой, но и другими компонентами. Также на сжимаемость селя влияет содержание воздуха и других газов. Влияние воздухосодержания на свойство водонасыщенного грунта не ограничивается увеличением или снижением его сжимаемости. Исследованиями Г.М. Ляхова [4] показана, что максимальное давление, скорость распространения максимума давления и другие параметры, волны существенно зависят от содержания воздуха  $\alpha_1$  в водонасыщенном грунте. С возрастанием  $\alpha_1$  от нуля до 0,04 максимальное давление убывает на два порядка, скорость максимума – более чем на порядок. При изменениях содержания воздуха  $\alpha_1$  от 0 до 0,01 а, скорость звука  $c$  в водонасыщенном грунте изменяется от 1620 до 26 м/с.

Приближенно оценить влияние воздухонасыщения на величину пиковых (ударных) нагрузок от селя на жесткое сооружение можно следующим образом:

$$P = \alpha \cdot \rho_0 \cdot c \cdot u_0.$$

А.Л. Гонор и Е.Г. Пик-Пичак [3] отмечают, что максимальные пиковые нагрузки от снежных лавин на твердую стенку находятся в хорошем соответствии с расчетом по одномерной теории гидравлического удара, где  $\alpha \leq 1$  – процентное содержание воздуха в водонасыщенном грунте (селя), меняется

в пределах 0÷0,04;  $\rho_0$  – плотность жидкости;  $c$  – скорость распространения ударной волны;  $u_0$  – скорость соударения жидкости с твердой стенкой.

Здесь важное значение имеет оценка скорости звука в селевой массе. В проведенных нами экспериментах выявленная скорость звука равнялась 146 м/с. Данное значение определялось косвенным методом. По оценкам зарубежных исследователей скорость звука в водонасыщенном грунте находится в интервале 100÷300 м/с [7].

Исходя из этого можно полагать, что график возрастания давления (рис. 2) ограничено сверху некой эффективной массой, которая определяется как  $M_e = \rho \cdot s \cdot c \cdot \Delta t$ , где  $\rho$  – плотность среды,  $s$  – площадь поперечного сечения потока,  $c$  – скорость звука в среде,  $\Delta t$  – длительность нарастания пикового давления. По полученным осциллограммам были изучены длительности воздействия потока на стенд датчиков. Длительность нарастания давления от начала удара до максимального значения находилась в пределах 0,03÷0,09 сек в то время как длительность самого удара менялась в пределах 0,32÷0,38 сек. Исходя из положения, что сжимаемость грязекаменной среды сильно зависит от газовой компоненты [5] и по последним оценкам скорость распространения возмущения в среде равно  $100 \leq c \leq 300$  м/с мы можем определить верхний предел давления в полученных нами результатах. Длина распространения ударной волны  $L = 300 \text{ м/с} \cdot 50 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 15 \text{ м}$ . Отсюда эффективная масса равно

$$M_e = \rho \cdot s \cdot c \cdot \Delta t = 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 21 \times 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 15 \text{ м} = 6300 \text{ кг},$$

что дает максимально возможное давление при предположении о линейной зависимости возрастания давления от массы в районе 250 кгс/см<sup>2</sup>.

### Выводы

Таким образом мы предлагаем более сложную модель расчета нагрузки селевого потока на преграду. Которую можно представить в виде  $P = f(\rho, v, M_e, V)$ , где  $\rho$ ,  $v$  – плотность и сжимаемость грязекаменной среды,  $M_e$  – эффективная масса, которая определяется скоростью распространения звука в потоке и площадью сечения потока. Кинетическая энергия эффективной массы селевого потока гасится в первые секунды удара и в этот момент происходит наибольшая нагрузка на защитные сооружения. Далее воздействие селевого потока постепенно падает до уровня ги-

дростатического давления. Предлагаемая нами модель основана на волновой модели ударного воздействия и позволяет переносить результаты лабораторных исследований на натурные масштабы, что являлось слабым местом предыдущих моделей расчета.

#### Список литературы

1. Амирджанов С.М., Мирза-заде У.Р. Вопросы расчета гидравлических параметров потока и установление устойчивости речных гидротехнических сооружений на селеносных реках Нуха-Закавказской зоны // Тр. АЗНИИГиМ, 1966. – Вып. 6. – С. 199–217.
2. Байнатов Ж.Б., Молжигитов С.К., Тулебаев К.Р. Некоторые результаты экспериментального исследования динамики ударного воздействия селевого потока на сплошную среду. Вестник КаздорНИИ. – 2004. – № 3–4(4). – С. 42–45.
3. Гонор А.Л., Пик-Пичак Е.Г. Численное моделирование удара снежной лавины по твердой стенке // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1983. – № 6. – С. 86–91.
4. Ляхов Г.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. – М., 1982. – 288 с.
5. Молжигитов С.К. Селевые потоки и влияние газовой компоненты селя на динамику его воздействия на защитные сооружения. Наука и новые технологии. Республиканский научно-теоретический журнал. – Бишкек, 2012. № 7. – С. 31–34.
6. Scheidl C., Chiari M., Kaitna R., Müllegger M., Krawtschuk A., Zimmermann T., Proske D. Analysing Debris-Flow Impact Models, Based on a Small Scale Modelling Approach. *Surv Geophys* (2013) 34:121–140. doi: 10.1007/s10712-012-9199-6.
7. Michael L. Oelze, William D. O'Brien, Jr., and Robert G. Darmody Measurement of Attenuation and Speed of Sound in Soils. <http://www.brl.uiuc.edu/Publications/2002/Oelze-SSAJ-7882002.pdf>.