

МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И
ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH

УДК 624.131.544: 551.311.2: 627.141.1

DOI: 10.34753/HS.2020.2.4.405

**ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ
ИСКУССТВЕННОГО ГРЯЗЕВОГО
СЕЛЯ НА ЛАБОРАТОРНОМ
СТЕНДЕ**

Н.А. Казаков^{1,2}, Д.А. Боброва¹,
Е.Н. Казакова¹

¹ФГБУН Специальное конструкторское бюро
средств автоматизации морских исследований
Дальневосточного отделения Российской
академии наук, г. Южно-Сахалинск, Россия

²НИЦ «Геодинамика», г. Южно-Сахалинск,
Россия

cdsmd@yandex.ru

**STUDY OF THE VELOCITY OF
ARTIFICIAL MUDFLOW ON A
LABORATORY STAND**

Nikolay A. Kazakov^{1,2}, Darya A. Bobrova¹,
Ekaterina N. Kazakova¹

¹Special Research Bureau for Automation of Marine
Researches of the Far Eastern Branch of Russian
Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Research Center «Geodinamics», Yuzhno-
Sakhalinsk, Russia

cdsmd@yandex.ru

Аннотация. В августе 2020 года был проведён эксперимент по измерению скорости искусственного связного (грязевого) селя на лабораторном стенде. Стенд: прямоугольный в поперечном сечении лоток длиной 3,0 м, шириной 0,25 м, глубиной 0,25 м. В лотке установлены 4 вешки для измерения гидродинамического напора селя. Уклон лотка: 29°. Движение селя снималось скоростной видеокамерой. Измерялись скорость и скоростной напор грязевого селя. Селевая смесь была приготовлена из дресвяно-щебенистого элювиально-делювиального грунта возрастом Q_{IV} с суглинистым заполнителем (лёгкий и средний суглинок, до 30%) плотностью в естественном 2 210 кг/м³. Плотность суглинка – 1 910 кг/м³. Дресва и щебень представлены алевролитом средней прочности плотностью 2 210 кг/м³. Преобладающая часть тонкодисперсных фракций грунта селевой смеси – пылеватые частицы размером менее 0,25 мм (34%). Плотность селевой смеси 1 880 кг/м³. Плотность селевых отложений составила 2 040 кг/м³. Характер движения потока – турбулентный. Скорость селя на разных участках постоянно изменялась, что говорит о

Abstract. In August 2020, an experiment was conducted to measure the velocity of an artificial coherent mudflow on a laboratory stand. The stand is a rectangular cross-section tray with a length of 3.0 m, a width of 0.25 m, a depth of 0.25 m, slope – 29°. 4 racks were installed in the tray to measure the hydrodynamic pressure of the mudflow. The movement of the mudflow was filmed by a high-speed video camera. Velocity of artificial mudflow were measured. Most of the mudflow mixture soil is made up of particles less than 0.25 mm in size (34%). The density of the prepared mudflow mixture was 1 880 kg/m³. Density of mudflow deposits 2 040 kg/m³. Despite the small values of the Reynolds number, the turbulent movement of the mudflow was observed. Comparison of the results of the measured mudflow velocities with the velocities calculated by different methods of calculating the mudflow velocity based on the structure of the Shezi formula (for Newtonian fluids) showed a strong variation of the calculated values. The methods either greatly overestimate or, on the contrary, greatly underestimate the measured values. This is probably due to the fact that the connected mudflow is not a Newtonian fluid, but a non-Newtonian fluid. The closest physical analogue of a connected mudflow is

постоянном изменении динамической и эффективной вязкостей потока. На это же указывает и характер обтекания селем препятствий. Сравнение результатов измеренных скоростей селя со скоростями, рассчитанными по разным методикам, основанным на структуре формулы Шези (для ньютоновских жидкостей) и по величине гидродинамического напора показало сильный разброс рассчитанных значений. Методики либо сильно завышают, либо, наоборот, сильно занижают измеренные значения. Вероятно, это вызвано тем, что связный сел не является ньютоновской жидкостью, а является жидкостью неньютоновской. Наиболее близкий физический аналог связного селя – псевдопластичная жидкость, вязкость которой уменьшается при увеличении напряжения сдвига. Скорость связных селей необходимо рассчитывать как скорость потоков неньютоновских жидкостей. В качестве физической модели связного селя целесообразно использовать модель Бингамовской жидкости, течение которой подобно течению связных селей (грязевых и грязекаменных).

Ключевые слова: связный сел; грязевой сел; селевой процесс; скорость селя; селевой лоток; селевые отложения; гидродинамический напор

Введение

Несмотря на многолетние исследования селевых процессов, мы до сих пор не имеем ответов на вопросы о характере влияния физических характеристик селевых смесей на динамику связных селей (в том числе на их скорость).

В частности, не решёнными остаются вопросы о зависимости скорости селя от плотности и вязкости селевой массы, о закономерностях формирования селевых отложений и, соответственно, о зависимости их структуры и стратификации от скорости селя, плотности и вязкости селевой массы и о природе и физических свойствах селевой смеси.

a pseudoplastic (non-Newtonian) fluid whose viscosity decreases with increasing shear stress. As a physical model of a connected mudflow, it is advisable to use the Bingham fluid model, the flow of which is similar to the flow of coherent debris-flows and mudflows.

Keywords: coherent mudflow; mudflow; mudflow process; mudflow velocity; mudflow tray; mudflow deposits; debris-flows; a hydrodynamic pressure

Эти проблемы связаны в первую очередь со сложностью исследования характеристик селевых смесей в натуральных условиях.

Исследование физических характеристик селевых смесей и установление некоторых закономерностей зависимости динамики селей от свойств селевой смеси возможно при проведении экспериментов на лабораторных стендах, которые достаточно широко применяются исследователями (преимущественно за рубежом) [Wei et al., 2012; Казаков и др., 2019]. В СССР селевые лотки и лабораторные установки для экспериментальных исследований динамики селей существовали в нескольких научно-исследовательских организациях ГрузНИИГиМ, АрмНИИГ, НИИ транспортного строительства и МГУ [Флейшман, 1978].

Несмотря на то что исследование характеристик связанных селей на лабораторных селевых лотках имеет ряд недостатков (малая длина лотков, малые объёмы и глубина селей и так далее), такие исследования всё же позволяют получить экспериментальные данные о физических характеристиках селевых смесей и об общих закономерностях динамики вязких потоков, необходимых для физического моделирования селей. В 2019 году селевой лоток был создан в СКБ САМИ ДВО РАН в городе Южно-Сахалинск [Казаков и др., 2019].

Методика эксперимента

В августе 2020 года нами был проведён эксперимент по измерению скорости вязкого грязевого селя на лабораторном селевом стенде.

Измерялись скорость и гидродинамический напор искусственного грязевого селя.

Селевой лоток длиной 3,0 м, шириной 0,25 м, глубиной 0,25 м [Казаков и др., 2019] был установлен с уклоном 29° .

В лотке были установлены 3 вешки диаметром от 0,016 до 0,022 м (6-9% от ширины лотка), по которым измерялась высота гидродинамического напора селевого потока (рисунок 1) и определялся характер взаимодействия потока с препятствием. Вешки

разделили лоток на 4 участка, на которых измерялась скорость потока.

Движение селя снималось скоростной видеокамерой сбоку через прозрачную стенку селевого лотка и фронтально. Скорость селя определялась по видеосъёмке.

Селевая смесь была приготовлена из дресвяно-щебенистого элювиально-делювиального грунта возрастом Q_{IV} с суглинистым заполнителем (лёгкий и средний суглинок до 30%) плотностью в естественном залегании 2210 кг/м^3 . Плотность суглинка – 1910 кг/м^3 .

Дресва и щебень представлены алевролитом средней прочности плотностью в естественном залегании 2210 кг/м^3 .

Преобладающая часть тонкодисперсных фракций грунта селевой смеси представлена пылеватыми частицами размером менее 0,25 мм (таблица 1). Показатель текучести – $0,25 < J_L \leq 0,50$. Грунт относится к тугопластичным суглинкам.

Гранулометрический состав исходных грунтов показан в таблице 1.

Поток из подготовленной селевой смеси был пущен по лотку. Плотность подготовленной селевой смеси составила 1880 кг/м^3 (таблица 2). Длина пути селя составила 2,49 м.



Рисунок 1. Селевые обмазки на вешке показывают величину гидродинамического напора селя
Figure 1. Mudflow coatings on the rod show the value of the hydrodynamic pressure of the mudflow

Таблица 1. Гранулометрический состав грунтов для подготовки селевой смеси

Table 1. Granulometric composition of soils for the preparation of debris-flow mixture

Наименование горной породы Name of rock	Геологический возраст и генезис Geological age and Genesis	Гранулометрический состав, % Granulometric composition, %						
		Щебень Crushed	Дресва Gravel			Песок Sand		Пылеватые частицы Dusty particles
	Размер частиц, мм Particle size, mm	20-10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	<0,25
Дресвяно- щебенистый грунт с суглинистым заполнителем до 45%, средней плотности, влажный Dry-crushed soil with loamy aggregate up to 45%, medium density, wet	<i>pdQ_{IV}</i>	18,2	15,6	14,5	8,9	5,1	3,3	34,3

Таблица 2. Характеристики селевой смеси

Table 2. Characteristics of the mudflow mixture

Плотность селевой смеси, кг/см ³ Density of mudflow mixture, kg/cm ³	Плотность селевых отложений, кг/см ³ Density of mudflow deposits, kg/cm ³	Объёмная влажность, % Volume humidity, %	Пористость, % Porosity, %	Коэффициент пористости Porosity coefficient	Нормативные значения Standard values			
					Удельное сцепление, МПа Specific coupling, MPa	Угол внутреннего трения, град. Internal friction angle, deg.	Модуль деформации, МПа Modulus of deformation, MPa	Сопротивление сдвигу, МПа Shear strength, MPa
1 880	2 040	0,17	9,29	0,47	0,044	39	30	14,675

Коэффициент динамической вязкости селевой смеси рассчитывалась по формуле [Гончаров, 1962]:

$$\mu = \frac{\rho i h^2}{2U} \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость, мм²/с;
 ρ – плотность селевой смеси, кг/м³;

h – глубина потока, м;

i – уклон русла, град;

U – скорость потока, м/с.

Коэффициент кинематической вязкости селевой смеси рассчитывалась по формуле:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

где ν – кинематическая вязкость, мм²/с;
 ρ – плотность селевой смеси, г/см³.

По результатам эксперимента было проведено сравнение измеренной скорости селя со скоростями, рассчитанными по различным методикам, часто используемым для расчёта скорости селя при научно-исследовательских и проектно-изыскательских работах.

1. Скорость селя по величине гидродинамического напора¹:

$$U = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{\alpha}} \quad (3)$$

где Δh – скоростной/гидродинамический напор, определяемый как разность между отметками следов уровня (обмазки) в лобовой и тыловой части вешки, рисунок 1), м;

α – коэффициент, зависящий от свойств селевой массы (в среднем равняется 0,55).

2. Скорость грязевых и грязекаменных селей по [Голубцов, 1969]:

$$v_c = 3,75h_{cp}^{0,5}i^{0,17} \quad (4)$$

где h_{cp} – глубина потока, м;
 i – уклон русла, ‰.

3. Скорость селя по И.И. Херхеулидзе²:

$$v_c = 4,83h^{0,5}(\sin\alpha)^{0,25} \quad (5)$$

где h – средняя глубина потока, м;
 α – средний угол наклона селевого русла, ‰.

4. Скорость селя по [Срибный, 1960]:

$$v_c = \frac{mR^{2/3}I^{1/4}}{\sqrt{\frac{\rho_c\rho_T-\rho_T+1}{\rho_T-\rho_c}}} \quad (6)$$

где m – коэффициент шероховатости;
 R – гидравлический радиус потока, м;
 I – продольный уклон русла, град.;
 ρ_T – плотность наносов, т/м³;
 ρ_c – средняя плотность селевой массы, т/м³.

5. Скорость селя по Кханну [Голубцов, 1969]:

$$v_c = 8,05h_{cp}^{0,58}I^{0,30} \quad (7)$$

где h_{cp} – средняя глубина потока, м;
 I – продольный уклон русла, град.

6. Скорость селя по [Крюков, Бутенко, 2013]:

$$v_c = 11,4h_{cp}^{0,5}\left(Usina\frac{1}{3}\right) \quad (8)$$

где U – относительная гидравлическая крупность вовлекаемых в поток каменных материалов (для оперативных расчётов принимается равным 0,7...1,0 м/с); в наших расчётах принято равным 1,0 м/с;

α – средний угол наклона селевого русла, ‰;

h_{cp} – средняя глубина потока, м.

Результаты и их обсуждение

Созданный во время эксперимента сел можно описать как вязкий грязевой сел с турбулентным режимом течения (рисунок 2, 3).



Рисунок 2. Селевые отложения
 Figure 2. Mudflow deposits

¹ Руководство по изучению селевых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 143 с.

² РД 52.30.238-90. Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям. Вып. 1. Организация и проведение работ по изучению селей. М.: Гидрометеиздат, 1990. 199 с.

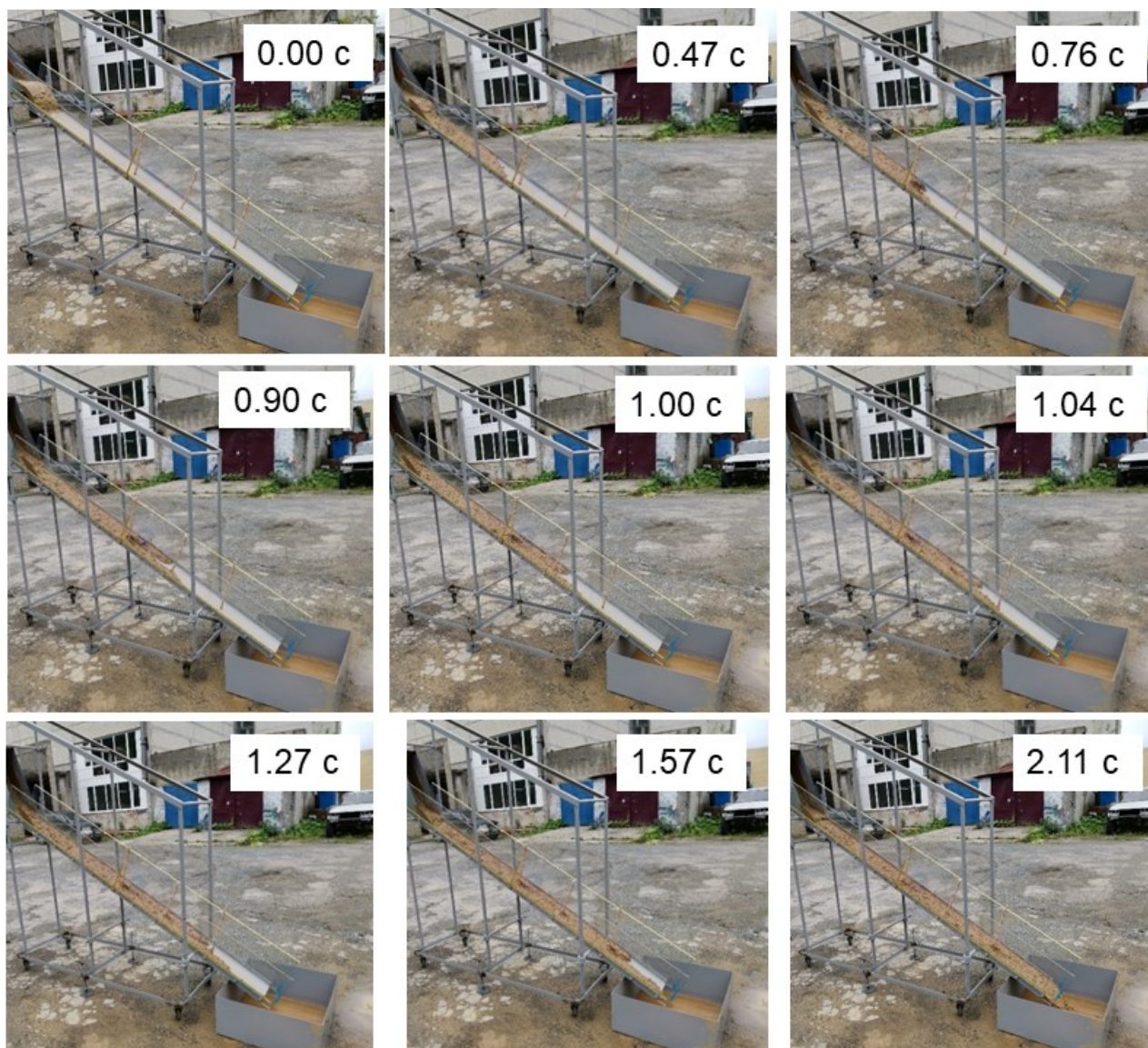


Рисунок 3. Стадии движения искусственного грязевого селя в лотке (время от начала движения, с)
Figure 3. Stages of an artificial mudflow movement in a tray (time from the beginning of the movement, s)

Рассчитанное для смоделированного грязевого селя число Рейнольдса ($<1,82$, таблица 3) характерно для ламинарного режима течения. Однако при наблюдении поток визуально был определён именно как турбулентный: несмотря на малые значения числа Рейнольдса, в потоке наблюдалось выраженное вихревое движение. Перемешивание селевой смеси и перемещение обломков размером 25 см (соизмеримых с глубиной и шириной потока) происходило на протяжении всего движения селя.

По этому мы согласны с мнением С.М. Флейшмана о том, что если для двухфазных потоков (наносоводных) с незначительной вязкостью дисперсионной среды критическое

значение числа Рейнольдса при переходе потока к турбулентному режиму превышает 2 300-2 400, то для квазиднофазных связных селей, вязкость которых в сотни раз превышает вязкость воды, значения числа Рейнольдса при турбулентном режиме движения могут не превышать значение 5 [Флейшман, 1978].

Действительно, при малых значениях числа Рейнольдса (таблица 3) на отдельных участках пути смоделированного нами селя в потоке наблюдалось выраженное вихревое движение, а перемешивание селевой смеси и перемещение обломков размером 2-5 см (соизмеримых с глубиной и шириной потока) происходило на протяжении всего движения селя.

Таблица 3. Условия и результаты эксперимента по измерению скорости грязевого селя
 Table 3. Conditions and results of the experiment on measuring the mudflow velocity

№ участка	№ участка	Длина участка, м	The length of channel, m	Уклон лотка, град	Angle of inclination grad.	Глубина селя, м		Depth of mudflow, m	Величина гидродинамического напора на вешке, м		Характеристики селевой смеси				Плотность селевых отложений, кг/м ³	Density of the mudflow deposits, kg/m ³	Расход начальный, м ³ /с	Initial discharge, m ³ /s	Расход, м ³ /с	Discharge, m ³ /s	Гидравлический диаметр, м	The hydraulic radius, m	Число Рейнольдса	Reynolds Number	Коэффициент шероховатости	Coefficient of roughness	Измеренная скорость, м/с	Measured velocity, m/s				
						Плотность, кг/м ³	Температура, °С		Температура, °С	Коэффициент динамической вязкости, кг*с/м ²	Коэффициент кинематической вязкости, м ² /с																					
1	1,03	0,040	0,07	0,07	22,87	0,0122	0,019	0,006	1,82	1,44	1,91	0,019	0,006	1,82	1,44	1,91	0,019	0,006	1,82	1,44	1,91	0,019	0,006	1,82	1,44	1,91	0,019	0,006	1,82	1,44	1,91	
2	0,46	0,030	0,07	0,07	24,43	0,0130	0,026	0,004	0,64	2,28	1,00	0,026	0,004	0,64	2,28	1,00	0,026	0,004	0,64	2,28	0,004	0,003	0,82	1,16	1,64	0,004	0,003	0,82	1,16	1,64		
3	0,49	0,023	0,04	0,04	23,65	0,0126	0,004	0,003	0,82	1,16	1,64	0,004	0,003	0,82	1,16	1,64	0,004	0,003	0,82	1,16	0,012	0,003	0,76	1,06	1,90	0,012	0,003	0,76	1,06	1,90		
4	0,51	0,025	0,05	0,05	32,43	0,0173	0,012	0,003	0,76	1,06	1,90	0,012	0,003	0,76	1,06	1,90	0,012	0,003	0,76	1,06	0,012	0,003	0,76	1,06	1,90	0,012	0,003	0,76	1,06	1,90		
Среднее	2,49																															



Рисунок 4. Турбулентный режим течения наносоводного потока

Figure 4. Turbulent flow regime of the suspended stream

Смоделированный наносоводный поток имел ярко выраженный турбулентный режим течения (рисунок 4).

В ходе эксперимента была измерена скорость селя на разных участках селевого лотка и исследован характер его взаимодействия с препятствием (таблица 3).

Результаты эксперимента (таблица 3) показали следующее.

После прохождения селя и формирования селевых отложений плотность селевой смеси увеличилась на 9%: с $1\,880\text{ кг/м}^3$ до $2\,040\text{ кг/м}^3$ у селевых отложений (таблица 3). В связи с этим возникает сомнение в правомерности определения плотности селевой смеси путём сравнения форм образцов селевой смеси, приведённых к первоначальному состоянию, с естественными формами обмазки³.

Отмечена неравномерная скорость селя на разных участках селевого лотка: как уменьшение скорости, так и её увеличение (таблица 3).

Интересными оказались наблюдения за характером обтекания грязевым потоком препятствий (вешек).

При обтекании селем вешки № 1 произошло разделение потока на 2 рукава (рисунок 5).

Слияние рукавов произошло на участке № 2 (между вешками №№ 1, 2) через 0,50 с после разделения потока на расстоянии 0,46 м от точки его разделения, что может говорить о достаточно высокой вязкости селя. К моменту слияния рукавов, фронт правого рукава уже миновал вешку № 2.

На участке № 2 (после взаимодействия с вешкой № 1) скорость правого рукава резко возросла (таблица 4), что можно объяснить снижением динамической вязкости потока вследствие его разделения на 2 рукава, каждый из которых имел ширину 0,1 м при глубине 0,05 м.

При обтекании селем вешки № 2 поток также разделился на 2 рукава, однако слияние рукавов потока произошло через 0,20 с.

При обтекании селем вешки № 3 поток вновь разделился на 2 рукава, слияние которых произошло через 0,40 с: уже после того, как фронт правого рукава достиг конца лотка.

При движении селя по участку № 2 (между вешками №№ 1, 2) скорость селя резко уменьшилась.

Напротив, скорость селя при подходе к вешке № 3 вновь возросла: несмотря на то, что рукава потока слились в один и динамическая вязкость потока должна была возрасти (таблица 4).

Таким образом, можно в первом приближении предположить, что вязкость связанного селя постоянно изменяется в процессе его движения. Изменение вязкости носит нелинейный характер.

Следует однако отметить, что диаметр вешки № 1 больше, чем диаметр вешек №№ 2, 3, а глубина потока – больше.

Интересно отметить, что исследования взаимодействия снежной лавины с препятствием в виде столба, колонны и тому подобным, установленного в зоне максимальных скоростей лавины, приводит к снижению скорости и дальности выброса лавин [Ржевский, 1984]. Возможно это объясняется тем, что скорость лавины на порядок больше скорости селя, а плотность – на порядок меньше.

³ Там же.

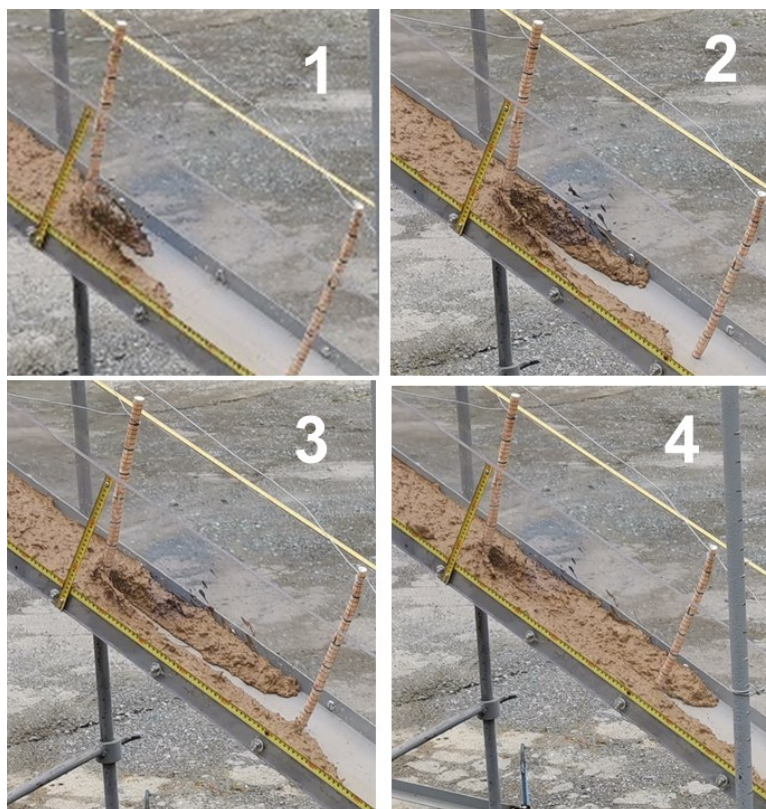


Рисунок 5. Последовательные стадии обтекания вешки № 1 грязевым селем

Figure 5. Interaction of mudflow with an obstacle. Rod № 1

Таблица 4. Условия взаимодействия селея с препятствием

Table 4. Conditions of the interaction the mudflow with an obstacle

№, № вешки №, № rod	Длина участка до вешки, м Length of channel, m	Ширина лотка, м Width of the tray, m	Диаметр вешки, м Diameter of the rod, m	Отношение диаметра вешки к ширине лотка Ratio of the diameter of the rod to the width of the tray	Глубина селея, м Depth of mudflow, m	Отношение диаметра вешки к глубине селея Ratio of the diameter of the rod to the depth of mudflow	Глубина потока на вешке (гидродинамический напор), м Depth of the thread on the rod (hydrodynamic head), m	Скорость селея при обтекании вешки, м/с Mudflow velocity when the leakage in the rod, m/s	Скорость правого рукава селея после обтекания вешки, м/с Mudflow right sleeve velocity after the leakage in the rod, m/s
1	1,03	0,25	0,022	0,09	0,040	0,55	0,07	1,91	1,49
2	1,49		0,018	0,07	0,030	0,60	0,07	1,00	1,39
3	1,98		0,016	0,06	0,023	0,70	0,04	1,64	1,82

Таблица 5. Сравнение значений скорости грязевого селя, рассчитанных по разным методикам
Table 5. A comparison of the values of the mudflow velocity, calculated by different methods

№№ участка №№ of site	Измеренная скорость, м/с Measured velocity, m/s	Рассчитанная скорость, м/с Speed head, m/s					
		По величине гидродинамического напора By the value of the hydrodynamic head	По В.В. Голубцову According to V.V. Golubtsov	По М.Ф. Срибному According to M.F. Sribniy	По И.И. Херхеулидзе According to I.I. Kherkheulidze	По Е.В. Крюкову, В.М. Бутенко According to E.V. Kryukov, V.M. Butenko	По Кханну According to Khann
1	1,91	1,58	2,20	1,66	0,81	1,79	3,42
2	1,00	1,19	1,90	1,59	0,70	1,55	2,89
3	1,64	1,34	1,66	1,54	0,61	1,36	2,48
4	1,90		1,74	1,56	0,64	1,42	2,60
Среднее	1,59		1,74	1,56	0,64	1,42	2,60

Сравнение результатов измеренных скоростей селя со скоростями, рассчитанными по различным методикам, показало, что они сильно различаются между собой (таблица 5).

Значение скорости селя, рассчитанное по величине гидродинамического напора, в двух случаях ниже измеренной скорости, в одном случае – выше. Скорость селя, рассчитанная по величине гидродинамического напора, оказалась ниже измеренной скорости грязекаменного селя до препятствия (вешки) и выше измеренной скорости после препятствия.

Значение скорости селя, определённое по формуле В.В. Голубцова, в двух случаях ниже измеренной скорости, в трёх случаях – выше измеренной.

Значение скорости селя, определённое по формуле М.Ф. Срибного, во всех случаях ниже измеренной скорости. Однако рассчитанная скорость прохождения селем всего лотка

оказалась близка к средней измеренной скорости для всего лотка.

Значение скорости селя, определённое по формуле И.И. Херхеулидзе, во всех случаях намного ниже измеренной.

Значение скорости селя, определённое по Е.В. Крюкову, В.М. Бутенко, в четырёх случаях ниже измеренной скорости, в одном – намного выше.

Скорость по Кханну оказалась во всех случаях намного намного выше измеренной.

Разброс значений скорости связного селя, рассчитанных по разным методикам, отмечается и в других работах [Соколова и др., 2019].

Важно отметить, что все использованные формулы расчёта скорости селя выведены из уравнения Шези, предназначенного для определения скорости ньютоновских жидкостей и включают в себя в основном такие характеристики, как глубина потока и уклон русла.

Кроме того, в проверенных методиках присутствуют эмпирические коэффициенты, введение которых в любые расчётные формулы выводит такую методику за рамки строго научного обоснованной – в область более искусства, чем науки.

Селевая смесь как неньютоновская жидкость

Как указывалось выше, все проверенные нами методики расчёта скорости селя основаны на структуре формулы Шези: уравнении для ньютоновских жидкостей. Однако с точки зрения физики связный сел не является суспензией [Казаков, 2019], а является неньютоновской жидкостью. Такого взгляда придерживается и ряд других исследователей [Натишвили, Тевзадзе, 2007].

По нашему мнению, наиболее близкий физический аналог связного селя – коллоидная система [Казаков, 2019] или псевдопластичная жидкость, вязкость которой уменьшается при увеличении напряжения сдвига.

Большинство неньютоновских жидкостей разжижаются при сдвиге, их эффективная вязкость снижается при увеличении скорости сдвига.

По этой причине скорость связных грязевых и грязекаменных селей необходимо рассчитывать как скорость потоков неньютоновских жидкостей.

Возможно в качестве физической модели связного селя целесообразно использовать модель Бингамовской жидкости (тела Бингама): неньютоновские жидкости, которые сохраняют свою структуру вплоть до достижения напряжения, равного начальному напряжению сдвига. Под действием напряжений, превышающих предел текучести, структура такого объекта резко разрушается и жидкость течёт до некоторой степени подобно ньютоновской жидкости. С увеличением скорости деформации наблюдаемая вязкость тел Бингама уменьшается. К Бингамовским жидкостям относятся, например, буровые растворы, шламы, сточные грязи и тому подобное: объекты, подобные связным селям.

Выводы

1. Определены основные характеристики экспериментального связного селевого потока: скорость течения на разных участках, расход, коэффициенты динамической и кинематической вязкости.

2. Скорость селя на разных участках постоянно изменялась, что говорит о постоянном изменении динамической и эффективной вязкостей потока. На это же указывает и характер обтекания селом препятствий.

3. Значение скорости селя, определённое по величине гидродинамического напора показало сильный разброс значений: как занижение скорости, так и завышение.

4. Сравнение результатов измеренных скоростей селя со скоростями, рассчитанными по различным методикам расчёта скорости селя, основанным на структуре формулы Шези (для ньютоновских жидкостей) показало сильный разброс рассчитанных значений. Методики либо сильно завышают, либо, наоборот, сильно занижают измеренные значения. Вероятно это вызвано тем, что связный сел не является ньютоновской жидкостью, а является жидкостью неньютоновской.

5. Наиболее близкий физический аналог связного селя – псевдопластичная жидкость, вязкость которой уменьшается при увеличении напряжения сдвига. По этой причине скорость связных грязевых и грязекаменных селей необходимо рассчитывать как скорость потоков неньютоновских жидкостей. В качестве физической модели связного селя целесообразно использовать модель Бингамовской жидкости, течение которой подобно течению связных селей (грязевых и грязекаменных).

6. После прохождения селя и формирования селевых отложений плотность селевой смеси увеличилась на 9%. В связи с этим возникает сомнение в правомерности определения плотности селевой смеси методом сравнения форм образцов селевой смеси, приведённых к первоначальному состоянию, с естественными формами обмазки.

Литература

Голубцов В.В. О гидравлическом сопротивлении и формуле для расчета средней скорости течения горных рек // Труды КазНИГМИ. 1969. Вып. 33. С. 30-41.

Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоздат, 1962. 358 с.

Казаков Н.А. Фазовые переходы в селевой геосистеме // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 2. С. 172-189. DOI: [10.34753/HS.2019.1.2.001](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.2.001).

Казаков Н.А., Боброва Д.А., Казакова Е.Н., Рыбальченко С.В. Исследование динамики селей на экспериментальном стенде // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 4. С. 490-503. DOI: [10.34753/HS.2019.1.4.490](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.4.490).

Крюков Е.В., Бутенко В.М. Опасные природные процессы: учеб.-метод. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. 119 с.

Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. Основы динамики селей. Тбилиси, 2007. 213 с.

Ржевский Б.Н. Оценка тормозящей роли одиночного препятствия, обтекаемого лавинным потоком // Вопросы проектирования, строительства и реконструкции железных дорог Сибири: межвузовский сборник научных трудов. Новосибирск, 1984. С. 101-109.

Соколова Д.П., Куровская В.А., Остахов А.А., Казаков Н.А. Оценка динамических характеристик селевого потока по материалам видеосъемки // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 1. С. 31-51. DOI: [10.34753/HS.2019.1.1.003](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.1.003).

Срибный М.Ф. Формула средней скорости течения рек и их гидравлическая классификация по сопротивлению движению // Исследования и комплексное использование водных ресурсов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 204-220.

Флейшман С.М. Сели. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 312 с.

Wei F., Yang H., Hu K., Hong Y., Li X. Two methods for measuring internal velocity of debris flows in laboratory // WIT Transactions on Engineering

References

Fleishman S.M. *Seli [Mudflow]*. Leningrad, Publ. Hidrometeoizdat, 1978. 312 p. (In Russian).

Golubtsov V.V. O gidravlicheskom soprotivlenii i formule dlya rascheta srednei skorosti techeniya gornykh rek [About the hydraulic resistance and a formula for calculation of average speed of a current of the mountain rivers]. *Trudy Kazakhskogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta [Transactions of the Kazakh Regional Hydrometeorological Research Institute]*, 1969, no. 33, pp. 30-41. (In Russian).

Goncharov V.N. *Dinamika ruslovykh potokov [Channel flow dynamics]*. Leningrad, Publ. Hydrometeorological, 1962. 358 p. (In Russian).

Kazakov N.A. Fazovye perekhody v selevoi geosisteme [Phase transitions in the debris flow geosystems]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2019, vol. 1, iss. 2, pp. 172-189. DOI: [10.34753/HS.2019.1.2.001](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.2.001). (In Russian; abstract in English).

Kazakov N.A., Bobrova D.A., Kazakova E.N., Rybal'chenko S.V. Issledovanie dinamiki selei na eksperimental'nom stende [The study of the debris-flows dynamics on an experimental stand]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2019, vol. 1, iss. 4, pp. 490-503. DOI: [10.34753/HS.2019.1.4.490](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.4.490). (In Russian; abstract in English).

Kryukov E.V., Butenko V.M. Opasnye prirodnye protsessy: uchebno-metodicheskoe posobie [Hazardous natural processes]. Moscow, Publ. of Academy of State Fire Service EMERCOM of Russia. 119 p. (In Russian).

Natishvili O.G., Tevzadze V.I. *Osnovy dinamiki selei [The fundamentals of debris-flow dynamics]*. Tbilisi, 2007. 213 p. (In Russian; abstract in English).

Rzhevskii B.N. Otsenka tormozyashchei roli odinochnogo prepyatstviya, obtekaemogo lavinnym potokom [Assessment of the inhibitory role of a single obstacle streamlined by an avalanche stream].

Sciences. 2012. Vol 73. Pp. 61-71.
DOI: [10.2495/DEB120061](https://doi.org/10.2495/DEB120061).

Voprosy proektirovaniya, stroitel'stva i rekonstruktsii zheleznykh dorog Sibiri: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov [Issues of design, construction and reconstruction of Siberian railways: interuniversity collection of scientific papers]. Novosibirsk, 1984, pp. 101-109. (In Russian).

Sokolova D.P., Kurovskaya V.A., Ostashov A.A., Kazakov N.A. Otsenka dinamicheskikh kharakteristik selevogo potoka po materialam videos"emki [Evaluation of debris flow dynamic characteristics by video materials]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 31-51. DOI: [10.34753/HS.2019.1.1.003](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.1.003). (In Russian; abstract in English).

Sribnyi M.F. Formula srednei skorosti techeniya rek i ikh gidravlicheskaya klassifikatsiya po soprotivleniyu dvizheniyu [Formula of the average flow velocity of rivers and their hydraulic classification by resistance to the movement] *Issledovaniya i kompleksnoe ispol'zovanie vodnykh resursov [Researches and complex use of water resources]*. Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Science, 1960, pp. 204-220. (In Russian).

Wei F., Yang H., Hu K., Hong Y., Li X. Two methods for measuring internal velocity of debris flows in laboratory. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 2012, vol 73, pp. 61-71. DOI: [10.2495/DEB120061](https://doi.org/10.2495/DEB120061).