

## О возможных технических причинах катастрофического паводка в городе Тбилиси в 2015 году

Зураб Кереселидзе

Институт геофизики Тбилисского государственного Университета

Георгий Шергилашвили

Ориони Студия

**Введение.** Река Вере представляет собой типичную горную речку с ущельем длиной более 40 км, перепадом высот около полторы тысячи метров и среднегодовым расходом воды  $Q \approx 1 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ . Тем не менее, эта река считается одной из самых опасных в восточной Грузии из-за часто повторяемых паводков, характеризующихся расходом воды более чем на два порядка превышающим среднегодовое значение. Непрерывные полноценные метеогидрологические наблюдения за режимом течения р. Вере охватывают более чем полувековой период [1]. Кроме этого, имеются также достаточно надежные данные об отдельных катастрофических паводках, имевших место в последнем десятилетии девятнадцатого века вплоть до второй половины двадцатого. Обычно, эти паводки вызывали сильные наводнения в нижней части ущелья, т.е. в черте города Тбилиси. В частности, такое часто случалось между построенными в советский период первыми двумя туннелями (подземными каналами). До строительства на этом отрезке ущелья участка скоростной дороги первый туннель, проходящий под автомобильной магистралью Тамарашвили, имел длину 108 м. Второй туннель был значительно более протяженным, длиной около 700 метров, и заменял последний отрезок естественного русла р. Вере вплоть до ее впадения в р. Кура. За более чем вековой период, вплоть до последнего катастрофического паводка, случившегося 12.06.2015 г, сильнейшим считался паводок, имевший место 04.07.1960 г. По метеорологическим данным, этот паводок был вызван выпадением осадков высотой  $h \approx 120$  мм в течение двух с половиной часов. В это время максимальный расход воды в русле р. Вере, по косвенным оценкам, т.е. исходя из количества осадков, достигал величины:  $Q \approx 320 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ . По нашим оценкам, этот параметр во время паводка, имевшего место ночью с двенадцатого на тринадцатое июня 2015 года, вероятней всего был соизмеримым по величине с максимальным расходом во время события 04.07.1960 г. Тем не менее, катастрофическое явление от 12.06.2015 г. оказалось совершенно исключительным, вызвавшим многочисленные людские жертвы и огромный материальный ущерб.

Подобно многим другим горным рекам Грузии, ущелье р. Вере является довольно извилистым и достаточно глубоким в верхней части и относительно широким на окончательном отрезке ее русла. По всей длине ущелья к этой реке с обеих сторон присоединяются многочисленные маленькие ручейки и сухие овраги, которые во время сильных осадков превращаются в достаточно многоводные каналы. В дополнение к этим водостокам, в черте г. Тбилиси р. Вере принимает также городские поверхностные и грунтовые воды. В результате в период интенсивных осадков нижняя часть ущелья

р.Вере превращается в достаточно объемный водосборный бассейн. Поэтому, вряд ли могло существовать сомнение в том, что закрытие русла реки, имеющей такую важную функцию, не могло повлиять на геометрические характеристики и естественную орографию ущелья, которые сложились веками и соответствовали экстремальным гидрологическим режимам. Уже первое вмешательство в естественное русло вызвало значительные перемены его параметров, что вероятно способствовало усилению негативного эффекта во время паводка, случившегося 06.07.1960 г. После завершения строительства участка скоростной дороги в 2010 г. закрытая часть русла р.Вере, вместо двух, состояла уже из семи туннелей общей протяженностью около 2100 м. На рис.1 представлена схема модернизированных старых (зеленые отрезки) и новых туннелей (красные отрезки), расположенных вдоль линии естественного русла, от магистрали Тамарашвили до впадения р.Вере в р.Кура. Все туннели представляли комбинированные строения, прямолинейными участками в виде полукруглой арки из гофрированной листовой стали, имеющей плоское бетонное основание. На криволинейных участках вместо стальных, туннели были железобетонными. Ранее построенные два туннеля были значительно удлинены, но без какой либо их реконструкции. В результате такой модернизации длина первого туннеля составила около 360 м, второго -1200 м.



Рис.1

Из теории строительства водопроводных каналов известно, что арочные туннели и мосты, сконструированные из гофрированной стали, обладают достаточно высокой сейсмической устойчивостью. Поэтому, по своим технико-экономическим характеристиками, они практически не уступают конструкциям из камня, железобетона или металла. Более того, крупные водопроводы из гофрированной стали обладают некоторым преимуществом по сравнению с бетонными, что заключается в технологической простоте и меньшей трудоемкости при строительно-монтажных работах. Отметим, что одно из преимуществ арочных тоннелей и мостов из гофрированной стали заключается в их способности постепенного разрушения, т.е. мягкого залегания во время достаточно сильных и длительных подземных толчков. Поэтому, для небогатых стран, подобно Грузии находящихся в сейсмически достаточно активных регионах, использование конструкции из гофрированной стали на гидротехнических объектах считается вполне обычным явлением. Очевидно, что указанное качество является достаточно важным, т.к. территория г.Тбилиси, согласно ныне действующей карте сейсмического районирования, относится к восьми бальной зоне [2]. Но, следует отметить, что после 7-8 бального землетрясения восстановление арочных туннелей и мостов из гофрированной стали является практически невозможным и они должны быть полностью разобраны. Обычно, гофрированные водопроводы используются под мостами, построенными для пересечения нешироких рек и оврагов. Но такая практика не является общепринятой в гидротехническом строительстве, связанном с при заключением горной реки в закрытое русло значительной длины. Однако, после строительства участка скоростной дороги в центральной части г.Тбилиси, что было осуществлено при помощи арочных тоннелей из гофрированной стали, р. Вере оказалась заключенной в достаточно протяженное закрытое русло. В общей сложности суммарная часть закрытого русла на этом участке составила 46% от первоначальной длины русла между магистралью Тамарашвили и р. Кура.

Очевидно, что проект строительства любого потенциально опасного гражданского объекта, в числе которых находятся и крупные гидротехнические сооружения, обязательно должен содержать полноценный анализ всех тех возможных негативных эффектов, способных проявиться по любой причине. Современные правила требуют, что при оценке опасности особенно следует принять во внимание изменение естественных внешних условий, происшедших в результате строительства и эксплуатации того или иного объекта. Собственно это проблема должна быть в полной мере рассмотрена, оценена и отображена в конкретном заключении ответственных государственных структур. Следовательно, без соответствующего разрешения реализация потенциально опасных

проектов запрещено законодательством. Очевидно, что проект участка скоростной автомобильной дороги в ущелье р. Вере никак не мог быть исключением из этого правила. Тем более, что ее безопасная эксплуатация требовала сведения к минимуму той реальной угрозы, которую представляла р. Вере не только по исторической памяти, но и по данным полувековых полноценных наблюдений. Нельзя исключить, что, по замыслу авторов проекта (который для общественности так и остался закрытым по сегодняшний день!) строительство закрытого русла, кроме транспортной, решала также и проблему наводнения в нижней части ущелья р. Вере. Однако представляется, что при этом были допущены конструктивные недостатки, вероятной причиной которых, по нашему мнению, являлось игнорирование негативного фактора гидродинамического сопротивления. В результате этого закрытое русло превратилось в еще большую опасность, чем ту, которую исторически представляла р. Вере. Поэтому, исходя из такого видения причины развития событий 12.06.2015 г, не можем согласиться с официальным мнением, согласно которому катастрофический паводок был вызван не прогнозируемыми аномально сильными осадками. Однако, даже если принять такое объяснение, вряд ли можно считать сильнейшие осадки исключительным явлением для этого региона. В связи с этим представляется совершенно беспочвенное заявление гидрометеорологического департамента о тысячелетнем периоде повторяемости (!) сверхинтенсивных осадков мощности события 12.06.2015 г. в водосборном бассейне р. Вере. Во первых, после предварительных оценок окончательная однозначная величина высоты осадков так и не была дана, во всяком случае, в доступных нам источниках. Во вторых, по крайней мере по данным последнего столетия, хорошо известно о частой повторяемости очень сильных паводков именно в ущелье р. Вере. Поэтому, представляется очевидным, что при проектировании закрытого русла было необходимым априори судить об опасности, которая могла возникнуть в случае экстремальных погодных условий. Из-за потенциальной угрозы видимо не следовало применять такие конструктивные решения, которые могли бы отрицательно повлиять на пропускную способность закрытого русла. Сценарий развития событий обязательно должен был предполагать возможность обширного наводнения в ущелье, которое в течении короткого времени подверглось сильной урбанистической нагрузке. Для оценки степени потенциальной опасности было бы достаточным, например, воспользоваться ретроспективными данными о параметрах сильнейшего паводка, имевшего место 04.07.1960 г, а также целой серии наводнений, имевших место в последующий период времени. В таком случае, при помощи достаточно объективного анализа, можно было бы получить достоверную модельную картину различных этапов возможного наводнения и оценить его масштабы. Например, вполне можно было оценить, насколько соответствовала полной нагрузке первого туннеля, проходящего под магистралью Тамарашвили, пропускная способность других туннелей закрытого русла с учетом их гидродинамического сопротивления. В самом деле, невозможно исключить, что обширное наводнение произошло не только перед первым туннелем, но и перед любым из других туннелей. Важным аргументом в пользу такого утверждения служит факт, что вода из запруды, возникшей на улице Сванидзе, не перелилась через магистраль

Тамарашвили. Следовательно, эта магистраль оказалась водоразделом, разделившим ущелье на две части. Поэтому следует считать, что наводнение за водоразделом началось по независимой от первого туннеля причине. Для этого, например, было достаточным уменьшение расхода воды в каком-либо из туннелей из-за возрастания гидравлического сопротивления, а также добавочная ливневая вода, собранная в нижней части ущелья. Представляется, что возможность именно такого развития событий вполне следовало рассмотреть на основе анализа паводка 04.07.1960 г. Тогда наводнение произошло перед обоими туннелями, очевидно работавшими на пределе пропускной способности.

**Оценка гидравлического сопротивления конструкции закрытого русла.** По нашему субъективному мнению, проектировщиками участка скоростной дороги в ущелье р.Вере была допущена недооценка действия возрастания гидравлического сопротивления закрытого русла. Существовала очевидная вероятность того, что в экстремальных условиях в закрытом русле мог уменьшиться расход воды. Главная причина данного негативного эффекта заключалась в гофрированной структуре внутренней поверхности туннелей, который мог усилиться излишней кривизной первого туннеля, длина которого после модернизации выросла более чем два раза. Без такого физически обоснованного предположения сложно объяснить, почему конструкция закрытого русла оказалась непригодной к работе в экстремальных погодных условиях. По изначально бытующему расхожему мнению причиной катастрофического наводнения были осадки исключительной интенсивности, непрогнозируемые заранее, а также деревья, снесенные потоком и забившие вход а первый туннель. Однако нам представляется, что такое объяснение не может являться достаточно аргументированным противовесом для нашего предположения. В частности, вход в первый туннель в течении некоторого времени действительно был частично перекрытым, что вызвало наводнение на улице Сванидзе, однако вода не перелилась через магистраль Тамарашвили. После некоторого времени первый туннель прорвало. Следовательно, с этого момента частично закрытый туннель стал работать на максимуме своей пропускной способности. Предположим, что после этого момента закрытое русло заработало в режиме максимальной пропускной способности. При таком условии наводнение между первым и последним туннелями могло быть вызвано только осадками по площади этой части ущелья, включающего также и часть городских водостоков. По нашим грубым оценкам, площадь данного водосбора не более чем в три раза превышает площадь этой части ущелья:  $S \approx 10^5 \text{ м}^2$ . Если считать, что 12.06.2015 высота осадков составила:  $h \approx 100-150 \text{ мм}$ , то объем воды в обсуждаемом водосборе мог составить:  $V \approx (1-1.5)10^6 \text{ м}^3$ . Следовательно, по этой причине подъем воды должен был находиться в пределах: 3-5 м. Реально, вода поднялась, как минимум, в два раза выше, настолько, что туннели оказались ниже ее уровня. В любом случае, даже по заведомо завышенным оценкам, вода в этой части ущелья вряд ли могла подняться так высоко, если бы конструкция закрытого русла работала достаточно эффективно. Поэтому попытка считать аномально интенсивные осадки единственной причиной катастрофического паводка 12.06.2015 представляется неубедительной. Тем более, что, как нам известно, в проектных расчетах в качестве максимального расхода в

закрытом русле была принята величина:  $Q \approx 260 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ , вполне соответствующая экстремальным условиям. Однако, выведенные сомнения требуют дополнительную аргументацию, в качестве которой ниже приводятся краткие результаты модельного анализа, следующего из классической гидродинамической теории турбулентного течения в шероховатых трубах.

Известно, что коэффициент гидравлического сопротивления трубы, кроме характерной величины числа Рейнольдса, зависит также и от геометрии и шероховатости ее внутренней поверхности. Подобно гидравлическим трубам, подобная зависимость от указанных параметров существует в естественных и в искусственных руслах, в частности, в туннельных водопроводах. Поэтому, при помощи классического метода гидродинамического подобия можно вполне надежно моделировать гидравлическое сопротивление водопроводного канала любой формы. В частности, можно достаточно точно определить характерную величину коэффициента гидравлического сопротивления закрытого русла р.Вере. Для этого необходимо аппроксимировать закрытое русло (т.е. любой из туннелей) криволинейной шероховатой трубой круглого сечения. Очевидно, что аналогия какого-нибудь отдельного туннеля, либо закрытого русла в целом, с трубой является физически вполне корректной. Такой прием позволяет достаточно просто смоделировать гидравлическое сопротивление закрытого русла, а также оценить величину максимального расхода воды.

Главной характеристикой турбулентного течения в режиме максимальной нагрузки трубы является число Рейнольдса:  $R_n = \frac{\bar{u}D}{\nu}$ , где  $\bar{u}$  - средняя скорость воды,  $D$  - диаметр трубы,  $\nu$  - кинематическая вязкость воды. Этот параметр для закрытого русла можно достаточно просто определить по данным гидрологических наблюдений естественного русла р.Вере. Далее очевидна аналогия между гофрированной внутренней поверхностью закрытого русла с шероховатой трубой. Известно, что на внутренней поверхности гладких труб со временем может образоваться шероховатость, возникающая из-за осадка твердых примесей, взвешенных в воде. Из различных типов шероховатости наиболее негативной, с точки зрения уменьшения расхода жидкости в трубе, является волнистая шероховатость. Очевидно, что гофрированная стальная поверхность закрытого русла в высшей степени подобна волнисто-шероховатой внутренней поверхности водопроводной трубы. Из-за шероховатости гофрированной поверхности степень турбулизации течения в закрытом русле и, следовательно, характерное число Рейнольдса, должны были возрасти. Все это не могло не сказаться на расход жидкости в экстремальных условиях. Этот эффект на криволинейных участках закрытого русла должен был дополнительно усиливаться из-за действия центробежных сил. Однако, по нашему мнению, именно гофрированная поверхность оказалось главной причиной возрастания гидравлического сопротивления закрытого русла.

Действие шероховатости в водопроводных трубах было замечено достаточно давно. Этот эффект моделировался в многочисленных лабораторных экспериментах, из которых классическими признаны эксперименты, проведенные И.Никурадзе. В частности, было установлено, что среди различных видов шероховатости на внутренней поверхности

водопроводной трубы, волнистая шероховатость вызывает максимально резкое уменьшение расхода жидкости [3-5]. С данной точки зрения очевидна прямая аналогия гофрированной стальной поверхности закрытого русла р.Вере и волнисто- шероховатой поверхности водопроводной трубы. Известно, что на различных гидротехнических объектах допустимая относительная шероховатость может меняться в пределах: 0.2%-7% [6]. Этот параметр является отношением характерной высоты шероховатости к радиусу трубы, либо к характерному линейному размеру поперечного сечения водопроводного канала любой другой формы. Существование достаточно широкого интервала допустимых значений относительной шероховатости на гидротехнических объектах различного назначения вызвана определенными причинами. Например, неоднозначной зависимостью гидравлического сопротивления от линейных параметров водопровода, а также от степени интенсивности турбулентности течения. В случае водопровода формы трубы таким параметром является его длина. Этот параметр присутствует в известной формуле Хагена-Пуазейля, определяющей расход ламинарной жидкости в трубе круглого сечения. В эту формулу в качестве основного определителя входит также градиент давления. Для турбулентного течения используется особая модификация формулы Хагена-Пуазейля. Степень корректности в случае ее использования зависит от уровня турбулентности потока. На этот фактор, кроме нагрузки трубы, влияет также и шероховатость ее внутренней поверхности. Чем длиннее шероховатая труба, тем более уменьшается верхняя граница интервала докритических значений относительной шероховатости. Интенсификация турбулентности потока будет отображаться в возрастании величины числа Рейнольдса. Однако, если пропускная способность трубы, при нерегулируемом течении, заведомо превосходит теоретическую величину максимального расхода, верхний предел допустимой относительной шероховатости внутренней поверхности водопровода может повышаться до 7%. Принимая во внимание этот качественный факт, возвратимся к закрытому руслу р.Вере, характерный диаметр которого:  $D \approx 8 \cdot 10^3$  мм. Согласно [1], в нижней части ущелья, по данным наблюдений, во время полноводия средняя скорость течения:  $\bar{u} = 3,5 \text{ мс}^{-1}$ . Следовательно, число Рейнольдса в случае полной нагрузки закрытого русла могла достигнуть величины:  $Re \approx 2 \cdot 10^7$ . Поэтому, следуя выше приведенному интервалу допустимых значений относительной шероховатости, теоретически минимальная высота абсолютной шероховатости, которая могла быть способной оказать эффективное влияние на гидравлическое сопротивление закрытого русла, оказывается равной:  $k \approx 10$  мм. Однако, реальная величина высоты выступа стальной гофрированной поверхности:  $k = 150$  мм, т.е. более чем на порядок превосходит указанную минимальную теоретическую величину. Следовательно, относительная шероховатость внутренней поверхности закрытого русла реально составляла  $\approx 4\%$ . С первого взгляда представляется, что такая величина не выходит за рамки технически допустимых значений относительной шероховатости. Однако, следует иметь в виду, что закрытое русло р.Вере являлось весьма протяженным объектом, состоящим из последовательно расположенных достаточно длинных туннелей. В режиме полной нагрузки в этих туннелях особенно сильно могли

действовать шероховатость и кривизна, каждая из которых способна вызвать резкое увеличение гидравлического сопротивления. Вероятней всего, их суммарное негативное действие являлось аддитивным, независимо от того, в каком месте проявлялся максимально эффект шероховатости или кривизны в отдельности. Действие этих факторов однозначно могло способствовать усилению турбулентного фона, т.е. интенсификации возвратных течений. Действительно, по мере прохождения потока по длине закрытого русла, в каком либо месте (или в нескольких местах) полное гидравлическое сопротивление, подобно полному сопротивлению шероховатой криволинейной трубы, должно быть аддитивной суммой  $\lambda = \lambda_r + \lambda_k$ , где  $\lambda_r$  - сопротивление, возникающее из-за кривизны,  $\lambda_k$  - сопротивление, связанное с шероховатостью внутренней поверхности закрытого русла. Вероятно, именно критическое возрастание суммарного гидравлического сопротивления стало причиной резкого уменьшения расхода воды в закрытом русле, т.е. способствовало уменьшению его пропускной способности. Представляется, что независимо от того, на каком участке закрытого русла мог возникнуть данный негативный эффект, результирующим следствием этого оказалось масштабное наводнение. Например, после первого туннеля весьма вероятным местом начала наводнения мог стать вход в самый длинный (более километра) туннель, соединяющий р.Вере с р.Курой. Однако, нельзя исключить, что реально существовала возможность перекрытия также любого другого туннеля. Например, из схематической картины русла р.Вере видно, что перед туннелем 2 отрезок русла длиной в несколько десятков метров имеет настолько резкий изгиб, что данный туннель стоит практически под прямым углом к течению. Можно предположить, что это место может стать критической точкой закрытого русла, если вновь возникнут экстремальные условия. Видимо, в процессе восстановления закрытого русла на это место обратили внимание. Поэтому во избежание этой опасности в продолжение входного портала туннеля было решено поставить две стены. Начальные участки этих ломанных стен параллельны туннелю, а их окончания, имеющие длину около 5 м, составляют определенный угол с осью туннеля. Из фото, сделанного во время строительства, видно, что данная пристройка подобна воронке, предназначение которой состоит в направлении течения в сторону туннеля. Однако, считаем необходимым отметить, что подобная конструкция, вместо положительного действия в экстремальных условиях, может вызвать также и отрицательное действие, т.е. способствовать уменьшению расхода воды в туннеле. Этот важнейший вопрос является настолько проблематичным, что по нашему мнению требует достаточно тонкого теоретического анализа а также, возможно, лабораторного моделирования.



Как было сказано выше, для подтверждения качественных рассуждений соответствующими количественными оценками следует воспользоваться особой модификацией формулы Хагена-Пуазейля для случая турбулентного течения

$$Q = \pi R^2 u, \quad (1)$$

где  $Q$ - расход воды в круглой трубе радиуса  $R$ . В формулу (1) входит также средняя скорость течения, которая определяется из аналитического выражения [3-5]

$$u = \sqrt{\frac{4R\Delta p}{\lambda \rho l}}. \quad (2)$$

В эту формулу, наряду с радиусом трубы, перепадом давления  $\Delta p$ , длиной  $l$  и плотностью воды  $\rho$ , в явном виде входит также полное гидравлическое сопротивление  $\lambda$ .

Для оценки величины гидравлического сопротивления, вызванного криволинейностью трубы, можно воспользоваться полуэмпирической формулой

$$\frac{\lambda_r}{\lambda_0} = 1 + 0.075 R_g^{1/4} \left(\frac{R}{r}\right)^{1/2}, \quad (3)$$

в которой вместе с числом Рейнольдса присутствует гидравлическое сопротивление гладкой прямой трубы, определяемое выражением

$$\lambda_0 = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}}. \quad (4)$$

В режиме полной нагрузки характерное число Рейнольдса для закрытого русла р.Вере:  $Re \approx 2 \cdot 10^7$ . Следовательно, из формулы (4) будем иметь следующую характерную величину гидравлического сопротивления гладкой прямолинейной трубы:  $\lambda_0 \approx 0.73 \cdot 10^{-2}$ . В формулу (3) входит относительная кривизна  $\frac{R}{r}$ , т.е. соотношение радиуса криволинейной трубы к радиусу ее кривизны. Согласно актуализированным строительным нормам и правилам бывшего СССР [7], которые вероятно и по сегодняшний день являются действительными в Грузии, допустимое значение относительной кривизны водопроводных гидротехнических объектов, зависит от величины скорости потока воды и ограничивается максимальным угловым сектором поворота  $\varphi = 60^\circ$ . Из-за недостижимости проекта участка скоростной дороги в открытых источниках, мы лишь по косвенным оценкам можем предположить, что в первом модернизированном туннеле закрытого русла угловой сектор кривизны не превосходил предельно допустимой величине. Для строгости рассуждений также можно считать, что скорость потока во время паводка 12.06.2015 г. достигла теоретической допустимой величины:  $V_{max} \approx 10 \text{ мс}^{-1}$ , определенной как по косвенным оценкам, так и по данным многолетних наблюдений. Такой предельной величине соответствует допустимая

относительная кривизна:  $\frac{R}{r} \approx 0.17$ , т.е. при  $R_r \approx 2 \cdot 10^7$  из выражения (3) будем иметь:

$\frac{\lambda_r}{\lambda_0} \approx 3$ . Следовательно, т.к. по нашим оценкам абсолютная величина коэффициента гидравлического сопротивления:  $\lambda_0 \approx 0.73 \cdot 10^{-2}$ , для коэффициента гидравлического сопротивления из-за кривизны закрытого русла будем иметь:  $\lambda_r \approx 0.021$ .

Коэффициент гидравлического сопротивления трубы с шероховатой внутренней поверхностью, подобно  $\lambda_r$ , также определяется известной полуэмпирической формулой [3-5]

$$\lambda_k = \frac{1.8}{\ln^2 \left( \frac{R}{k} \right)} \quad (5)$$

Для гофрированной секции закрытого русла геометрическая шероховатость составляла:  $\frac{R}{k} \approx 26.6$ , которой соответствует:  $\lambda_k \approx 0.12$ . Таким образом, по модельным оценкам, характерная величина полного гидравлического сопротивления закрытого русла р.Вере была равной:  $\lambda = \lambda_r + \lambda_k \approx 0.14$ .

Для наглядной демонстрации необходимости корректной модельной оценки рассмотрим две трубы различных радиусов:  $R_1$  и  $R_2$ . Будем считать, что первая труба является гладкой и прямолинейной, вторая-криволинейной и шероховатой. Предположим, что при одном и том же градиенте давления расход воды в трубах является одинаковым. Данное предположение физически является вполне оправданным в случае свободного гравитационного течения воды. При условии равенства максимальных расходов воды в трубах, из выражения (2) при помощи формулы (1) будем иметь соотношение

$$\frac{Q_1}{Q_2} = 1 = \frac{R_1^2}{R_2^2} \sqrt{\frac{R_1 \lambda}{R_2 \lambda_0}} = \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^{2.5} \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Из данного выражения следует, что расходы в трубах будут равными лишь в том случае, если радиус криволинейной шероховатой трубы будет значительно больше радиуса прямолинейной гладкой трубы. В частности, т.к. по модели  $\lambda_0 \approx 0.73 \cdot 10^{-2}$ , а полное гидравлическое сопротивление закрытого русла р.Вере:  $\lambda \approx 0.14$ , будем иметь:

$\frac{R_2}{R_1} \approx 1.8$ . Иными словами, для соблюдения условия равенства расхода площадь поперечного сечения шероховатой криволинейной трубы должна значительно превосходить площадь сечения гладкой прямолинейной трубы:  $S_2 \approx 3.24 S_1$ . В свою очередь, это означает, что в случае одинаковой площади поперечного сечения, пропускная способность двух труб, имеющих различную геометрию и степень шероховатости внутренней поверхности, будет различной. Поэтому, если эти трубы связаны и первой

является гладкая и прямая, в случае ее полной нагрузки неизбежным будет частичное запираение второй, криволинейной и шероховатой, трубы. Возвращаясь к закрытому руслу р.Вере, это означает, что в экстремальном режиме течения могла возникнуть резкая разница между расходом жидкости не только между крайними сечениями закрытого русла в целом, но и между входами и выходами его отдельных туннелей. После этого, в нижней части ущелья, в любом случае было неизбежным наводнение катастрофического масштаба.



**Заключение.** Катастрофическое наводнение, имевшее место в ущелье реки Вере 12.07.2015 г., было вызвано как естественными, так и искусственными причинами. По

нашему представлению, произошло наложение результата объективно возникшего аномального стихийного явления (осадки исключительной интенсивности) на технический фактор, связанный с конструктивным недостатком закрытого русла, являющегося частью проекта участка скоростной дороги, проходящего через нижнюю часть ущелья рю Вере. В частности, в проекте участка скоростной дороги, проходящей в нижней части ущелья этой горной реки, по всей видимости, не было должным образом учтена возможность критического возрастания полного гидравлического сопротивления закрытого русла при его полной нагрузке. По нашему мнению, пренебрежению этим эффектом вероятно способствовала теоретически недостаточно обоснованная конструкция закрытого русла. При значительной длине оно являлось комбинацией нескольких связанных туннелей из гофрированной стали и железобетонных туннелей кривизна одного из которых вероятно была близка к критической. Суммарное негативное действие факторов шероховатости внутренней поверхности и кривизны туннелей закрытого русла, по модельным оценкам, могло быть значительным. В результате этого произошло возрастание гидравлического сопротивления, приведшее к частичному запиранию закрытого русла р.Вере. Вероятно, что этот эффект оказался причиной обширного наводнения, приведшего к известным трагическим последствиям в центре г.Тбилиси. Очевидно, что в будущем нельзя исключить повторения аномально интенсивных осадков. Следовательно, т.к. после катастрофического паводка 12.06.2015 закрытое русло было восстановлено без особых изменений, негативный фактор, связанный с гидравлическим сопротивлением, может вновь возникнуть. Поэтому, считаем необходимым полноценное моделирование течения в закрытом русле и соответствующий ему мониторинг, который должен быть особенно строгим в случае экстремальных метеорологических условий.

#### **литература**

- 1, დკერესელიძე, ალავერდაშვილი, დკვიციანი, ნ.ცინცაძე, ნ.კოკია. კატასტროფული წყალმოვარდნები მდ. ვერეზე და მათი გაანგარიშების მეთოდოლოგია. თსუ შრომები, სერია გეოგრაფია, № 8-9, 2011.
2. სამშენებლო ნორმები და წესები – “სეისმოძვედი მშენებლობა” (პნ 01.01-09).
- 3.Г.Шлихтинг. Теория пограничного слоя. Москва, Наука, 1974 , гл. XX
- 4.Л.Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. Москва: Наука, 1973 , гл. X.
- 5.Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Гидродинамика. Москва, Наука, 1988, гл.4.
6. Строительные нормы и правила. Туннели гидротехнические. СНиП 2.06.09-84
- 7.СП 102.13330.2012.Туннели гидротехнические. Актуализированная редакция, СНиП 2.06.09-8.