

ВОДОПРОВОД

СРАБОТАННЫЙ ЕЩЕ РАБАМИ РИМА...

Вера Широкова, ИИЕиТ РАН, Наталья Фролова, МГУ

Самые выдающиеся инженерные сооружения древности

В истории развития систем водоснабжения древнеримские водопроводы занимают особое место. Их сохранившиеся до наших дней остатки свидетельствуют не только о величии и могуществе Древнего Рима, но и о высочайшем для античного мира уровне развития инженерной мысли.

Крупнейший город древности (по современным оценкам, в период империи его население составляло от 600 тыс. до 2 млн чел.), к тому же расположенный на холмах, не мог не иметь развитой системы водоснабжения. В нем функционировали 11 водопроводов. Первый из них – Аппиев, названный в честь руководившего этим проектом цензора Аппия Клавдия, был сооружен в 312 г. до н. э. и имел протяженность свыше 16 километров. Второй водопровод, построенный спустя 40 лет, имел длину 70 километров! Такой же по размеру был и третий, Марциев, водопровод. Общая протяженность римских водопроводов составляла 436 км, из них 55 км – мостовые сооружения. Они поставляли в город, славившийся своими фонтанами и банями (термами), от 700 тыс. до 1 млн куб. м воды ежедневно (по некоторым оценкам – до 1,5 млн куб. м). Столь большое потребление воды может показаться чрезмерно высоким, но нужно иметь в виду, что древние римляне не знали запорной арматуры, и вода в системе текла непрерывно, обеспечивая промывку канализационных стоков.

Такие расходы воды не могли обеспечить никакие известные в то время водоподъемные сооружения (см. «Водоподъемные механизмы и водоводы...» в №4/2004 Журнала), поэтому вода в древнеримские водопроводы поступала самотеком из естественных источников, которые приходилось искать в горах (чтобы обеспечить перепад высот, достаточный для подачи воды в город, расположенный на холмах), иногда за десятки километров от города. Технологии производства труб в те времена находились в зачаточном

состоянии: были известны гончарные и свинцовые трубы, в некоторых случаях использовали просверленные каменные блоки; естественно, обеспечить с их помощью столь большие потребности в трубах было невозможно. Поэтому для доставки воды строили каналы и лотки, и здесь древнеримские зодчие проявляли настоящие чудеса, демонстрируя глубокие знания механики и гидравлики и создавая гидротехнические сооружения, поражающие своими колоссальными размерами и высокой точностью расчетов. Современные исследования эффективности древнеримских водопроводов, включающие, в частности, компьютерное моделирование, показали, что системы, созданные 1,5-2 тысячи лет назад, вполне соответствуют ныне действующим стандартам.

Мы еще не раз отметим изящество инженерных решений и высокую точность их реализации при строительстве римских водопроводов. Напомним, что их создатели пользовались римской нумерацией, возникшей в V в. до н. э. и крайне неудобной для вычислений. Все расчеты выполнялись при помощи счетных досок и камешков (отсюда «калькуляция» — от лат. *calculi* — камешки).

Водопроводы были построены не только в Риме, но и в других городах Римской империи. Их остатки можно найти в Италии, Испании, Франции, Турции. Некоторые из них позволяют составить достаточно полное представление об устройстве и характеристиках древнеримских водопроводов.

Акведуки

Наиболее заметным звеном в системах римских водопроводов являются акведуки – каменные мосты, сооруженные для пропуска канала с водой над долинами и оврагами. Самым высоким и, пожалуй, самым известным из них стал акведук Пон-дю-Гар через глубокую долину реки Гар на юге современной Франции (рис.1). Высота этого сооружения – 49 метров, длина – 275 метров. Высота его нижнего яруса



Рис.1. Акведук Пон-дю-Гар

с шестью арками – 21,87 м, ширина – 6,36 м; среднего с 11-ю арками – соответственно 19,50 и 4,56 м и верхнего, по которому проходил бетонный водовод – соответственно 7,40 и 3,06 м. Длина пролета самых больших арок составляет 24,5 м.

Это функциональное инженерно-техническое сооружение без каких-либо декоративных элементов, но выполненное со впечатляющим архитектурным изяществом, являлось частью системы водоснабжения города Нима (римского Немауса). Надпись на акведуке свидетельствует, что он сооружен в 19 году до н. э. при полковнике и проконсуле Агриппе, друге и зяте императора Августа. Однако некоторые археологи и историки оспаривают эту дату. Они считают, что постройка столь высокого технического уровня могла возникнуть лишь в более поздние времена.

Принято считать, что римские инженеры решали свои задачи чисто практически, на основе ранее накопленного опыта, и недостаток теоретических познаний компенсировали многократным запасом прочности конструкций. Однако современные исследования моста Пон-дю-Гар и всей системы

водоснабжения Немауса, выполненные Джорджем Ф.У.Хокком и Ричардом А.Новаком [1], заставляют усомниться в справедливости этого мнения.

Долина, которую пересекает мост, известна своими ураганными ветрами (до 150 км/ч), а река под ним весной сильно разливается. Римляне знали, как рассчитывать вес каменной кладки, но не умели точно определять нагрузки, вызываемые ветром. Расчет опрокидывающих нагрузок под действием ветра и паводков даже в наше время является сложной задачей. Исследования Дж.Хока и Р.Новака показали, что растягивающее напряжение в основании опор нижнего и среднего яруса моста, вызывающее образование трещин, может возникнуть при ураганном ветре, скорость которого у поверхности земли составляет примерно 215 км/ч. Реальные же нагрузки, вызываемые ветрами в этом районе, лишь в редких случаях достигают половины той, которая возникает при этой расчетной скорости. Иными словами, мост имеет примерно двухкратный запас прочности, или устойчивости к нагрузкам, которые приводят к появ-

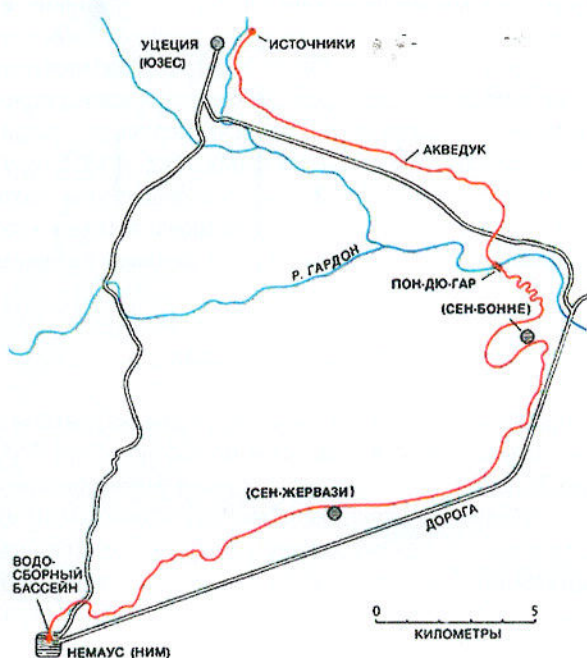


Рис.2. Схема трассы водовода системы водоснабжения Немауса (Нима)

лению трещин. Этот запас прочности вполне достаточен и соответствует принятому в современном строительстве.

Каналы

Однако Пон-дю-Гар – лишь наиболее заметное звено системы водоснабжения Нима. Чтобы в полной мере оценить совершенство проектных и технических решений древнеримских инженеров, необходимо рассмотреть всю систему.

Она начиналась от источников вблизи небольшого селения Уцеция (ныне Юзес) и заканчивалась у склона холма в Немаусе, где находился круглый «кастеллум» (водосборный бассейн). Оттуда вода по десяти распределительным трубопроводам подавалась на более низкие уровни.

Расстояние по прямой от Уцеции до Немауса составляло примерно 20 км. Трасса водовода по этому пути проходила бы через холмы и узкие ущелья, что потребовало бы соору-

Рис.3. Водосборный бассейн (кастеллум) в Немаусе (Ниме)



жения по меньшей мере одного 8-километрового туннеля. Люди научились строить такие туннели лишь спустя многие столетия. Холмы не давали обойти эту местность и с запада, поэтому единственно возможным решением был ее обход по дуге с востока (рис.2).

Этот путь требовал сооружения канала длиной 50 км, который должен был пересечь глубокую долину реки Гардон, нагромождения выходящих на поверхность каменных пород и болота. Одна из сложнейших проблем была обусловлена небольшой высотой источников над уровнем водосборного бассейна – всего 17 м. Строителям, в распоряжении которых находились лишь примитивные ватерпасы, абак и восковые таблички, приходилось заботиться о сохранении ничтожно малого среднего уклона по трассе канала, не превышающего 0,34 м на 1 км (эта величина получается делением 17-метрового перепада высот между Уцецией и Немаусом на 50 км, т.е. длину самого канала). Такой уклон незаметен на глаз, поэтому даже небольшая ошибка могла привести к выходу на плоские участки, на которых застаивалась бы вода.

Чтобы максимально уменьшить высоту Пон-дю-Гара, строители увеличили уклон канала выше него до 0,67 м/км. Однако из-за этого пришлось делать более пологим тот участок, который начинался от Пон-дю-Гара – уклон на нем составляет 0,07–0,30 м/км.

Расчеты глубины воды в канале на участке от Пон-дю-Гара до Немауса, выполненные Дж.Хоком и Р.Новаком, показали, что римским строителям удалось обеспечить эффективное, с минимальным сопротивлением движение воды по нему. Это было поистине замечательным достижением: математические формулы, которыми в наши дни пользуются строители при проектировании водопроводов с подачей воды самотеком, были выведены лишь в XIX в.

Эти же расчеты показали, что в период сезонных паводков опасность переполнения канала отсутствовала. Трудно представить, чтобы столь экономично построенный и эксплуатируемый канал мог быть более совершенным по своей конструкции.

Водосборный бассейн

Как и мост Пон-дю-Гар, водосборный бассейн также пережил тысячелетия. Здание, в котором находился водосборный бассейн, не уцелело, однако сам бассейн представляет собой одно из наиболее хорошо сохранившихся сооружений такого рода (рис.3). Его диаметр около 6 м, а глубина 1,4 м. Пазы в нижней и боковых сторонах квадратного ввода, через который вода из канала поступала в облицованный мальтой бассейн, а также отверстия в каменных плитах над этим вводом свидетельствуют о том, что ввод заканчивался затворами, с помощью которых, как полагали, регулировалось поступление воды в бассейн.

При нормальной работе системы вода вытекала из бассейна через десять распределительных труб, местонахождение и диаметр которых (0,3 м) можно установить по сквозным отверстиям в стенках бассейна. Трубы были изготовлены из свинца. О том, что этот материал представляет опасность для организма человека, было уже известно, но с этим мирились, поскольку из-за повышенной жесткости воды стенки труб вскоре покрывались защитным слоем карбо-

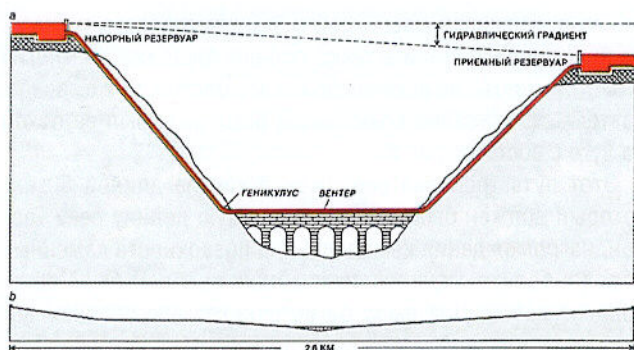


Рис.4. Схема древнеримского сифона (а) и профиль Бонанского сифона водопровода Жье (b) (Лионская система)

ната кальция. Для слива воды из бассейна при его чистке использовались три донных отверстия, оснащенных клапанами, которые в нормальном рабочем режиме были закрыты. Диаметр этих отверстий также равнялся примерно 0,3 м.

Как удалось установить, при максимальном поступлении воды в бассейн распределительные трубы были заполнены наполовину, что является оптимальным для безнапорного водопровода круглого сечения и обеспечивает его максимальный КПД.

Археологов долгое время интересовало назначение затворов на входе в бассейн, а также причина, по которой строители использовали три больших сливных отверстия вместо обычно применявшегося в таких случаях одного небольшого.

Что касается затворов, то они не могли выполнять роль клапанов для регулирования потока воды, поступающей в бассейн — тогда канал переполнялся бы, что могло привести к его разрушению. Вероятнее всего, затворы служили для измерения расхода воды. Будучи специалистами в области водоснабжения, римляне вряд ли пренебрегли необходимостью измерения ее расхода. Скорее всего, они применяли шлюз-регулятор. Если известен размер находящегося под водой отверстия, через которое вода из канала поступает в бассейн, а также напор, т.е. разница между уровнем воды в бассейне и в канале, то можно определить расход воды. Эта система, в которой вода протекала под затвором, была простой и в то же время чувствительной к изменению потока.

Затворы можно было использовать не только для измерения расхода воды, но и в качестве элементов системы водоспуска с помощью донных отверстий.

Количество и размеры этих отверстий можно объяснить достаточно просто. Для очистки бассейна или проведения ремонтных работ его приходилось освобождать от воды. Если поступление воды в бассейн нельзя было прекращать на долгое время, а так, видимо, и обстояло дело, то одного небольшого отверстия оказывалось недостаточно. Несколько больших сливных отверстий позволяли при непрерывном поступлении воды в бассейн осушать его почти до дна, а при кратковременном прекращении притока освобождать от воды полностью.

Каждая из рассмотренных нами конструктивных особенностей акведука заслуживает высокой оценки. Они свидетельствуют о том, что римские инженеры были более искусными специалистами, чем обычно принято думать о них.

Долго ли функционировал водопровод? Известно, что он надежно работал в течение почти четырех столетий. После

упадка римской империи канал пришел в запустение, и его стенки покрылись толстыми карбонатными отложениями. К VIII в. н.э. он уже был настолько забит, что оказался практически выведенным из строя. Со временем войны и землетрясения разрушили многие части водопровода, а люди выламывали камни и свинец для своих нужд. В 1855 году император Наполеон III распорядился о проведении тщательного ремонта моста Пон-дю-Гар, который остается красноречивым свидетельством мастерства римлян и совершенства их инженерных сооружений.

Сифоны в римских водопроводах

При прокладке водопроводов через ущелья древние римляне далеко не всегда сооружали мосты, подобные Пон-дю-Гару. В тех случаях, когда пересекаемое ущелье было слишком глубоким, они сооружали систему труб, которые круто спускались по одному склону ущелья и поднимались по другому [2]. Им был известен основной принцип сифона: вода в трубе должна всегда возвращаться к своему первоначальному уровню.

Как известно, сифон представляет собой трубу, по которой жидкость переливается с одного уровня на другой через промежуточное возвышение, т.е. по траектории в форме буквы «П». Конструкцию сифона, применявшегося в Древнем Риме, правильнее называть обратным сифоном, или дюкером. В нем жидкость движется по U-образной траектории. В простом U-образном сифоне жидкость, введенная на одном конце, поднимется до того же уровня на другом. Римские сифоны имели значительную длину, поэтому гидравлические потери в них становились заметными, и приемный конец приходилось устраивать на уровне несколько ниже подающего конца (рис.4).

Хотя известно более двадцати сифонных сооружений, относящихся ко времени Римской империи, роль сифонов в римских гидравлических системах обычно недооценивается. В отличие от впечатляющих развалин древних мостов до нас сохранилось очень мало остатков сифонов. Их прокладывали по поверхности земли, поэтому они могли быть легко разрушены. Кроме того, они играли лишь второстепенную роль в тех системах римских водопроводов, которые современные ученые изучили наиболее тщательно.

Вследствие этой недооценки бытовало представление о том, что римляне предпочитали строить мосты, а не сифоны потому, что не умели изготавливать трубы, способные выдерживать высокое давление воды. В 1875 г. французский инженер Эжен Бельгран изготовил копии римских труб и подверг их гидравлическим испытаниям. Трубы разрушались только тогда, когда давление в них достигало 18 атм. Такие трубы могли успешно работать в сифоне, опускающемся на 180 м ниже исходного уровня. Такой сифон не смогли бы заменить и три моста Пон-дю-Гар, поставленные друг на друга.

Там, где водопровод, проложенный в виде открытого канала, подходил к ущелью, которое нужно было пересечь, строили напорный резервуар, выложенный из кирпича. (рис.5) По существу, этот резервуар был распределительным, так как сифон состоял не из одной (как в современной гидротехнике), а из нескольких (до девяти) труб, уложенных параллельно друг другу. Их входные концы располагались в ряд в нижней части резервуара.



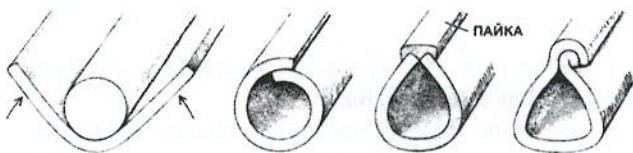
Рис.5. Напорный резервуар сифонов в Сусье на водопроводе Жье (Лионская система)

Трубы изготавливали из свинцовых листов, изгибая их на деревянном сердечнике и спаивая либо зачеканивая края. (рис.6) Труба получалась овального или грушевидного поперечного сечения с продольным швом. (Интересно, что шов не был самым слабым местом трубы: в испытаниях, проведенных Бельграном, разрушение происходило не по шву, а по боковой стенке). Обычно они имели наружный диаметр 25-27 см и толщину стенки от 3 до 5 см. Судя по сохранившимся остаткам, трубы изготавливались длиной около 3 м.

От напорного резервуара трубы спускались по склону ущелья на небольшой глубине под землей. Подземная прокладка труб предотвращала их случайные повреждения и чрезмерное температурное расширение в жаркие дни. Они могли прокладываться до самого дна ущелья, следуя его профилю, однако на дне часто строился невысокий мост для них («венгер» – лат. *venter*). Венгер создавал два резких перегиба («геникулус» – лат. *geniculus*) на концах моста, вследствие чего могли возникать напряжения в стыках труб при ударе водяной струи. Однако он сокращал перепад высот в сифоне и, следовательно, уменьшал статическое давление.

Даже там, где венгер хорошо сохранился (например, близ Бонана под Лионом), на его поверхности уже нельзя обнаружить следов когда-то проложенных по нему труб. Венгер в Бонане имеет ширину 7,35 м, значительно большую, чем необходимо для прокладки девяти труб диаметром 25 см – вероятно, для удобства строительства и обслуживания сифона.

Рис.6. Технология изготовления свинцовых труб, применявшаяся в Древнем Риме



После второго геникулуса трубы поднимались по противоположному склону ущелья, доставляя воду в приемный резервуар, а из него – в водопровод. Приемный резервуар устанавливался заметно ниже уровня напорного резервуара. Разность их уровней составляла так называемый гидравлический градиент.

Гидравлические потери в трубах существенно больше, чем в обычном прямоугольном канале, поэтому при устройстве сифона приходилось мириться с большей потерей высоты, чем при сооружении обычного моста-акведука. Гидравлический градиент сифона был примерно в 10 раз больше нормального уклона моста-акведука.

О разнообразии топографического характера местности, при котором римляне прибегали к устройству сифонов, можно судить по четырем сохранившимся водопроводам, снабжавшим водой город Лион (римский Лугдунум): это Монт-д'Ор, Жье, Крапонн и Бревенн. Даже относительно короткий водопровод с небольшим общим перепадом высот мог потребовать сооружения нескольких сифонов. Водопровод Монт-д'Ор при перепаде высот 90 м имел два сифона. Водопровод Жье имел равномерный и небольшой уклон, но при общем перепаде высот 110 м потребовал устройства 4 сифонов. Водопровод Крапонн имел крутой перепад в 420 м и всего лишь два сифона, причем один из них – гигантских размеров. Водопровод Бревенн проходил по ступенчатому профилю перемежающихся обрывов и плато. При общем перепаде высот в 350 м для него потребовалось соорудить лишь один сифон.

Водопровод Жье имел два больших сифона – близ Сусье и Бонана. Первый имел длину 1,2 км и глубину 93 м, второй – длину 2,6 км и глубину 123 м. По случайному совпадению перепад высот в каждом из них был 9 м. Это означает, что сифон у Сусье, как более короткий, имел больший гидравлический градиент. Водопровод Крапонн служит свидетельством когда-то существовавшего воистину огромного сифона длиной около 6 км, который опускался почти на 100 м ниже гидравлического градиента. Остатков этого сифона почти не сохранилось, и свидетельство о нем является в большей мере чисто топографическим: известно, что водопровод пересекал широкое и глубокое ущелье, слишком большое для сооружения моста, и, следовательно, там был использован сифон.

Общая длина девяти сифонов в лионской водопроводной системе достигает 16,6 км. Если каждый сифон состоял из девяти труб, то общая длина труб должна быть около 150 км. Для изготовления такого количества труб требовалось 12-15 тысяч тонн свинца, и очевидно, что добыча и транспортировка такого огромного количества свинца требовала гигантских усилий. Трубы работали под давлением, которое могло иногда достигать 12 атм. Несомненно, что в системе были течи, но она работала и перекрывала ущелья значительно большего размера, чем самые большие римские мосты-акведуки.

Сравнивая высоту сифонов и мостов-акведуков, можно видеть, что они не перекрывают друг друга и граница проходит на уровне 50 м. При большей глубине ущелья римляне сооружали не мост, а сифон. Можно поэтому заключить, что они отдавали предпочтение мостам-акведукам и обращались к сифону как к вспомогательному средству в тех случаях, когда их инженеры не могли построить мост нужной высоты.

Акведук в Сеговии, Испания



Акведук

(с лат. *Aquae ductus*) – в буквальном переводе «водопровод»; в более узком значении, как принято в русской технике, под словом акведук подразумевается мост, который служит не для проезда, а для пропуска воды. Такие мосты устраиваются в том случае, если воду ... приходится проводить через глубокие долины, овраги, улицы, дороги, над реками или другими водопроводами и каналами... Так как подобные сооружения являются необходимым устройством лишь в гористых и густонаселенных странах, чего Россия не представляет, то у нас подобных сооружений не встречается... В настоящее время при снабжении городов водою избегают устройства столь дорогостоящих сооружений, что стало возможно с введением подъемных и напорных паровых насосов, проводящих воду закрытыми трубами под земною поверхностью, чего в древние времена достигнуть было невозможно. Вот почему достопримечательные каменные водопроводные сооружения мы встречаем наиболее в глубокой древности, проведенными часто на значительной высоте. Так, напр., водопровод в Риме, устроенный еще при Августе, служит для соединения источника «*Caput aquae*» с большим водохранилищем «*Castellum*»; водопровод *Aqua Appia*, устроенный за 312 лет до Р. Х.; *Annio vetus* (273 до Р. Х.); *Marcia* (146 до Р. Х.); *Terula* (127 до Р. Х.); *Julia et Virgo* (во времена Августа) и другие. Водопроводы, относящиеся ко временам Калигулы (37-41 по Р. Х.) и Клавдия (41-54 п. Р. Х.), проведены на высоте 32 метров над *Aqua Claudia* и *Anio novus* на аркадах. Устройство их весьма прочно, так как в растворе для связи камней употреблялась местная порода гидравлического цемента пуцелана и сантуринская земля. В провинции Старой Испании в Сеговии имеется водопровод двухъярусный 33,7 м высотой, в Алькантаре над *Maio* 43,6 м высотой, расстояния между быками 31,1 м и 1,6 м толщина в конце свода; *Ehelvesa* (*Ehelves*) 16,2 м высоты, 8,75 м отверстие в пролете; в Мериде над Альбарегой трехъярусный акведук 24,8 м высоты; в Галии, в Метце акведук 22,7 метр. высотой и замечательный *Font du Gard* (*Nemausus*). Эта последняя постройка Римлян времен полководца Агриппы (63-13 до Р. Х.) отличается красотой архитектуры, водопроводный мост воздвигнут в три этажа, высотой 48,77 метр. Водопроводный мост в Константинополе, который императором Адрианом заложен и Феодосием возобновлен, равно как каменные водопроводы в Лионе и Париже – тоже остатки работ римлян. Водопроводы в Северной Африке, Греции, Малой Азии, тоже времен римской империи...

Брокгауз и Ефрон. Энциклопедический словарь. СПб, 1890

Так как римляне строили только сложные сифоны, то совершенно ясно, что более широкому применению сифонов препятствовали вовсе не технические трудности. Наиболее вероятная причина была высказана Норманом А. Ф. Смитом из Имперского колледжа науки и техники в Лондоне, который утверждает, что все дело было в экономике. Сифоны обходились римлянам дороже, чем мосты. Каменная кладка была дешевой, особенно если камень добывался на месте; дешевыми также были кирпич и известковый раствор. Дешевым был и свинец, который получали в избытке как побочный продукт рафинирования серебра. Проблема заключалась в транспортировке свинца: огромные затраты и тяжелый труд по доставке 15 тыс. т свинца в Лион, вероятно, послужили лучшим аргументом того, чтобы не повторять такой опыт чаще, чем это необходимо.

Древние римляне построили высокие арки моста Пондью-Гар не просто из любви к грандиозным сооружениям

(хотя они, безусловно, гордились его величием) и не потому, что их строителям не хватало знаний или они не могли делать прочные трубы. Решающим фактором была стоимость сооружения. Поэтому там, где проходили древнеримские водопроводы, кое-где встречаются остатки каменных арок на месте, где когда-то можно было восхищаться смелостью инженерной мысли – перекрывающим ущелье сифоном.

Литература

1. George F. W. Hauck. The Roman Aqueduct of Nimes. – *Scientific American*, 1989, No. 3.
2. A. Trevor Hodge. Siphons in Roman Aqueducts. – *Scientific American*, 1985, No. 6