

Описание камнепадов и инженерная защита от них: обзор. Часть 4



Фото на заставке:

<https://pixabay.com/ru/images/search/Португалия,%20Горная%20дорога,%20Дорога/>

Продолжаем публиковать немного сокращенный адаптированный перевод статьи «Описание камнепадов и инженерная защита от них: обзор» [1], написанной группой ученых из Швейцарии, Италии и Франции. Эта большая работа была опубликована в 2011 году в рецензируемом международном интернет-журнале NHESS (Natural Hazards and Earth System Sciences – «Природные опасности и науки о Земле»), издаваемом под эгидой Европейского союза специалистов в области наук о Земле (EGU – European Geosciences Union).

Указанная статья находится в открытом доступе в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution 3.0 (CC BY 3.0), поэтому ее можно использовать в некоммерческих и коммерческих целях, переводить или изменять при условии ссылки на первоисточник и указания типа изменений.

Сегодня представляем четвертую часть переведенной работы, посвященную таким мерам защиты от камнепадов, как земляные дамбы, траншеи и

противокампанепадные галереи. Отметим, что нумерация рисунков, и формул соответствует таковой в оригинальной статье.

Консультационную помощь редакции при подготовке перевода оказали специалисты российского представительства компании Trumer Shutzbauten, разрабатывающей и производящей одни из наиболее надежных в мире систем инженерной защиты от опасных геологических процессов, в том числе от камнепадов.

ФОЛЬКВАЙН АКСЕЛЬ (VOLKWEIN AXEL)

Швейцарский федеральный институт лесных, снежных и ландшафтных исследований, г. Бирменсдорф, Швейцария, volkwein@wsl.ch

ШЕЛЛЕНБЕРГ КРИСТИАН (SCHELLENBERG KRISTIAN)

Компания Gruner+Wepf Ingenieure AG, г. Цюрих, Швейцария

ЛАБИУЗ ВИНСЕНТ (LABIOUSE VINCENT)

Лаборатория механики горных пород Швейцарского федерального технологического института Лозанны, г. Лозанна, Швейцария

АЛЪЯРДИ ФЕДЕРИКО (AGLIARDI FEDERICO)

Кафедра геологических наук и геотехнологий Миланского университета Бикокка, г. Милан, Италия

БЕРГЕР ФРЕДЕРИК (BERGER FREDERIC)

Отдел исследований горных экосистем и ландшафтов Национального исследовательского института в сферах наук и технологий по охране окружающей среды и сельскому хозяйству (IRSTEA, ранее Cemagref), г. Сен-Мартен-д'Эр, Франция

БУРЬЕ ФРАНК (BOURRIER FRANCK)

Группа исследований горных экосистем Национального исследовательского института в сферах наук и технологий по окружающей среде и сельскому хозяйству (IRSTEA, ранее Cemagref), г. Сен-Мартен-д'Эр, Франция

ДОРРЕН ЛУУК (DORREN LUUK)

Отдел оползней, лавин и защиты лесов Федерального управления по окружающей среде, г. Берн, Швейцария

ГЕРБЕР ВЕРНЕР (GERBER WERNER)

Швейцарский федеральный институт лесных, снежных и ландшафтных исследований, г. Бирменсдорф, Швейцария

ЖАБОЕДОФФ МИШЕЛЬ (JABOYEDOFF MICHEL)

Институт геоинформатики и анализа рисков Лозаннского университета, г. Лозанна, Швейцария

ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА ОТ КАМНЕПАДОВ

Если в зоне, подверженной опасности камнепадов, находятся жилые дома, общественные здания, дороги или другие объекты инфраструктуры, то необходимы соответствующие меры их инженерной защиты, обзор которых и приводится в этой части.

Воздействие камнепадов на защитные сооружения

Долгое время оценки ударных нагрузок, вызванных камнепадами, основывались только на эмпирических зависимостях, полученных по результатам экспериментальных наблюдений. Затем с помощью теоретических соображений, принимающих поведение грунта упругим, пластическим или упругопластическим, были разработаны другие формулы. В первом семействе зависимостей, полученных в рамках теории упругого контактного взаимодействия Герца, принимается, что жесткий шар воздействует на упругую среду (Goldsmith, 1960; Japan Road Association, 1983; Lang, 1974; Tonello, 1988). Другие уравнения основаны на пластическом или упругопластическом поведении грунта (Azimi, Desvarreux, 1988; Habib, 1976; Heierli, 1984; Lang, 1974; Tonello, 1988). Незадолго до публикации настоящей работы были получены формулы на основе проникновения недеформируемых остроносых снарядов в бетонные и грунтовые материалы (Pichler et al., 2005). Примерно в последнее десятилетие перед выходом данной статьи много усилий было посвящено численному моделированию воздействий на противокаменные сооружения с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и метода дискретных элементов (МДЭ) (Bertrand et al., 2006; Calvetti, 1998; Calvetti et al., 2005; Magnier, Donze, 1998; Masuya, Kajikawa, 1991; Nakata et al., 1997; Nicot et al., 2007; Peila et al., 2002, 2007; Plassiard et al., 2004). Весьма перспективным для изучения таких проблем представляется МДЭ при условии, что сначала будет выполнена тщательная калибровка параметров.

Для сбора данных по воздействию камнепадов на защитные сооружения, а затем для калибровки параметров необходимы экспериментальные исследования. Для определения демпфирующей способности подушек на крышах противокаменных галерей, необходимого для дальнейшего проектирования, был проведен ряд полномасштабных и полумасштабных экспериментов. При их выполнении на бетонные плиты, покрытые различными поглощающими энергию ударов материалами, с разной высоты сбрасывали бетонные элементы, различающиеся по весу и по форме (Calvetti et al., 2005; Chikatamarla, 2006; Labiouse et al., 1996; Montani-Stoffel, 1998; Murata, Shibuya, 1997; Sato et al., 1996; Schellenberg et al., 2008; Yoshida et al., 1988). Другие серии аналогичных опытов проводились на слоях гравия (Pichler et al., 2005), земляных дамбах (Blovsky, 2002; Burroughs et al., 1993; Lepert, Corte, 1988; Peila et al., 2002; Yoshida, 1999) и композитных конструкциях (Lambert et al., 2009; Lorentz et al., 2006).

Параметрический анализ, выполненный на основе этих экспериментов, позволил определить наиболее важные факторы и количественно оценить их влияние на силу удара. Они связаны с падающим железобетонным элементом (его массой, формой) и его кинематикой (скоростью и углом удара), а также со слоем поглощающего силу ударов материала (его толщиной, степенью уплотнения). При этом именно для противокаменных галерей было установлено, что ударное воздействие на основную конструкцию также зависит от ее жесткости.

Большинство вышеупомянутых исследований дало количественные данные:

- по эволюции силы удара бетонного элемента во времени (а именно значения ускорений, измеренные установленными в падающем железобетонном снаряде акселерометрами и/или с помощью определения изменений скорости во времени по видеозаписям, сделанным высокоскоростными камерами);
- по проникновению снаряда в поглощающий энергию удара материал;
- в некоторых случаях по давлению на поверхность под подошвой амортизирующего слоя (то есть на основную конструкцию).

Собранные данные позволили получить информацию о передаче энергии во время удара и о силе, действующей на конструкцию. В результате были выведены формулы для оценки сил в целях усовершенствования проектов защитных сооружений (SBB, 1998 и др.). Однако эти результаты и формулы надо интерпретировать с осторожностью, поскольку толщина поглощающей энергию удара подушки и граничные условия сильно влияют на динамику взаимодействия (Calvetti, 1998; Montani-Stoffel, 1998).

Численное моделирование ударных воздействий при тщательной калибровке на основе экспериментальных данных может помочь лучше понять и количественно оценить потери кинетической энергии камнем за счет поглощающей силу удара подушки. Это также может поспособствовать оценке влияния различных параметров, которые не могли быть изучены во время экспериментов (или были изучены только в ограниченном диапазоне значений), и усовершенствованию проектов защитных сооружений.

Земляные дамбы и траншеи

Создание земляных дамб и траншей относится к квазиестественным противокаменпадным мерам. Они являются одними из самых эффективных, поэтому должны с большей вероятностью использоваться для защиты постоянных зданий. Земляные дамбы способны выдерживать высокие энергии удара, например 20 МДж, как показывает практика. Однако значительные поперечные сечения дамб и траншей требуют наличия довольно большой площади перед охраняемым объектом.

Если эффективность работы таких противокаменпадных систем, как барьеры или галереи, достаточно хорошо известна, то для обеспечения надежности земляных дамб необходимо ответить на следующие вопросы.

- Какова ударная нагрузка в зависимости от энергии удара?
- Каково влияние изменения массы или скорости удара?
- Каково предельное состояние дамбы?
- Каковы эффекты таких свойств грунта дамбы, как плотность, прочность, угол внутреннего трения?
- Какова глубина проникновения падающих камней в дамбу?
- Как поперечное сечение дамбы (или траншеи) влияет на взаимодействие с камнем?

Например, принимающая удар поверхность может быть (по крайней мере частично) вертикальной. Тогда ударившийся об это место камень развернется для движения по вертикальной траектории, но не перекатится через дамбу (или не выкатится из траншеи). Известно несколько практических случаев, когда противокаменпадная дамба

выполняла свою задачу даже при угле наклона ее стенки с нагорной стороны, равном углу внутреннего трения строительного материала этого сооружения. Поэтому геометрия грунтовой дамбы должна учитывать местные геометрические границы. Она также может сильно зависеть от наличия на ее нагорной стороне зоны, задерживающей камнепады (например, участка покрытого демпфирующим слоем, который способствует диссипации энергии и уменьшению высоты отскока камней), а также от размеров этой зоны. Даже довольно низкая наклонная сторона дамбы с нагорной стороны, покрытая демпфирующим слоем (созданным с учетом угла внутреннего трения), не позволит катящемуся камню преодолеть защитное сооружение, поскольку демпфирующий материал среагирует на разрушение грунта, как только камень создаст силы сдвига на откосе дамбы. Поэтому следует еще раз подчеркнуть, что при проектировании геометрии грунтовой дамбы (особенно наклона ее нагорной стороны) следует учитывать геометрию склона, на котором или под которым будет производиться строительство. В идеале плоскость нагорной стороны дамбы должна быть перпендикулярна поверхности склона.

Процессы замедления движения камней грунтом (замедлением называется ускорение, то есть скорость изменения скорости, противоположное направлению движения и замедляющее это движение. – *Ред.*) были экспериментально изучены в малом (Heidenreich, 2004), большом (Labieuse et al., 1996; Montani-Stoffel, 1998) и полном (Gerber, 2008) масштабах. Основными результатами были максимальное замедление и проникновение железобетонных снарядов в грунт (затем динамическое тормозящее усилие обычно преобразуется в эквивалентное статическое усилие). Эти результаты важны для проектирования противокаменпадных галерей, а именно для расчетов толщины грунтовой подушки и прочности нижележащих конструкций (Labieuse et al., 1996; ASTRA, 2008; Schellenberg et al., 2008).

Был проведен ряд экспериментов (Montani-Stoffel, 1998; Gerber, 2008; Pichler et al., 2005) для количественной оценки сил, действующих на горизонтальную жесткую бетонную плиту, покрытую различными демпфирующими слоями, при вертикальном свободном падении на нее железобетонного снаряда. В отличие от этих экспериментов, воздействия падающих со склона камней на защитные земляные дамбы (обычно построенные из уплотненных грунтов и не имеющие жестких слоев) скорее всего будут разными в зависимости от поведения испытываемых сооружений.

Было также выполнено несколько экспериментов с дамбами, построенными исключительно из грунтовых материалов, в реальных масштабах (Peila et al., 2002, 2007) или на моделях земляных дамб, усиленных георешетками (Blovsky, 2002). Был сделан вывод, что для надежного описания поведения грунтовых дамб с усилением георешетками и без него необходимы дальнейшие испытания.

Были измерены (Gerber, 2008) воздействия на слой грунта разной толщины при свободном падении на него с высоты 2–15 м железобетонных снарядов массой 800 и 4 000 кг, что приводило к энергии удара от 20 до 600 кДж. На основе этих экспериментов были предложены следующие формулы для максимального замедления a и глубины проникновения снаряда в грунт p при скорости удара v :

$$a = 0,8v^2 / (gt); \quad (9)$$

$$p = 0,8v^2 / a. \quad (10)$$

Таким образом, зависимость между глубиной проникновения и максимальным замедлением может быть сформулирована как функция толщины слоя грунта (рис. 10). Однако формулы (9) и (10) были получены на основе экспериментов и параметров, измеренных после ударов вертикально упавших твердых тел о демпфирующие слои, покрывавшие жесткие конструкции. Следовательно, полученные результаты не могут быть легко перенесены на земляные дамбы, которые при ударах с нагорной стороны испытывают упругопластические деформации в направлении подгорной стороны. Кроме того, в полевых условиях трудно измерить параметры p и a , не имея нужных данных о поведении камня при ударе о поверхность дамбы. Таким образом, данные испытаний на вертикальное падение железобетонных снарядов на демпфирующий слой, покрывающий жесткую поверхность, не обязательно отражают нагрузку, испытываемую дамбой при воздействии камнепада, но все же могут использоваться до тех пор, пока не будут получены более хорошие результаты.

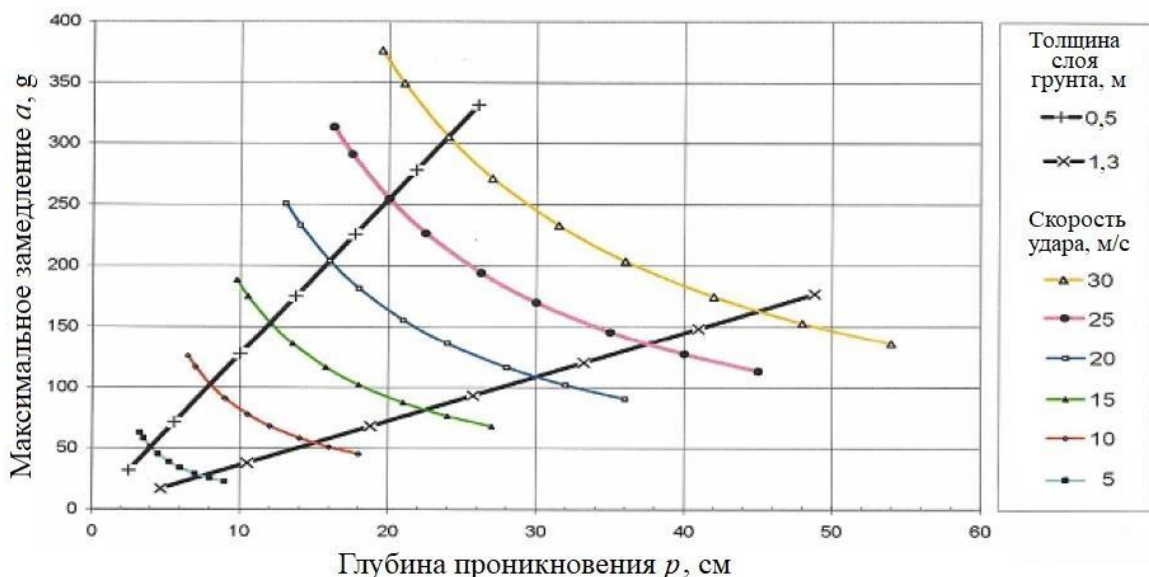


Рис. 10. Замедление камня и глубина его проникновения в уплотненный грунт разной толщины при ударах с разной скоростью

Для оптимизации размеров земляных дамб необходимы дальнейшие полномасштабные испытания их конструкций. Кое-что в этом направлении уже делается. Так, было описано поведение укрепленных грунтовых дамб с шириной основания 5 м и высотой около 4,5 м (Peila et al., 2002, 2007). Глубина проникновения в них железобетонных снарядов составляла 0,6–1,1 м при энергии удара от 2 400 до 4 200 кДж. Авторам настоящей статьи также известны, например, обзор методов проектирования земляных дамб (Lambert, Bourrier, 2011) и пример проектирования противокамнепадной грунтовой дамбы (Baumann, 2008).

Противокамнепадные галереи

Существует множество различных типов проектов галерей для защиты от камнепадов (рис. 11). Например, в Швейцарии наиболее широко распространены монолитные

железобетонные конструкции галерей, покрытые амортизирующим слоем (Schellenberg, Vogel, 2005).

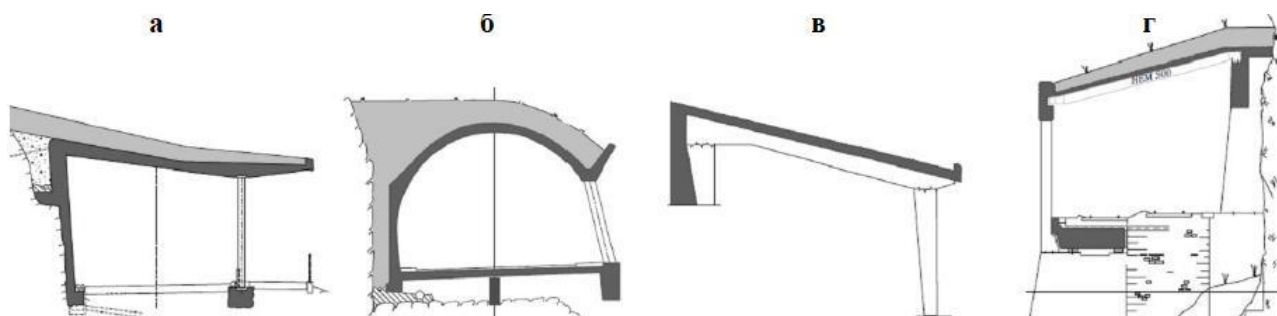


Рис. 11. Различные типы конструкций противокаменных галерей (жесткие основные конструкции показаны черным цветом, амортизирующий материал – серым): а – железобетонная плита; б – железобетонная арка; в – монолитная железобетонная конструкция; г – композитная конструкция из стали и железобетона (Vogel et al., 2009)

Противокаменные галереи являются подходящими защитными мерами для небольших и четко определенных зон, подверженных частым камнепадам средней величины (Jasquetoud, 1999). Галерея может быть решением для защиты от частых низкоэнергетических событий с низкими затратами на техническое обслуживание (удаление скопившихся на крыше камней через определенные промежутки времени), хотя она может обеспечить защиту и от высокоэнергетических ударов.

Рабочий диапазон энергий ударов для противокаменных галерей, по оценкам, составляет до 3 000 кДж (ASTRA, 2003). Однако, основываясь на работах, опубликованных незадолго до выхода настоящей статьи, в которых основное внимание уделялось либо улучшению демпфирующих свойств подушечного слоя, увеличивающего пределы применимости всего сооружения, либо добавлению рассеивающих энергию опор, можно сделать вывод, что галереи могут обеспечить защиту от ударов до 5 000 кДж (Vogel et al., 2009).

В Японии была оценена эффективность композитных конструкций галерей из стали и железобетона (рис. 12, Maegawa et al., 2003) и композитных многослойных конструкций с высокопрочными болтовыми соединениями (рис. 13, Konno et al., 2008). Они вполне могут применяться в будущем в конкретных условиях.



Рис. 12. Полномасштабный эксперимент с падением железобетонного снаряда на композитный сталежелезобетонный противокаменепадный навес (Maegawa et al., 2003) (а) и противокаменепадная галерея с рассеивающей энергию воздействий системой опор в альпийском курортном регионе Валь д'Арли во Франции (Masuya, 2007) (б)

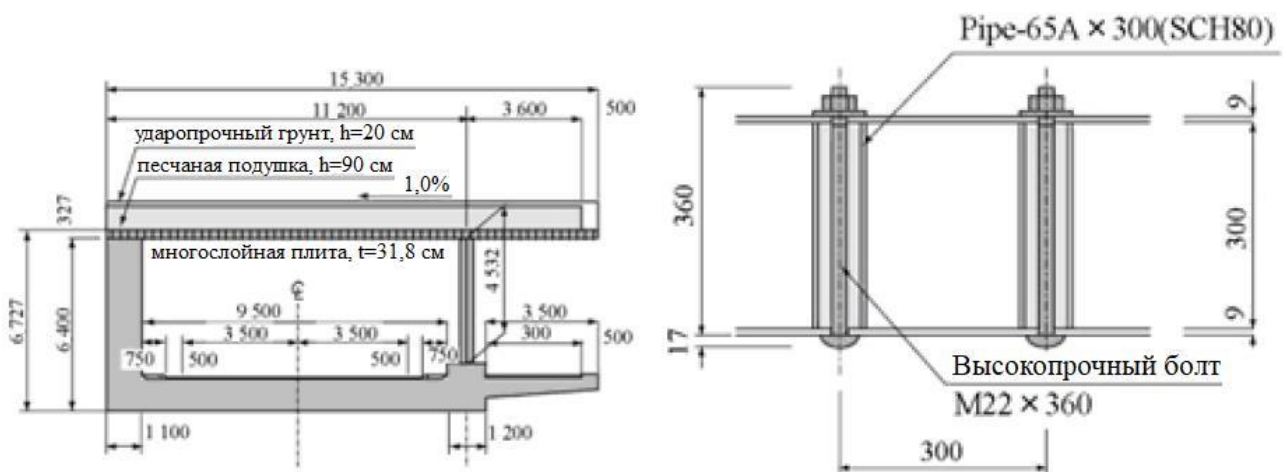


Рис. 13. Композитная сталежелезобетонная конструкция противокаменепадной галереи (Konno et al., 2008)

Подушечный слой

Основная функция подушечного слоя – амортизирующая (Jasquetoud, 1999). Если бы его не было, то волны от ударов о железобетонные конструкции могли бы привести к их повреждению (даже удар меньшей интенсивности, чем несущая способность конструкции, мог бы вызвать отслоение бетона на потолке галереи (Herrmann, 2002).

Подушечный слой также вызывает диссипацию части энергии удара, распределяет контактные напряжения, уменьшает пиковую нагрузку на основную защитную конструкцию, хотя при этом увеличивает длительность воздействия. По экономическим соображениям для создания подушки часто используется доступный местный

гранулированный материал, в то время как, например, в Японии обычно применяется песок (Ishikawa, 1999).

Динамическая сила P_{\max} , приложенная к верхней части подушечного слоя при падении на него камня, определяется следующим эмпирическим уравнением (Montani-Stoffel, 1998):

$$P_{\max} = 1,765 \times r^{0,2} \times M_E^{0,4} \times \left(\frac{m \times v^2}{2} \right)^{0,6} . \quad (11)$$

То есть сила удара P_{\max} зависит от модуля реакции подушечного слоя M_E (который получают на основе стандартизированных испытаний и обычно используют для проектирования дорожных покрытий, $M_E = 4E/(\pi(1-v^2))$. – *Ред.*), а также от радиуса камня r и его кинетической энергии, выраженной через его массу m и скорость удара v .

Однако для целей проектирования защитной конструкции требуется информация о силах, передаваемых через границу раздела между амортизирующим слоем и жесткой конструкцией. Представляют интерес определения величины и площади нагружения. И то, и другое, конечно, меняется во времени в процессе удара и зависит от свойств материала подушки.

Путем экспериментальных исследований было установлено, что передаваемое жесткой конструкции усилие меньше силы удара о песчаный подушечный слой в 1,8 раза (Kishi et al., 1993), а в случае специальной трехслойной подушечной системы оно меньше в 2 раза (Ishikawa, 1999).

Передаваемое через подушку усилие (нагрузка, действующая на жесткую конструкцию) может быть определено численно. Для оценки распределения напряжений при относительно небольших ударных нагрузках использовался упрощенный метод, принимающий распространение одномерной волны напряжений и упругопластические свойства грунта, с применением обычной конечноэлементной программы (Sonoda, 1999).

Незадолго до написания настоящей статьи для моделирования противокаменных галерей целиком, включая амортизирующий слой, использовались усовершенствованные конечноэлементные модели (например, в программе LS-DYNA), и полученные данные вполне могли соответствовать результатам крупномасштабных испытаний (Kishi et al., 2009). В том числе для подушечного слоя использовалась модель упрочнения при сжатии (*cap-hardening model*), в которой параметры определяются путем подгонки кривой с использованием экспериментальных данных (Ghadimi-Khasraghy et al., 2009).

Результаты численного моделирования воздействий камнепадов на земляные дамбы с помощью метода дискретных элементов (МДЭ) (Plassiard, Donze, 2009) потенциально могут использоваться и для усовершенствования проектов противокаменных галерей. Процессы, происходящие в амортизирующем слое, также было предложено моделировать с использованием реологической модели (Calvetti, Di Prisco, 2009) или с помощью упрощенной нелинейной «пружины», описывающей общую взаимосвязь между силой удара и проникновением камня в подушечный слой (Schellenberg, 2009).

Правильный выбор материала подушки может значительно увеличить эффективность работы противокаменной галереи. При изучении диссипации энергии различными материалами и их смесями с помощью испытаний на центрифуге было выявлено, что смесь песчаных и резиновых частиц (70:30%) с комками глины, по-видимому, вполне подходит для создания эффективного амортизирующего слоя (Chikatamarla, 2006).

Полномасштабные испытания в Японии показали, что сила удара может быть существенно снижена также с помощью системы TLAS (Three-Layered Absorbing System – «трехслойной поглощающей энергию удара системы»), которая состоит из слоя вспененного полистирола (EPS – Expanded PolyStyrol), железобетонной плиты и слоя песка (Nakano et al., 1995). Крупномасштабное испытание в Швейцарии с использованием в качестве подушечного материала пеностекла также дало многообещающие результаты (Schellenberg et al., 2007; рис. 14, а). Была также исследована амортизирующая способность многослойных конструкций, состоящих из двух или трех слоев железобетона, разделенных шинами (Lorentz et al., 2008; рис. 14, б).

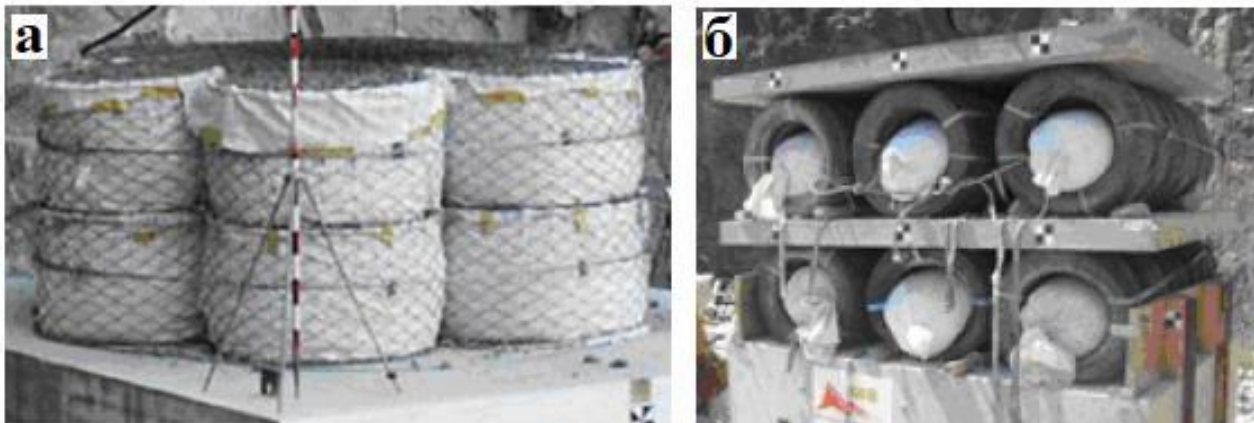


Рис. 14. Альтернативные амортизирующие конструкции: а – серия коробчатых конструкций типа габионов, заполненных пеностеклом (Schellenberg, 2008); б – многослойная амортизирующая конструкция типа «сэндвич» из железобетонных плит и шин (Lorentz et al., 2008)

Другим подходом к рассеиванию энергии является система PSD (Pare-blocs Structurellement Dissipantes – «конструктивно рассеивающая защита от камнепадов») без подушечного слоя, предложенная во Франции и показанная на рисунке 12, б. Жесткая плита подвергается непосредственному удару, но в ее опоры вмонтированы энергопоглощающие устройства (Tonello, 2001). Опубликованы результаты тестирования такой конструкции по шкале 1/3 (Berthet-Rambaud, 2004).

Оценка поведения противокамнепадных галерей при ударах

Незадолго до написания настоящей статьи были опубликованы рекомендации по проектированию противокамнепадных галерей в Швейцарии и Японии (ASTRA, 2008; Japan Road Association, 2000). В соответствии с ними должна применяться статическая эквивалентная сила, которая в основном зависит не только от массы и скорости падающего камня, но и от геотехнических условий амортизирующего слоя. Использование этого подхода является простым для практикующих инженеров, но имеет трудности, связанные с учетом сложных динамических процессов во время удара. На этот счет имеются публикации с кратким изложением более старых формул для силы удара (Montani-Stoffel, 1998) и со сравнением различных методов расчетов (Casanovas, 2006).

На основе системы со многими степенями свободы (SMDF – System with Multiple Degrees of Freedom) для ударных нагрузок (Comite-Euro-International du Beton, 1988) была предложена новая аналитическая модель для проектирования противокамнепадных галерей, которая позволяет прогнозировать разрушения как при сдвиге, так и при изгибе (Schellenberg et al., 2008, рис. 15).

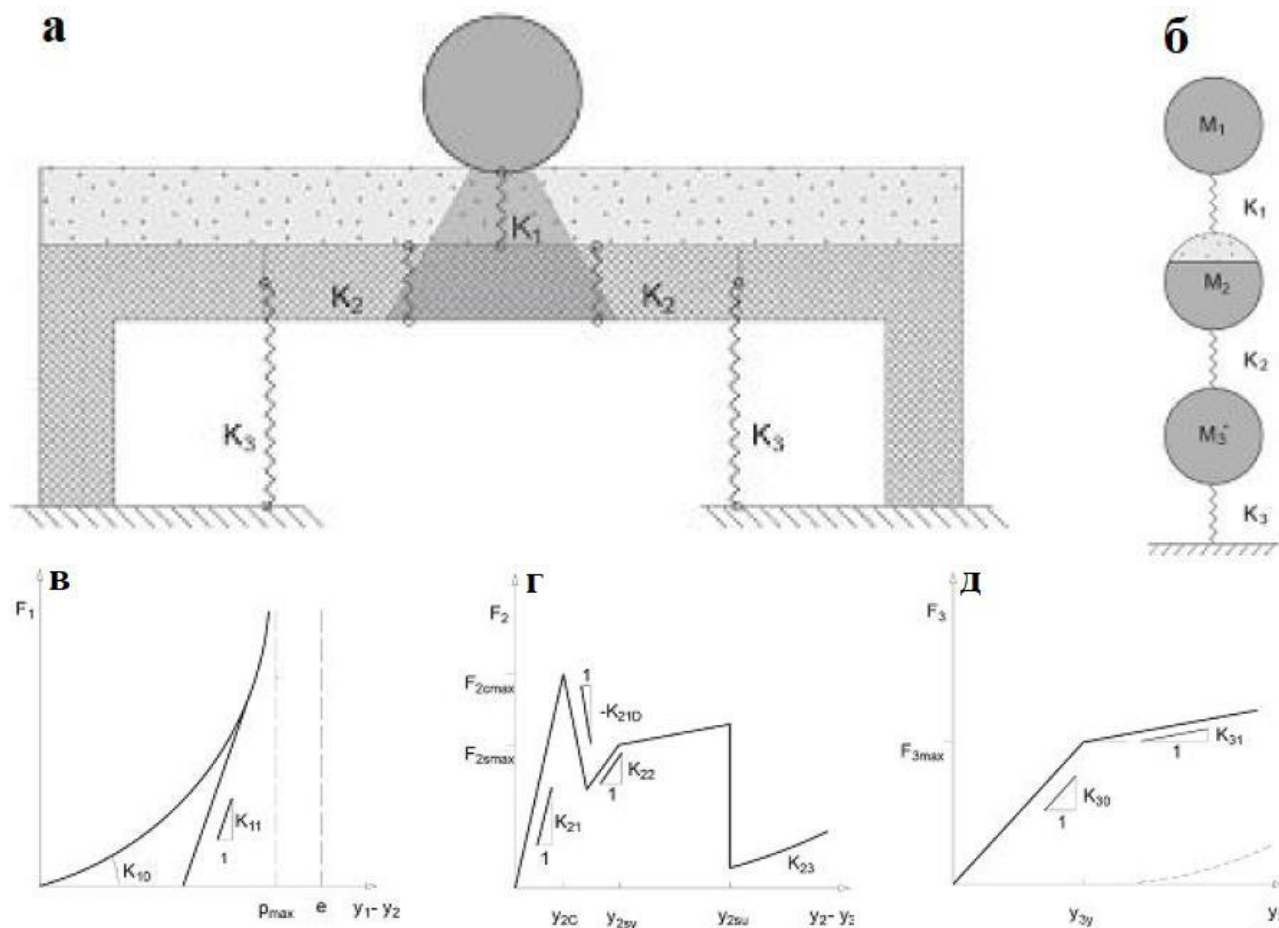


Рис. 15. Система со многими степенями свободы: от сечения противокамнепадной галереи до определения модели вместе с соотношением «сила – смещение пружин» (а, б) для амортизирующего слоя (в); поведения при сдвиге (г); общей жесткости на изгиб (д) (Schellenberg, Vogel, 2009)

Изменения усилий в пружине во времени выводятся из уравнений движения с заданными массами и свойствами пружин. Пиковые нагрузки являются результатами, основанными на показателях эффективности, и могут быть сопоставимы с сопротивлением в критических сечениях плиты.

С помощью этой модели были получены значения соотношений между максимальными усилиями и несущей способностью при продавливании (η_2) и при разрушении при изгибе (η_3), что привело к необходимости использования итерационного процесса для проектирования сооружения. Указанная процедура особенно хорошо подходит для оценки существующих противокамнепадных галерей. На рисунке 16 показаны значения указанных соотношений, достигнутые при падении с разной высоты

железобетонных блоков разной массы на галерею Аксен-Сюд в Швейцарии. Будущие оценки зависимостей «сила удара – проникновение камня в подушечный слой» могут улучшить эту модель.

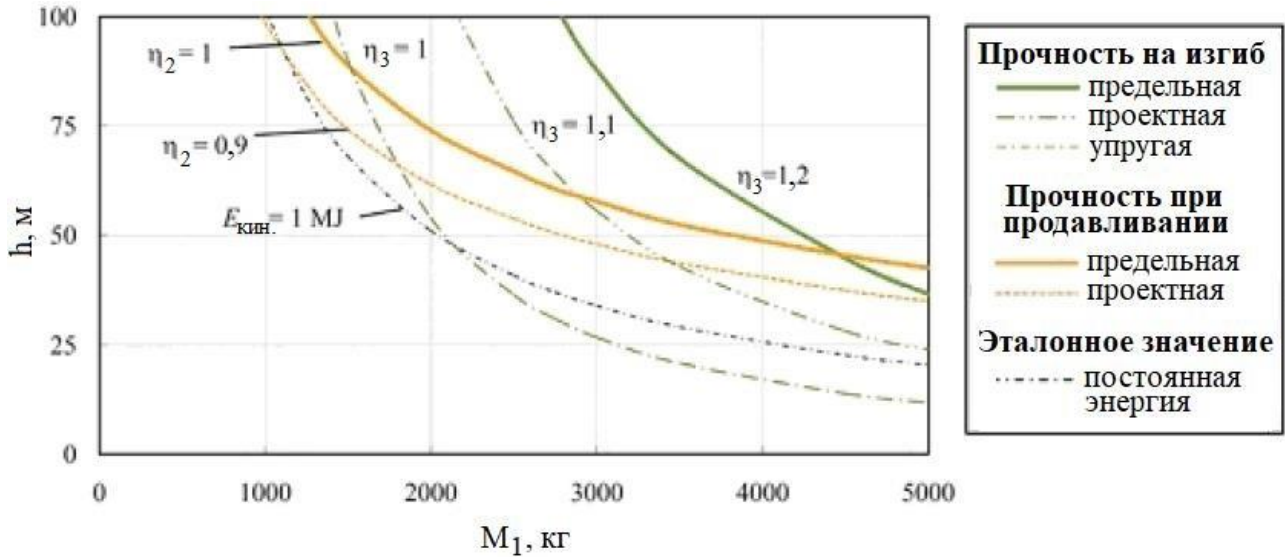


Рис. 16. Несущая способность противокамнепадной галереи Аксен-Сюд в Швейцарии при ударах железобетонных блоков разных масс (Schellenberg, 2009)

В последние годы перед публикацией настоящей статьи были достигнуты значительные успехи в области численного моделирования, которые призваны облегчить проектирование строительных конструкций (Kishi et al., 2009; Masuya, Nakata, 2001). Численное моделирование позволяет детально оценить конструкцию и ее реакцию на воздействие камнепада (рис. 17). Однако этот подход требует наличия экспериментальных данных для калибровки и значительных ресурсов, что ограничивает его применение на практике. Тем не менее такие усилия полезны для разработки руководств по проектированию и для оценки критических сечений и влияния параметров.

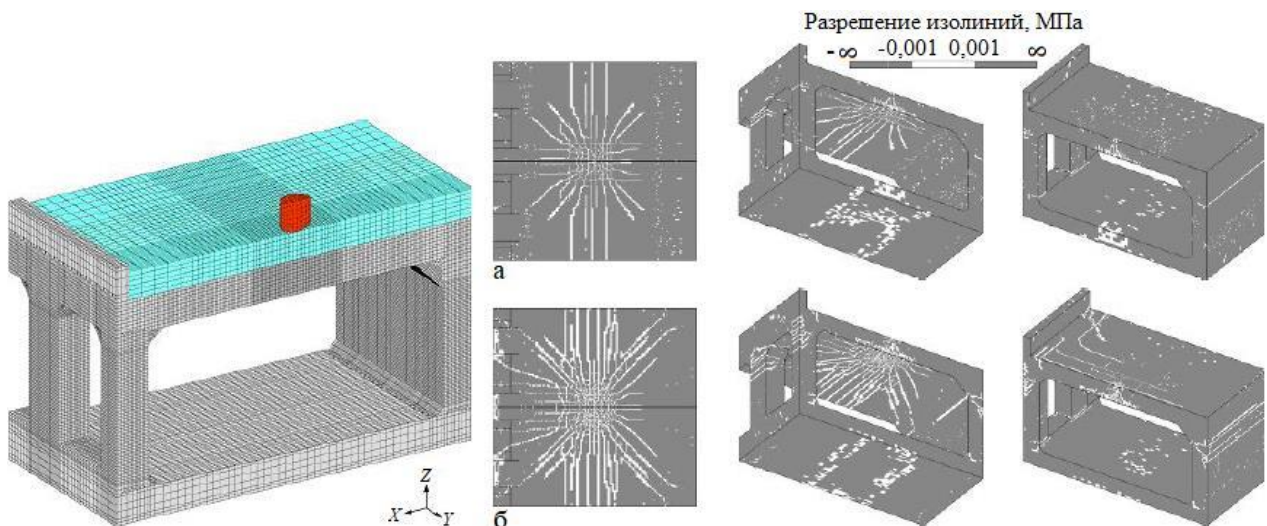


Рис. 17. Общий вид модели для конечноэлементного анализа поведения противокаменной галереи при ударе железобетонным блоком и полученные формы трещинообразования для различных случаев нагружения (Kishi et al., 2009)

Несмотря на успехи в понимании поведения противокаменных галерей при ударах, все еще существуют большие неопределенности в отношении описания проектных (расчетных) ситуаций. Поэтому привлекательными инструментами являются вероятностные методы, с помощью которых можно лучше количественно оценить неопределенности. Кроме того, будущие разработки в областях проектирования новых противокаменных галерей или анализа эффективности существующих сооружений могут включать оценки вероятности возникновения нарушений в разных случаях и выбор проектных ситуаций на основе общих критериев допустимого риска.

В следующей части статьи, которая будет опубликована через неделю, речь пойдет о таких мерах защиты от камнепадов, как гибкие противокаменные системы и леса.

Список литературы, использованной авторами переведенного обзора [1], можно посмотреть в конце оригинальной статьи по ссылке nhess.copernicus.org/articles/11/2617/2011/nhess-11-2617-2011.pdf.

Источник для перевода

1. Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L. K. A., Gerber W., Jaboyedoff M. Rockfall characterisation and structural protection – a review // Natural Hazards and Earth System Sciences. European Geosciences Union, Copernicus Publications, 2011. Vol. 11. P. 2617–2651. URL: nhess.copernicus.org/articles/11/2617/2011/.