



В. О. БУЦЕНКО,
ведущий инженер ОАО
«Минскметропроект»

ОГНЕСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ТОННЕЛЯ

Тоннели относятся к сооружениям с повышенным уровнем ответственности. Их выход из строя может привести к тяжелым экономическим и экологическим последствиям. Опыт эксплуатации автодорожных тоннелей, особенно расположенных в пределах города, указывает на высокую вероятность аварий и дорожно-транспортных происшествий, сопровождающихся пожарами.

Что происходит в тоннеле во время пожара

Вероятность пожара на транспортном средстве считается наиболее опасной из всех видов опасности в тоннеле. По данным статистических исследований, ДТП в тоннелях в 1,4 раза чаще приводят к пожарам, чем на скоростном шоссе. Например, в Гамбурге в тоннеле, проложенном под Эльбой, пожары происходят в среднем ежемесячно.

Чрезвычайные ситуации сопровождаются выделением газозводушных смесей, быстрой потерей видимости на путях эвакуации вследствие их задымления. Это препятствует эвакуации людей и автотранспортных средств, а также эффективной работе специальных подразделений, приводит к гибели людей, прекращению функционирования тоннелей на длительный срок.

Повышенная пожарная опасность городских автодорожных тоннелей среди прочего

обусловливается сложностью развертывания сил и средств пожарных подразделений, в том числе связанной с возникновением пробок в автодорожных тоннелях и на подъездах к ним, а также ограничениями объемно-планировочного характера, связанными с размещением в автодорожных тоннелях противопожарного оборудования.

Приведем несколько примеров, чтобы было понятно, что такое пожар в тоннеле, поскольку что он очень сильно отличается от пожара в наземном сооружении.

В Австрийских Альпах под горой Тауэрн проходит один из самых новых тоннелей — Тауэрнтоннель, открытый 21 июня 1995 года.

В тоннеле в мае 1999 года перед красным сигналом светофора стояло несколько машин, среди них грузовики с разными товарами, в том числе лаками и аэрозольными баллончиками. За последним грузовиком ожидали зеленый свет четыре легковых автомобиля.

Грузовик с прицепом не успел вовремя затормозить и с ходу врезался в стоящий «хвост». Две из четырех легковушек оказались так сплюснены между стоящим и наехавшим грузовиками, что их еще несколько дней считали одним автомобилем... Две другие машины грузовик раздавил о стенку тоннеля.

Вытек бензин, вспыхнул пожар. Люди в панике бросились бежать в направлении выхода. Некоторые хватали свой багаж и отбрасывали его в сторону, закрывая путь бежавшим. Кто-то пытался развернуть машину, чтобы на ней вырваться из этого ада. В одном из грузовиков перевозили коров, и обезумевшие животные с диким ревом рвались из кузова. А навстречу огню уже шла колонна с другого конца участка, где горел «зеленый»...

Пожар распространялся с огромной скоростью. Температура достигла 1200°C. Подобно ракетам, разлетались на сотню метров баллончики-распылители, похожие на огненные шары. Позднее их находили даже в вентиляционных каналах. Лопающиеся шины, вопли о помощи, громкое мычание коров — сущий ад!

Пожарники оказались в крайне сложном положении: отрезок между очагом пожара и северным порталом напоминал камин, через который рвались газы, расплавились части тоннеля, сделанные из пластика, бушевало море огня.

Лишь после 161 часа (!) непрерывной борьбы стихия была побеждена. 12 человек погибли, сгорело 40 автомобилей — 24 легковых и 16 грузовых.

Тоннель Монблан, протяженностью 11,6 км, открыли 35 лет назад. Он стал одним из важнейших путей европейского транспортно-



Внутренний вид автодорожного тоннеля



Пожар в тоннеле

го коридора «Север — Юг». Ширина сооружения — 8,6 м, проезжая часть — 7 м, по бокам — пути для эвакуации шириной 0,8 м.

В 6,2 км от въезда в тоннель загорелся грузовой автомобиль, груженный маргарином и мукой. Сразу сработал датчик, который приказал задымление. По его сигналу перекрыли движение. Уже через шесть минут пожарные подразделения выехали на место. Но из-за плотной стены копоти и дыма они смогли остановиться не ближе чем в километре (!) от источника огня.

Пожар длился 50 часов — более двух суток! Погиб 41 человек, среди них — один пожарник, сгорело 36 автомобилей, в том числе два пожарных. Сильно пострадали подземные сооружения, бетонные своды на протяжении почти километра были покрыты глубокими трещинами. После пожара тоннель закрыли и долго восстанавливали.

Тоннель-рекордсмен под Ла-Маншем тянется на 50,5 км, соединяя Францию и Англию. На глубине 45 м ниже морского дна можно за три часа добраться от Лондона до Парижа.



Сооружение конструкций тоннеля

Поезда идут по двум однопутным тоннелям диаметром 7,6 м каждый. Их пересекает тоннель обеспечения эксплуатации диаметром 4,8 м. Там могут передвигаться со скоростью до 80 км/ч специальные пожарные автомобили. В тоннеле их 24. Развернуться там негде, поэтому у пожарных автомобилей две кабины — водитель может перейти в хвост прямо внутри вагонообразного кузова.

18 ноября 1996 года в 16 км от Франции в грузовом автомобиле, который перевозился поездом, начался пожар. Вспыхнувший огонь охватил четыре хвостовых вагона. Машинист остановил поезд и начал эвакуацию пассажиров. Люди передвигались ползком, закрывая рот платками. 36 человек серьезно пострадали. К счастью, никто не погиб. Борьбу с огнем вели 70 пожарных, которые, работая в противогазах, через каждые 10 минут сменяли друг друга из-за высокой температуры. Лишь в середине следующего дня пожар был ликвидирован.

Известно несколько случаев, когда пожары в тоннелях охватывали более 100 автомобилей (тоннель Холланд, США, 1949 год; тоннель Мурфлит, ФРГ, 1969 год; тоннель Ниходзака, Япония, 1969 год; Кальдекотский тоннель, США, 1989 год). В одном только Эльбском тоннеле в Гамбурге за 13 лет эксплуатации произошло 36 пожаров с «участием» грузовых автомобилей.

В 1949 году в тоннеле Холланд (США) возник пожар в кузове грузовика, перевозившего сероуглерод. Горение было столь интенсивным, что в результате воспламенились автомобили, находившиеся на расстоянии до 100 м от аварийной машины. Высокая температура, плотный и токсичный дым затрудняли работу пожарных подразделений. Людям удалось эвакуировать из опасной зоны, но автомобили в пределах ее полностью сгорели. В результате перегрева вышли из строя две трети вытяжных вентиляторов, были разрушены некоторые конструкции.

Разрушение конструкций тоннеля — это всегда много работы и много денег. Во многих случаях в ограниченных условиях подземного пространства восстановление и усиление конструкции может оказаться технически трудноосуществимой или практически невозможной задачей, так как потребует дополнительной разработки грунта или замены целой секции.

В 1979 году в автотранспортном тоннеле Ниходзака длиной около 2 км между Токио и Нагоя (Япония) произошла авария на расстоянии 400 м от выездного портала. Во время пожара на участке длиной 1122 м температура достигла 1000°C, возникло сильное задымление. Отмечены значительные повреждения обделки с разрушением бетона на глубину до 25 см. Восстановление тоннеля

длилось два месяца. Системы обнаружения (344 пожарных извещателя) и тушения (1024 спринклерных оросителя, 48 пожарных гидрантов) не смогли локализовать пожар.

В некоторых случаях конструкция тоннеля начинает «взрываться» — от нее разлетаются куски бетона весом до нескольких килограммов на расстояние до 10–20 м. Это явление называется «хрупкое разрушение бетона». Возможность такого развития событий тоже надо предусмотреть.

Параметры огнестойкости конструкций

Необходимые требования, в том числе по пожарной безопасности, установлены Федеральным законом РФ от 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

Одним из требований по части возникновения пожара является сохранение устойчивости здания или сооружения, а также прочности несущих строительных конструкций в течение времени, необходимого для эвакуации людей и выполнения других действий, направленных на сокращение ущерба.

Эти параметры характеризуют огнестойкость конструкций, показателем которой является предел огнестойкости конструкций, то есть время наступления предельных, нормируемых для них предельных состояний. Для точного определения этого времени направлен расчет огнестойкости по потере несущей способности (R), целостности (E), теплоизолирующей способности (I).

Предел огнестойкости по потере несущей способности (R) характеризует прочностные показатели конструкций при возможном пожаре и наступает при их обрушении или недопустимом прогибе; предел по теплоизолирующей способности (I) наступает при повышении средней температуры на обогреваемой поверхности больше предельно установленной; предел по целостности (E) — при образовании сквозных отверстий во время пожара.

Уже при проектировании зданий и сооружений, наряду с расчетом на прочность, жесткость и трещиностойкость, необходимо выполнять расчет на огнестойкость. Производя его, имеется возможность определить, каким образом надо запроектировать конструкцию, чтобы получить требуемый предел огнестойкости. Потому что обеспечение надежной эксплуатации несущих конструкций с точки зрения пожарной безопасности наиболее эффективно на стадии проектирования и строительства сооружения.

Для несущих железобетонных конструкций предельным состоянием по огнестойкости

является потеря несущей способности (R).

Расчет предела огнестойкости по потере несущей способности (R) состоит из тепло-технической и статической частей.

Теплотехнический расчет должен определить время наступления предела огнестойкости, по истечении которого арматура нагревается до критической температуры или сечение бетона конструкции уменьшается до предельного значения при воздействии на нее стандартного температурного режима.

Статический расчет должен обеспечить недопущение разрушения и потери устойчивости конструкции при совместном воздействии нормативной нагрузки и стандартного температурного режима.

Испытаниями установлено, что разрушение железобетонных конструкций при огневом высокотемпературном нагреве происходит по тем же схемам, что и в условиях нормальных температур. Поэтому для расчета предела огнестойкости по потере несущей способности используются те же уравнения равновесия и деформаций, из которых выводятся формулы для статического расчета.

Кроме определения пределов огнестойкости сооружаемых конструкций, производится оценка возможного хрупкого разрушения бетона обделок при пожаре.

Хрупкое разрушение бетона возможно в железобетонных конструкциях из тяжелого бетона с силикатным заполнителем и влажностью более 3,5%, с карбонатным заполнителем и влажностью более 4% и из легкого конструкционного керамзитобетона с влажностью более 5% и плотностью более 1200 кг/м³.

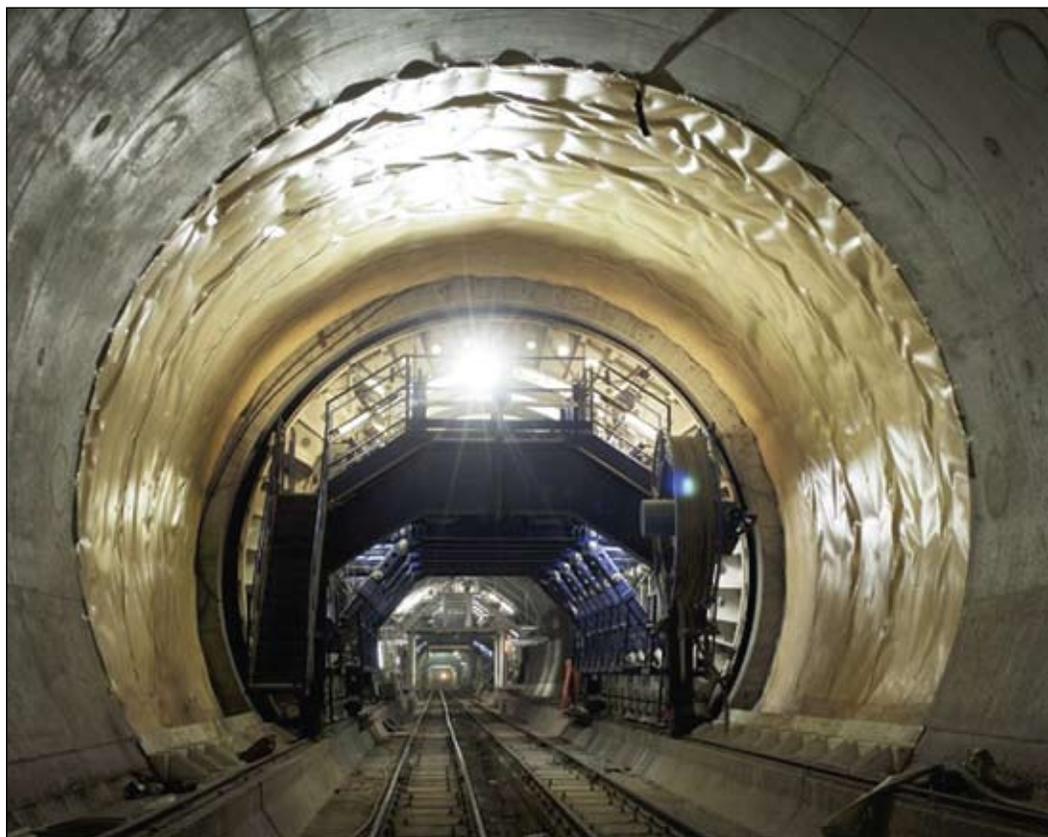
Причиной хрупкого разрушения при пожаре является образование трещин в структуре бетона и их переход в неравновесное спонтанное развитие под воздействием внешней нагрузки и неравномерного нагрева и фильтрации пара по толщине сечения элемента.

Хрупкое разрушение бетона при пожаре может очень быстро привести к разрушению бетонных или железобетонных конструкций. В этом случае предел их огнестойкости может оказаться значительно ниже требуемого вследствие уменьшения размера бетонного сечения конструкции, уменьшения толщины или полной ликвидации защитного слоя рабочей арматуры, а также образования сквозного отверстия.

Расчет ведется на стандартный пожар, температура которого увеличивается от времени огневого воздействия по логарифмической зависимости.

Предел огнестойкости — важный параметр, и он нормируется:

■ по СП 120.13330.2012 «Метрополитены» предел огнестойкости строительных



Устройство гидроизоляции тоннеля

конструкций обделок перегонных и тупиковых тоннелей принимается R90;

■ по СП 122.13330.2012 «Тоннели железнодорожные и автодорожные» предел огнестойкости обделок негородских транспортных тоннелей принимается R90, городских — R150;

■ по СП 166.1311500.2014 «Городские автотранспортные тоннели и путепроводы тоннельного типа с длиной перекрытой части не более 300 м» предел огнестойкости несущих конструкций тоннелей (обделка (стены, перекрытия), колонны) принимается R180.

Тоннели — это всегда уникальные сооружения с повышенным уровнем ответственности, к которым разрабатываются специальные технические условия (СТУ), где указаны необходимые конструктивные и планировочные решения, в том числе и требуемые пределы огнестойкости.

Расчеты несущих конструкций тоннелей

Усилия, используемые в расчете огнестойкости обделки тоннеля, получены из расчета несущей способности при нормативных нагрузках и нормативных сопротивлениях бетона и арматуры. Результаты расчетов предоставляются заказчиком, либо допол-

нительно выполняется отдельный расчет несущей способности тоннельной обделки.

Расчет огнестойкости ведется на фактическое армирование, характеристики сечения, состав бетона, петрографический состав заполнителя, то есть на характеристики, заложенные в рабочие чертежи и предоставленные заказчиком. Также требуется проведение дополнительных замеров влажности бетона конструкций либо воздуха в тоннеле. Эти замеры надо выполнить отдельно.

При этом часто, ввиду уникальности сооружений автотранспортных тоннелей, требуется разработка фактически отдельного нормативного документа, касающегося конкретного сооружения и учитывающего его специфику (специальных технических условий), а также применение технических новых решений. Естественно, что основой СТУ являются требования действующих нормативных документов. В СТУ также указываются требуемые значения пределов огнестойкости.

Несущая конструкция тоннеля представляет собой железобетонную обделку. Рассчитывают сечение, в котором внутри тоннеля располагается сжатая зона, и сечение с растянутой зоной внутри тоннеля. Другими словами, в местах наибольших отрицательного и положительного моментов.

Значения критерия хрупкого разрушения

Цемент, кг/м ³	Содержание крупного заполнителя, %	Влажность бетона, %	В/Ц	Критерий хрупкого разрушения
360	41,3	4,9	0,54	2,73
380	42	5,2	0,5	2,93
420	43,8	2,1	0,37	1,18
420	43,8	2,8	0,37	1,57
410	42,2	4	0,48	2,54

Тоннель проектируется с гидроизоляцией, поэтому считаем, что из породы влага не поступает и расчет ведется только на влажность, поступающую из воздуха внутри тоннеля.

Чтобы ответить на вопрос, выдержит ли данное сечение во время пожара, надо знать размеры сечения, площадь армирования и усилия, возникающие от действующих нагрузок.

Задается время огневого воздействия, которое равно необходимому пределу огнестойкости. Далее ведем следующую линию расчета: толщина слоя бетона, который нагревается за это время до критической температуры, температура арматуры — выясняется, как снижается ее прочность, пересчитываются геометрические характеристики сечения. На последнем этапе проверяется прочность сечения с учетом уменьшения его высоты и изменения свойств материалов под воздействием пожара. Теперь можно сделать вывод об обеспеченности требуемого предела огнестойкости.

Для проверки возможности хрупкого разрушения при пожаре выбирается сечение с наибольшими сжимающими напряжениями в бетоне с внутренней стороны тоннеля, поскольку вероятность разрушения в этом месте наиболее высока. При этом сжимающие напряжения не должны быть больше пороговых значений.

Возможность хрупкого разрушения бетона при пожаре, по В. В. Жукову, оценивается значением критерия хрупкого разрушения. Он имеет сложную зависимость от характеристик бетонной смеси: вид, класс, плотность, влажность бетона, вид и количество крупного заполнителя, количество цемента, пористость.

Значение критерия сравнивается с граничным, после чего инженер делает вывод о возможности хрупкого разрушения бетона, что в принципе позволяет подкорректировать состав смеси в каком-либо направлении.

В процессе расчета есть два важных поворотных пункта, в которых сравниваются критические величины и выясняется, как считать дальше.

Во-первых, определяется толщина слоя бетона, прогретого до температуры выше критической, которая сравнивается с расстоянием до центра тяжести арматуры, что покажет, будет ли дальше учитываться арматура или она выключается из расчета. Основной проверкой является сравнение действующих на сечение усилий с несущей способностью сечения. Это ответ на вопрос, обеспечен предел огнестойкости или нет.

Для точности расчета очень важно вовремя получать данные по геометрическим размерам конструкций, внутренним усилиям, принятому армированию, составу бетонной смеси, влажности бетона в конструкции. Этим надо заниматься отдельно, потому что, например, влажность бетона в тоннеле не определить без специального оборудования и, конечно, без отвечающих за это дело специалистов. Состав смеси дает строительная лаборатория, с которой, соответственно, тоже надо поддерживать контакт. Геометрия, армирование и усилия — это можно взять из проекта, если не надо ничего уточнять и проверять. То есть речь о том, что для качественного решения необходимо собрать все данные и быть в курсе всех изменений и подвижек, потому что расчет на огнестойкость должен характеризовать построенную конструкцию.

В районе Сочи построен ряд тоннелей, для которых необходимо было ответить на вопрос о фактической огнестойкости. Проведен комплекс расчетов, и теперь мы можем детально проанализировать их результаты.

Все несущие конструкции рассчитаны на пожар длительностью 3 часа, то есть предел огнестойкости равен 180 мин. За это время бетон прогревается до температуры выше критической на глубину 56–58 мм в зависимости от плотности бетона. Расстояние до центра тяжести арматуры изменяется от 48 до 80 мм, арматура нагревается соответственно до температуры 360—560 °С.

Напряжения сжатия достигают 75,02 МПа. При таком значении минимально допустимая толщина конструкции должна быть 317

мм, толщина несущих конструкций везде больше.

Такие (см. таблицу) значения критерия хрупкого разрушения получаются при разных исходных характеристиках бетонной смеси.

Теперь, когда мы видим полученные результаты, понятно, что требуемая огнестойкость выше 180 мин обеспечена на 73% суммарной длины тоннелей, или на 6 256,8 м. Конструкции тоннелей на всем этом расстоянии не требуют никаких дополнительных защитных мероприятий, которые обходятся дорого и занимают много времени.

Подводя итог

При строительстве тоннелей надо обязательно учитывать пожарную безопасность сооружения, тем более что это прописано в законе. Собственно пожары в тоннеле кардинально отличаются от пожаров в зданиях и по развитию, и по тушению. Тем не менее, на стадии проектирования есть возможность снизить влияние огня на несущие конструкции, избежать их разрушения. Стоит заметить, что достаточно важный фактор — это защитный слой бетона. Логично предположить, что чем дальше арматура от края конструкции, тем меньше она нагревается. Это самый надежный и, главное, экономичный способ помочь сооружению выстоять при пожаре, потому что огнезащита обходится очень и очень дорого, при этом у всех огнезащитных материалов есть особенности и пределы применения. Здесь надо найти баланс — насколько можно отодвинуть арматуру, потому что армированная конструкция работает лучше и эффективнее (арматура воспринимает нагрузки), только когда арматура находится у краев сечения. Задача в том, чтобы и обеспечивалась безопасность при пожаре, и выдерживались нагрузки.

Расчеты всегда проводят исходя из самых актуальных проектных данных с учетом всех необходимых замеров. Анализ расчета может дать информацию по такой корректировке проектных решений, которая сведет к минимуму влияние огня на конструкции. Корректировка определенных параметров бетонной смеси может предотвратить отколы кусков бетона при пожаре. В результате расчеты дают точную информацию, на каком протяжении конструкции сами воспринимают огневое воздействие, то есть где не требуется никаких дополнительных работ и можно избежать дорогой огнезащиты. Важно отметить, что понимание и прогнозирование работы конструкций в экстремальных ситуациях, в конечном счете, повышает экономичность, эффективность и безопасность тоннельных сооружений. ■