

Тоннели на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Ю. С. ФРОЛОВ, докт. техн. наук, профессор кафедры «Тоннели и метрополитены» ПГУПС



Начало 60-х годов прошлого века отмечается интенсивным строительством транспортных тоннелей, в частности железнодорожных. Этому способствовали увеличение объема пассажирских и грузовых перевозок, повышение скорости сообщения, а также рост темпов сооружения тоннелей на базе мощного горнопроходческого оборудования и применения высоких технологий.

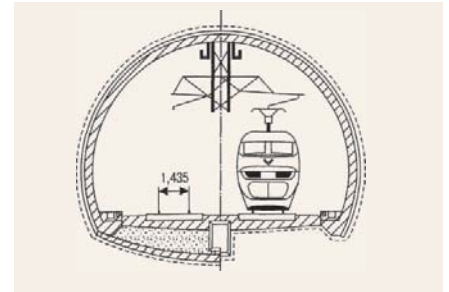


Рис. 1. Поперечное сечение тоннеля ВСМ Мадрид – Севилья (Испания)

ны как в плане эффективности использования тоннельных пересечений для обеспечения высоких качеств магистрали и безопасности скоростных перевозок, так и с позиций принятых объемно-планировочных решений, гарантирующих безопасную эксплуатацию сооружения при скорости поездов в тоннеле до 250 км/ч.

В Европе движение поездов со скоростью 250 км/ч было впервые осуществлено в Италии на линии Рим — Флоренция, строительство которой продолжалось около 30 лет и окончилось в 1978 г. Длина пути в тоннелях составила 32% протяженности магистрали (254 км), а стоимость тоннелей — 50,3% общих затрат на ее строительство. На этой линии более 30 тоннелей, самые протяженные из них Орте (9,3 км) и Сант-Оресте (5,7

Тоннели на путях сообщения становятся не только средством преодоления высотных препятствий, но и сооружениями, призванными улучшить эксплуатационные качества магистралей в горном рельефе, преодолеть контурные препятствия в виде широких водотоков, морских акваторий, охранных зон. Трассирование высокоскоростных магистралей (ВСМ) с минимальными уклонами и кривыми большого радиуса вызывает необходимость сооружения тоннельных пересечений. Сейчас в связи с ужесточившимися требованиями по охране окружающей среды, в частности, по сохранению природных ландшафтов, мест обитания редких животных и реликтовых растений, в условиях спокойного равнинного рельефа предусмотрена возможность прокладки путей ВСМ в тоннелях. В качестве примера можно назвать высокоскоростную линию, соединяющую западный

портал тоннеля под Ла-Маншем с Лондоном, где предполагается увеличить среднюю скорость поездов от 100 до 200 км/ч. Часть (24%) линии протяженностью 108 км пройдет в тоннелях вследствие требований, продиктованных экологическими принципами.

Проектные решения, выполненные в последние годы в разных странах, показывают, что при пересечении протяженных водных преград ВСМ по совокупности факторов предпочтительнее тоннельный вариант.

Известно, что в настоящее время ВСМ действуют в Европе (Франция, Германия, Италия, Нидерланды, Бельгия, Норвегия, Португалия, Испания, Великобритания) и Азии (Япония, Корея, Китай, Тайвань), до 2015 г. планируется построить ВСМ еще в 15 странах мира.

Приведем примеры действующих и проектируемых протяженных тоннелей на ВСМ в различных странах. Эти примеры в известной мере показатель-

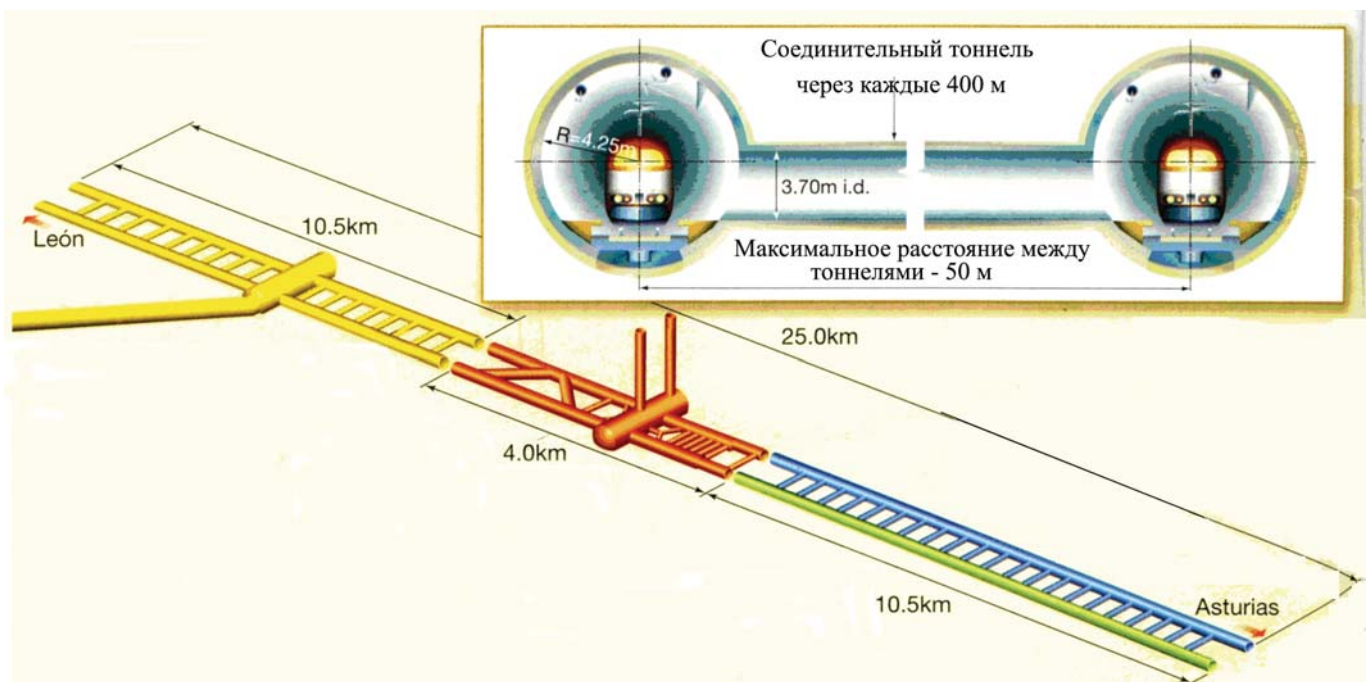


Рис. 2. Объемно-планировочное решение тоннеля Rajares (Испания)

км). Тоннели двухпутные с площадью поперечного сечения в свету 53,77 кв. м. Вследствие малой площади сечения скорости прохождения поездов через тоннели была ограничена.

В настоящее время в связи с увеличением скорости движения поездов до 300 км/ч на ВСМ предусмотрено строительство новых двухпутных тоннелей с увеличенной площадью поперечного сечения. Только на участке ВСМ от Рима до Неаполя намечено построить 25 тоннелей общей протяженностью 30 км. На железнодорожной магистрали Болонья — Флоренция, пересекающей Апеннинские горы, требуется построить тоннели общей длиной 85 км.

При сооружении испанской ВСМ Мадрид — Севилья протяженностью 471 км были преодолены по кратчайшему направлению Толедские горы. Строительство осуществлялось с января 1988 г. по июль 1990 г., пройдено 17 тоннелей общей длиной 15,8 км. Площадь поперечного сечения двухпутных тоннелей на ВСМ для улучшения аэродинамических условий следования высокоскоростных поездов составляет в свету 75–80 кв. м (рис. 1).

В настоящее время Испания приступила к строительству трех высокоскоростных железных дорог. На одной из них строится базовый протяженный тоннель Guadagata длиной 28,3 км. В результате всесторонних исследований инженерно-геологических условий на трассе тоннелей проектировщики приняли решение в пользу двух однопутных тоннелей с сечением в свету 52 кв. м каждый. Площадь сечения установлена на основании требований движения поездов со скоростью 350 км/ч с учетом длины тоннеля.

В 2004 г. в Испании начали сооружение еще одного протяженного железнодорожного тоннеля Rajages по схеме два параллельных однопутных тоннеля, каждый длиной 25 км и сечением 56,7 кв. м (рис. 2). Между тоннелями устроены сбойки через каждые 400 м. Примерно на середине тоннеля устроены съезды между тоннелями и поперечная камера с двумя стволами для эвакуации людей при аварийной остановке. Запланировано, что строительство тоннеля продлится примерно пять лет и движение будет открыто в 2010 г.

В Австрии в сентябре 2004 г. началось строительство тоннеля Wienerwald (Венского) длиной 13,1 км. Этот тоннель наиболее технически сложный и протяженный из построенных в Австрии. Проект осуществляется по ставшей традиционной схеме про-

тяженного тоннельного пересечения на ВСМ и включает два параллельных однопутных тоннеля, соединенных выработками через каждые 250–300 м. Проходку начали в конце 2005 г., сбойка осуществлена осенью 2007 г.

Сеть ВСМ во Франции состоит из четырех действующих и трех строящихся магистралей. Еще шесть ВСМ предполагается включить в число действующих с 2012 по 2020 г. Однако тоннелей на них немного. Самое выдающееся сооружение — Евротоннель между Францией и Великобританией, о котором речь пойдет ниже.

Примечателен тоннель на ВСМ «Средиземноморье» от Валенсии до Марселя длиной 7,8 км. Учитывая, что один портал его находится в 2 км от станции, поезда подходят к тоннелю с различными скоростями: у портала со стороны станции 140 км/ч, у противоположного 230 км/ч. После выезда из тоннеля в сторону Испании поезда развивают скорость до 300 км/ч.

Строительство ВСМ в Японии началось в 1959 г., а в 1964 г. вступила в эксплуатацию первая линия со скоростью движения поездов 210 км/ч. Для пересечения пролива Цугару высокоскоростной линией между островами Хоккайдо и Хонсю в период с 1964 по 1988 г. был сооружен самый протяженный в мире (длина 53,8 км, диаметр в свету 9,7 м, площадь — 74 кв. м) двухпутный железнодорожный тоннель подводного сечения Сейкан (рис. 3).

На ВСМ Токио — Осака из 515 км линии 13% проложено в тоннелях. На другой японской линии (Токайдо) 16% находится в тоннелях (60,5 км). На сооруженной позже ВСМ «Санъё Синкансэн» между городами Осака (о. Хонсю) и Хаката (о. Кюсю) построено 142 тоннеля. На участке от города Окаяма до конечного пункта Хаката 55% пути проложено в тоннелях. Самый длинный из них — подводный тоннель Син-Каммон протяженностью 18,7 км соединяет острова Хонсю и Кюсю.

Сложнее были условия строительства к северу от Токио ВСМ «Тохоку» и «Дзё-эцу». Так, на «Тохоку Синкансэн» путь на искусственных сооружениях составляет 94% от общей длины линии. Десять крупных тоннелей имеют суммарную длину 57,7 км, самые большие из них Фукусима и Зао (11,7 и 11,2 км). На «Дзё-эцу Синкансэн» тоннели длиной более 3 км имеют суммарную протяженность более 90 км.

Самый длинный горный железнодорожный тоннель Японии — двухпутный тоннель Хаккода (длина 26,5 км)

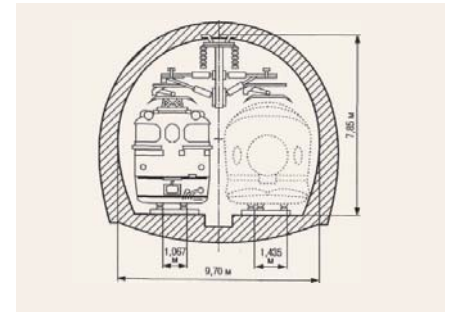


Рис. 3. Поперечное сечение тоннеля Сейкан

на высокоскоростной железнодорожной линии. Проходческие работы в тоннеле начались в июле 1998 г. и завершились в феврале 2005 г. Второй по протяженности японский тоннель Ивате Ичиное расположен на той же линии и имеет длину 25,8 км.

В Европе в связи с организацией высокоскоростных железнодорожных сообщений на международных маршрутах реализуются проекты тоннелей большой протяженности. Известная ВСМ между Парижем и Лондоном пересекает пролив Ла-Манш с помощью тоннельного перехода длиной 50,5 км, который включает два путевых тоннеля кругового очертания и внутренним диаметром 7,6 м, находящихся на расстоянии 30 м друг от друга, и расположенный между ними сервисный тоннель диаметром 4,8 м (рис. 4). Из-за сравнительно небольшого сечения (45,4 кв. м) тоннеля в нем установлена максимальная скорость движения поездов 160 км/ч.

Значительную роль в создании единой общеевропейской высокоскоростной железнодорожной сети играют железные дороги Швейцарии, лежащей в центре Западной Европы. Для улучшения сообщения внутри страны и международной связи Север — Юг с крупнейшими городами Европы разработан проект скоростных железных дорог стоимостью 11 млрд долл. США. Проект включает создание новых тоннелей, предназначенных для движения пассажирских поездов со скоростью до 250 км/ч и грузовых — до 160 км/ч. Запланированы две новые транспортные линии: Готтардская (Цюрих — Лугано) и Лёчбергская (Берн — Бриг), которые пройдут параллельно действующим железным дорогам, исчерпавшим резерв пропускной способности.

В проектах новых линий предусмотрено строительство «базисных» тоннелей: Готтардского длиной 57 км и Лёчбергского — 35 км. Оба тоннеля состоят из двух однопутных параллельных тоннелей с внутренним диаметром 8,2 м (рис. 5), соединенных на всем про-

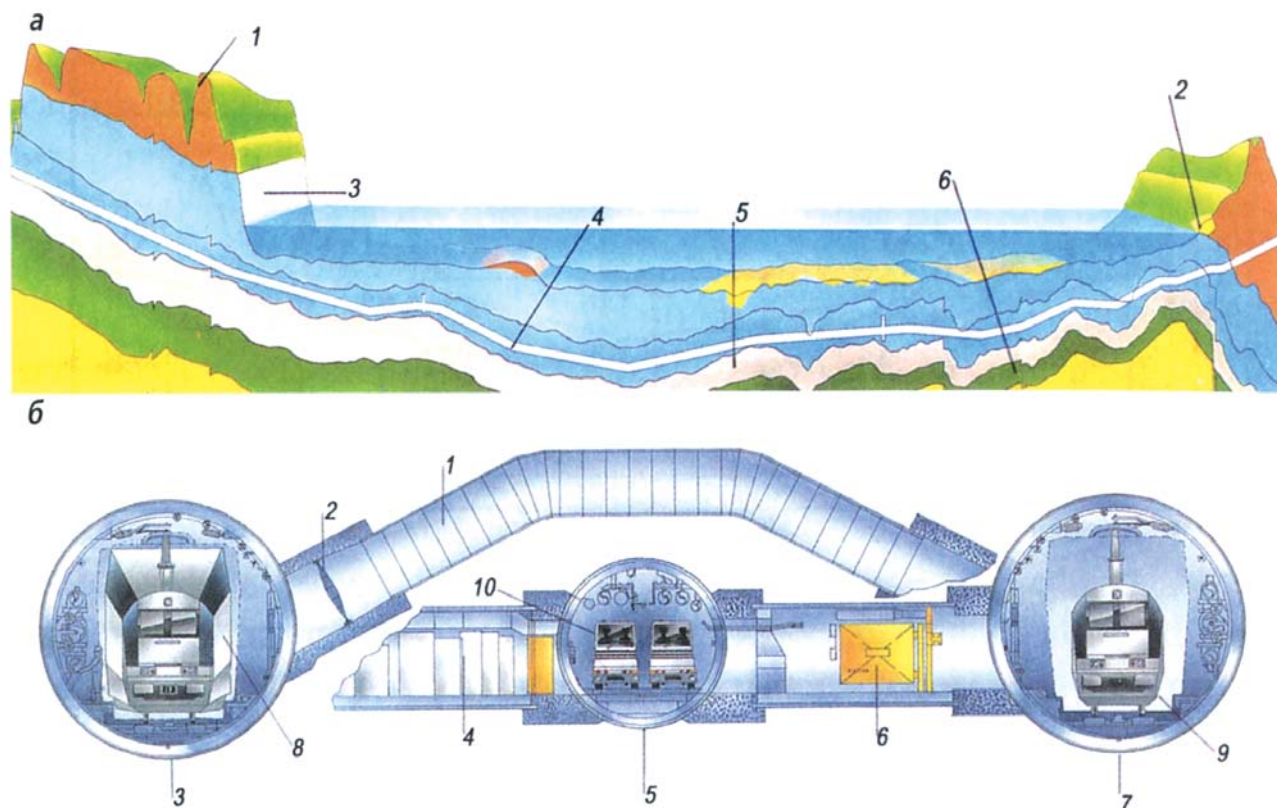


Рис. 4. Геологический разрез (а) и схема эксплуатационных сооружений (б) тоннеля под проливом Ла-Манш:
 а: 1 и 2 — аллювиальные береговые отложения; 3 — белый и серый мел; 4 — меловой мергель; 5 — мергелистая уплотненная глина; 6 — зеленый (глауконитовый) песок; б: 1 — поршневой разгрузочный канал с промежутками 250 м; 2 — поршневой разгрузочный клапан; 3 — северный ж.-д. тоннель; 4 — типовое техническое помещение; 5 — сервисный тоннель; 6 — типовая поперечная выработка с перегородкой, через каждые 350 м; 7 — южный ж.-д. тоннель; 8 — челночный поезд для перевозки автотранспорта между терминалами; 9 — прямой поезд; 10 — система транспорта в сервисном тоннеле.

тяжении многочисленными сбойками. На трассе приняты максимальные уклоны $12,5\text{‰}$ и минимальные радиусы кривых 4000 м, что позволит пропускать с высокими скоростями такие пассажирские подвижные составы, как, например, французские поезда TGV или немецкие ICE. Строительство тоннеля Лёчберг закончено в 2005 г.

К западу от Лёчбергского тоннеля на расстоянии 80 км заканчивается строительство Готтардского тоннеля протяженностью 2×57 км (рис. 6). Готтардский тоннель входит составной частью в проект «NEAT» (Новые Трансальпийские железные дороги). Это будет самый протяженный железнодорожный тоннель в мире. Максимальная глубина заложения тоннеля около 3000 м. Работы начаты в декабре 2002 г., окончание строительства запланировано на 2012 год.

Для создания общей европейской высокоскоростной железнодорожной сети необходимо сооружение нового трансальпийского тоннеля, который объединит ВСМ Франции и Италии на направлении Лион — Турин. Планируется, что основной тоннель длиной около 52 км на линии Лион — Турин, названный Д'Амбин, пройдет в районе седловины на границе Грайских и

Коттских Альп. Примерно в одном километре от него намечено строительство еще одного тоннеля длиной 12 км.

Новый переход Д'Амбин будет сооружен в виде двух однопутных тоннелей, соединенных на всем протяжении сбойками. Примерно посередине трассы тоннеля в толще горного массива планируется построить подземную станцию ВСМ, расположенную в самой высокой части тоннеля, который будет равномерно понижаться к обоим порталам с уклоном 10‰ . Одним из назначений подземной станции является обеспечение эвакуации пассажиров в случае чрезвычайной ситуации; в связи с этим станция будет соединена с поверхностью скоростными лифтами. Осуществление строительства намечено на 2007–2016 гг.

С развитием ВСМ возникают проблемы, связанные с движением поездов в тоннелях. Одна из них — взаимодействие поезда с воздушной средой. При этом необходимо учитывать такое явление, как перепад давления при входе в тоннель и выходе из него или во время прохода встречного поезда. Значительные перепады давления оказывают неприятное воздействие на пассажиров высокоскоростных поездов, и для его предотвращения необходимо осо-

бое устройство систем вентиляции вагонов, в частности, применение предохранительных клапанов. Взрывоопасная ударная волна, образующаяся при выходе поезда из тоннеля, может причинить вред близлежащим постройкам. Для ее смягчения используют ступенчатые конструкции обрамления порталов. Ударная волна представляет опасность и для оборудования, размещенного в тоннеле. При движении в тоннелях увеличивается сопротивление воздуха, для преодоления которого требуется повышенный расход энергии на тягу поездов.

Указанные воздействия развиваются пропорционально квадрату скорости движения, что следует учитывать при организации регулярного движения поездов со скоростью более 160 км/ч. При проектировании тоннелей большой длины и разработке вентиляционных систем необходимо также принимать в расчет теплоотдачу от подвижного состава и нагревание воздуха от трения о поверхность движущихся поездов.

При следовании в тоннеле изменяются условия аэродинамического обтекания поезда. Пространство между стенками тоннеля и вагонами невелико, и часть воздуха выталкивается из

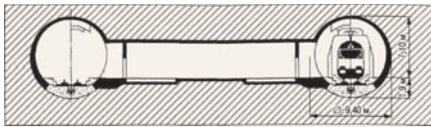


Рис. 5. Поперечное сечение Лёчбергского туннеля, Швейцария

тоннеля, а другая обтекает поезд. Между головной и хвостовой частями состава возникает разность давления, что увеличивает сопротивление движению.

Одна из первых теоретических работ «Коэффициент лобового сопротивления при высокой скорости в туннеле» была выполнена в 1947 г. немецкими специалистами и опубликована в США (НАСА) в 1955 г. В дальнейшем изучение сложных аэродинамических явлений, связанных с высокоскоростным движением поездов в туннелях, было продолжено экспериментально. Так, во Франции были проведены исследования на трех туннелях, через которые пропускали поезда с различной скоростью. Экспериментальные участки туннелей и опытные поезда были оснащены измерительным оборудованием.

В результате исследований установлена зависимость воздушного сопротивления от длины и сечения туннеля, скорости движения и длины двух поездов, разницы во времени входа поездов в туннель, типа поезда (сечение, форма головной и хвостовой части вагонов).

Анализ зарубежного опыта проектирования и эксплуатации протяженных туннелей на ВСМ дает основание сделать следующее заключение:

- Скорость движения в большинстве туннелей ограничена для грузовых поездов до 160 км/ч, пассажирских — 250 км/ч;
- Как правило, относительно короткие туннели выполняются двухпутными, протяженные (более 20 км) в виде

двух однопутных туннелей; туннели располагают на прямой в плане или кривой не менее 1400 м; между осями двух параллельных туннелей принимают 25–50 м:

- С целью улучшения аэродинамических параметров внутреннее очертание поперечного сечения туннелей (как двухпутных, так и однопутных) принимается круговым, обделка выполняется из гладких блоков или из монолитного бетона;

- В зависимости от установленной скорости движения подвижного состава по туннелю 160 или 250 км/ч площадь сечения двухпутных туннелей в свету составляет соответственно 75 и 80 кв. м; внутренний диаметр однопутных туннелей — от 7,6 до 8,5 м;

- Аэродинамическое воздействие не оказывает существенного влияния на обделку туннеля, поэтому несущая способность конструкции определяется только на постоянные нагрузки и сейсмическое воздействие;

- При увеличении скорости движения поездов по туннелю с 250 до 300 км/ч площадь сечения туннеля увеличивают примерно на 20%;

- С целью безопасности движения два однопутных туннеля соединяют по всей длине переходами с расстоянием между ними 250–350 м; в середине туннеля устраиваются станции аварийной остановки с эвакуационными выходами на поверхность;

- Для смягчения ударной волны на порталах и лобового сопротивления поезду используют ступенчатые конструкции обрамления порталов, на припортальных участках на длине несколько сот метров увеличивают площадь поперечного сечения туннеля примерно на 20%;

Заключая рассмотрение основных положений концепции туннельного пересечения на ВСМ, необходимо констатировать, что размеры поперечного сечения туннелей на отечественных железных дорогах до сих пор проектируются с учетом только габарита приближения строений, а внутреннее очертание принимается в зависимости от инженерно-геологических условий. На отечественных дорогах однопутные железнодорожные туннели подковообразного сечения имеют площадь в свету 42 кв. м, двухпутные — 80 кв. м, внутренний диаметр однопутного туннеля кругового очертания 7,5–7,9 м. Установленные скорости в туннелях 65 км/ч, реальные не более 50, в большинстве случаев 40 км/ч.

Внутренний диаметр однопутного туннеля на европейских ВСМ (8–8,5 м) больше принятого на наших дорогах, но при этом габариты подвижного состава за рубежом существенно меньше наших. Это свидетельствует о необходимости весьма существенно увеличить площадь сечения туннеля на отечественных ВСМ при сохранении существующего габарита подвижного состава.

Для решения вопроса об оптимальной площади поперечного сечения туннеля в свету в зависимости от скорости движения (при заданных параметрах подвижного состава) необходимо провести исследования аэродинамических процессов при прохождении поезда в туннеле с высокой скоростью. С учетом перспективного строительства ВСМ в России и выхода их в регионы Урала, Сибири, Забайкалья, Дальнего Востока и Северного Кавказа такие исследования следует считать актуальными.

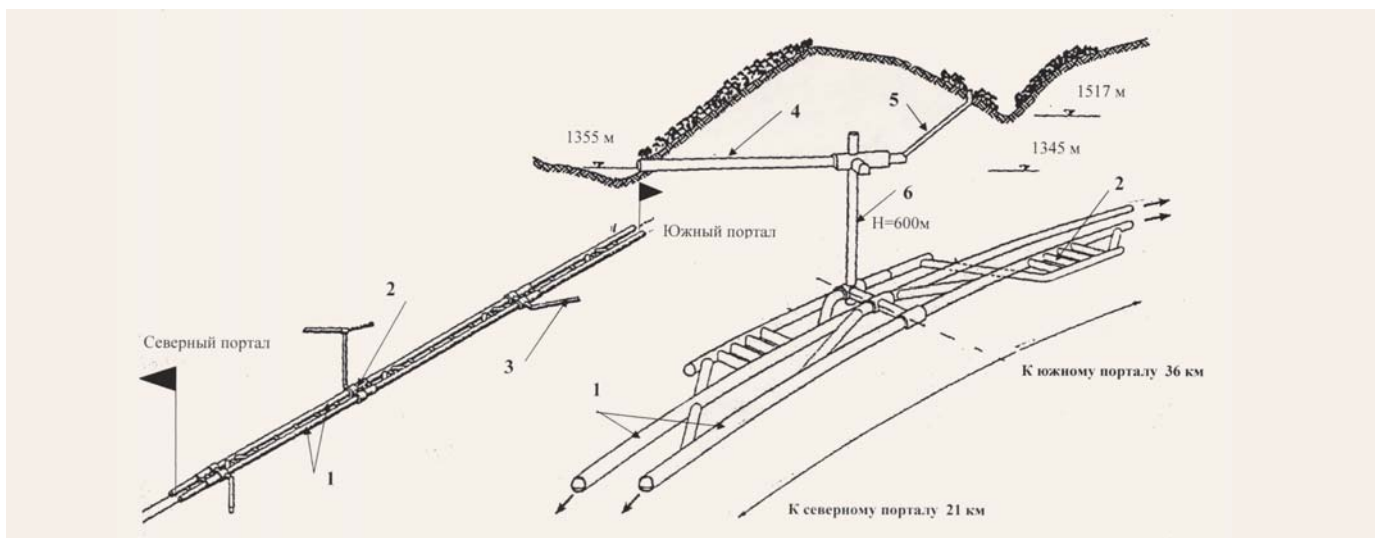


Рис. 6. Общий вид и центральная часть Готтардского туннеля: 1 — однопутные железнодорожные туннели; 2 — станция аварийной остановки; 3 — промежуточные стволы; 4 — туннель аварийного выхода; 5 — вентиляционный туннель; 6 — ствол аварийного выхода.