

Филипп Лазаро, Ги Туссен, Жиль Дидье и Себастиен Эрпикум

## Новый водосброс на плотине Эш-со-Сюр в Люксембурге

Пятидесятиметровая арочная плотина Эш-со-Сюр, построенная на реке Сюр в 1956–1957 гг., расположена в 1,2 км вверх по течению от города Эш-со-Сюр, на северо-западе от Люксембурга. Поскольку плотина изначально не была оборудована поверхностным водосбросом, его сооружение было признано необходимым. Конструкция водосброса с расчетным расходом 400 м<sup>3</sup>/с предусматривает строительство двух лабиринтных водосливов с выходом в водосбросный туннель, проходящий под левым устоем плотины.

### 1 Введение

Арочная плотина Эш-со-Сюр, спроектированная французским инженером Койне, была сооружена между 1956 и 1957 гг. на реке Сюр в 1,2 км вверх по течению от небольшого городка Эш-со-Сюр, на северо-западе Люксембурга. Максимальная высота плотины 50 м, длина по гребню между двумя массивными контрфорсами, образующими береговые устои, при помощи которых арка

примыкает к берегу, равна 170 м. Конструкция плотины отличается смелостью с расчетом на минимизацию количества бетона, используемого для ее строительства (рис. 1). Так, толщина плотины по гребню составляет 1,5 м, а в основании – 4,5 м. Гребень собран из сборных железобетонных элементов заводского изготовления, которые соединены с телом плотины анкерами. По гребню проходит двухполосное автомобильное шоссе.

Небольшие плотины, расположенные в нижнем бьефе плотины Эш-со-Сюр, обеспечивают снижение шума речного потока и используются для поддержания нормального уровня воды в городе. Основание дамбы состоит из тяжелых и плотных аспидных сланцев и девонских кварцитовых песчаников.

Площадь водосбора в Эш-со-Сюре составляет около 428 км<sup>2</sup>, две трети из которых расположены в Бельгии. Плотина образует водохранилище с полным объемом 59 млн м<sup>3</sup>, которое в основном используется для водоснабжения питьевой водой, защиты от паводков, регулирования стока

во время засушливых сезонов, выработки электроэнергии и в качестве туристической и рекреационной зон. Водоохранилище имеет длину приблизительно 19 км и площадь зеркала – 3,50 км<sup>2</sup>.

В хвосте водохранилища расположены две дамбы Pont Misere и Bavigne, которые позволяют поддерживать уровень верхнего бьефа выше минимального уровня для сохранения экологического и туристического значений водохранилища. Электростанция, расположенная в основании плотины, оборудована двумя гидротурбинами Francis (радиально-осевыми) по 5 МВт каждая, с общим расходом 25 м<sup>3</sup>/с. Среднегодовая выработка электроэнергии достигает 16 ГВт ч/год.

В настоящее время паводковые воды сбрасываются в нижний бьеф плотины через два донных водовыпуска, расположенных в центральной консоли (рис. 1), поскольку плотина не оборудована поверхностным водосбросом. Расход обоих донных водовыпусков регулируется при помощи двух сегментных затворов 3,5 м шириной и 2,75 м длиной и составляет в целом 450 м<sup>3</sup>/с.

Современная пропускная способность плотины не соответствует обновленным требованиям по паводковой безопасности, особенно, если допустить возможность, что

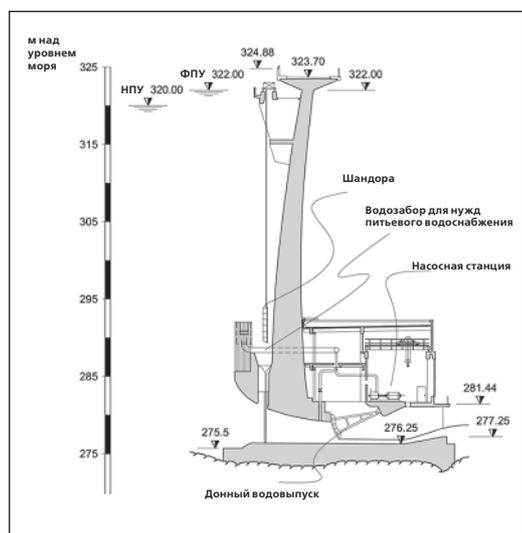
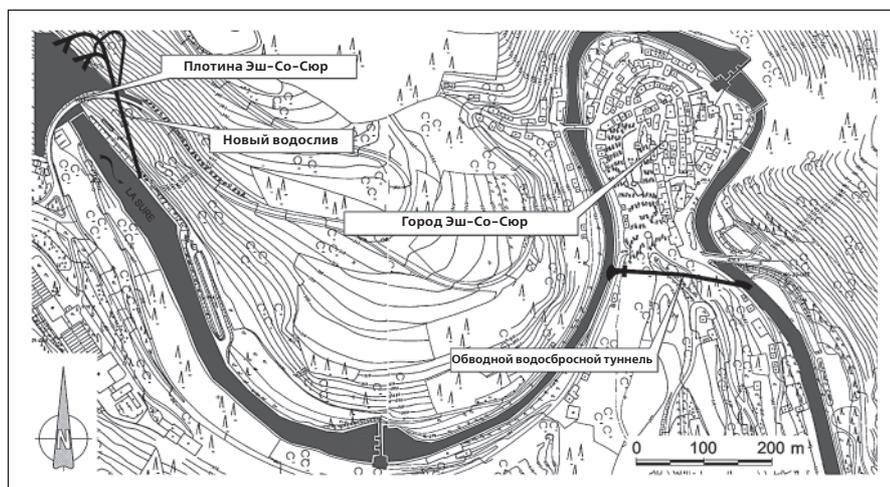


Рис. 1: Разрез по центральной секции плотины Эш-со-Сюр



**Рис. 2:** Генеральный план сооружений нового водосброса и обводного туннеля около города Эш-Со-Сюр

один или оба затвора не откроются во время паводка из-за перерыва в энергоснабжении, заклинивания или человеческого фактора.

Управляемый противопаводковый объем (объем аккумулируемого паводкового стока) располагается между отметками 320 м (НПУ) и 322 м над уровнем моря (ФПУ) и составляет 7 млн м<sup>3</sup>. В зимний период уровень НПУ снижается на 3 м для того, чтобы увеличить противопаводковый объем до 9 млн м<sup>3</sup> и повысить уровень безопасности водохранилища. Таким образом, для противопаводковых мероприятий резервируется около 35% полезного объема водохранилища.

Гидрологический режим реки Сюр характеризуется регулярным снижением расхода в летние месяцы и очень высокими его значениями зимой. Максимальный объем паводка приходится на январь и отличается большим притоком, пиковым расходом и большой продолжительностью. Три больших паводка 50-летней обеспеченности были зафиксированы в период с 1990 по 1995 гг.

В настоящее время режим управления водохранилищем во время паводка установлен таким образом, чтобы удовлетворять требованиям безопасности плотины и уберечь город Эш-Со-Сюр от возможного пе-

релива через гребень плотины. Поэтому сбрасываемый расход удерживается как можно дольше на уровне 95 м<sup>3</sup>/с. Этот расход соответствует максимальной пропускной способности реки Сюр в районе города Эш-Со-Сюр. Однако как только уровень водохранилища достигает отметки 320 м, сброс должен быть значительно увеличен до уровня максимальной пропускной способности донных водовыпусков (450 м<sup>3</sup>/ч) для того, чтобы избежать перелива через гребень плотины.

## 2 Новый водосброс на плотине Эш-Со-Сюр

### 2.1 История

Паводки, наблюдаемые в период 1990–1995 гг., подтвердили гидрологические данные поведения реки Сюр в створе плотины и необходимость переоценки системы противопаводковой безопасности. Проведенный в 1995 г. анализ показал, что и объем, и пиковый расход паводков, соотнесенные с различными периодами повторяемости, сильно возросли. Последовал вывод, что настоящая пропускная способность плотины не отвечает современным стандартам противопаводковой безопасности, и город Эш-со-Сюр находится под угрозой частых подтоплений.

Основываясь на данном заключении, администрация des Ponts et Chaussées подрядила компанию Lombardi Engineering Ltd. провести сбор и анализ исходных данных и подготовить технико-экономическое обоснование проекта сооружения нового поверхностного водосброса на плотине и обводного водосборного туннеля мимо города Эш-Со-Сюр (рис. 2) [1].

Фактически проведенная реконструкция плотины, хотя и обеспечивает лучшее распределение снижения потока, все же не обеспечивает адекватную противопаводковую защиту города. В предложенной кон-

### Die neue Hochwasserentlastung der Staumauer Esch-sur-Sure in Luxemburg

Die 50 m hohe Staumauer Esch-sur-Sure, die in den Jahren 1956 und 1957 im Tal des Flusses Sure erstellt wurde, befindet sich etwa 1,2 km flussaufwärts des Dorfes Esch-sur-Sure in der nord-westlichen Region von Luxemburg. Beim Bau der Staumauer wurde kein Hochwasserueberlauf vorgesehen. Um die Hochwassersicherheit zu verbessern, ist die Erstellung einer neuen Ueberlaufschwelle vorgesehen. Das projektierte Bauwerk besteht aus zwei Labyrinthwehren, von welchen das Wasser ueber einen Entlastungstunnel unter dem linken Staumauerwiderlager abgefuehrt wird. Der Bemessungsabfluss der neuen Hochwasserentlastung betraegt 400 m<sup>3</sup> / s.

### New Spillway at the Esch-sur-Sure Dam in Luxembourg

The 50 m high arch dam of Esch-sur-Sure, built on the River Sure between 1956 and 1957, is located 1.2 km upstream of the town of Esch-sur-Sure in the north west of Luxembourg. As the dam is not equipped with a surface spillway the construction of a new one was considered necessary. The new spillway design with a discharge capacity of 400 m<sup>3</sup> / s consists of building two labyrinth weirs discharging into a spillway tunnel passing under the left dam abutment.

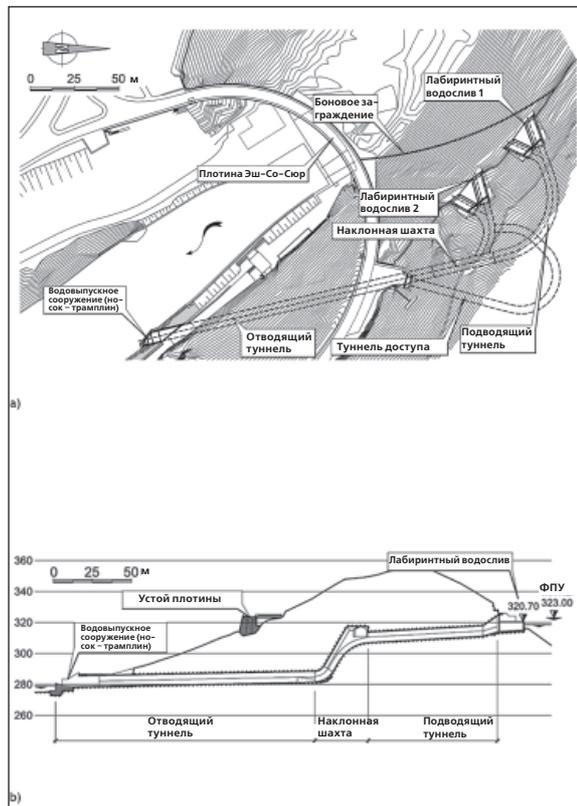


Рис. 3: Генеральный план и продольный разрез нового водосброса на дамбе Эш-Со-Сюр

фигурации новый водосброс безопасно сбросит паводковый расход по туннелю, проходящему под левым устоем плотины, в то время как обводной туннель длиной 142 м, обходящий город Эш-Со-Сюр, повысит общую пропускную способность реки в излучине.

## 2.2 Основные детали проекта

Водосброс состоит из двух лабиринтных водосливов длиной 37,5 м каждый, расположенных в левом борту около плотины. Специально рассчитанная геометрия лабиринта позволяет минимизировать объем земляных работ и визуальный эффект сооружения. Порог водосливов расположен на отметке 320,7 м над уровнем моря, т. е. на 70 см выше уровня НПУ.

Водосброс рассчитан на сброс  $Q_{0,01\%} = 650 \text{ м}^3/\text{с}$  — с учетом работы одного донного водовода с расходом  $250 \text{ м}^3$  в секунду при максимальном подпорном уровне во-

дохранилища (323 м) и оборудованием боювого заграждения для задержки плавающего мусора. Сбрасываемый расход пропускается в нижний бьеф плотины через туннель, проходящий под устоем плотины. Сбойка двух водосбросных туннелей располагается наверху наклонной шахты. Как подводящий, так и отводящий туннели имеют одинаковые размеры ( $B \times H = 6,15 \times 6,40 \text{ м}$ ), облицованы бетоном для обеспечения лучших гидравлических параметров и предотвращения эрозионных повреждений. Круглая наклонная шахта с внутренним диаметром 6,15 м также облицована бетоном. Ассиметричный носок — трамплин с отбросом струи — рассчитан на оптимальное возвращение потока в естественное русло реки при любых его параметрах.

Повышение общей пропускной способности позволит увеличить максимальный подпорный уровень на 1 м до отметки 323 м над уровнем моря, подняв таким образом управляемый противопаводковый объем на 3,5 млн  $\text{м}^3$ . Новый водосброс и повышенный противопаводковый объем ведут к снижению пиковых расходов при сильных паводках, повышая тем самым противопаводковую защищенность городов, расположенных в НБ плотины.

Конструкция нового водосброса отвечает следующим требованиям:

1. Гарантирует безопасную эксплуатацию водосброса;
2. Обеспечивает сохранность сельскохозяйственных угодий;
3. Предотвращает потерю в выработке электроэнергии и питьевой воды;
4. Обеспечивает минимальную видимость конструкций (смягчает экологическую нагрузку).

## 2.3 Исследования физической модели

Гидравлическое поведение нового водосброса было исследовано в лаборатории гидравлических конструкций Льежского университета с использованием физической модели, уменьшенной в масштабе 1:26,19 (подобие Фруда). Целью исследований на физической модели было подтвердить пропускную способность конструкции и оценить характеристики потока внутри туннелей и шахте при любых эксплуатационных параметрах, а также усовершенствовать конструкцию носка-трамплина с учетом рисков размыва естественного речного русла в нижнем бьефе.

### Характеристики физической модели

Моделировалась часть верхнего бьефа водохранилища и часть естественного речного русла в нижнем бьефе, связанных между собой конструкцией водосброса. Геометрия туннелей и шахты была повторена с едва заметным упрощением с использованием прозрачных пластиковых материалов. В частности, сложный переход от прямоугольного к круглому сечению был выполнен с помощью метода стереолитографии (метод быстрого макетирования). Эта технология позволяет быстро и точно воспроизводить сложные трехмерные формы.

Со стороны НБ носка-трамплина было смоделировано естественное русло реки с использованием грубого гранулированного материала с зерном 7–14 или 14–20 мм для количественного изучения эффекта размыва в результате сброса паводка. Граничные условия в ВБ определялись расходом паводка, измеряемым электромагнитным водомером, а граничные условия в НБ — уровнем воды, регулируемым при помощи передвижного порога. В нижний бьеф мог также подаваться дополнительный расход, представлявший донные водовыпуски. Модель была оборудована несколькими измерительными устройствами для контроля параметров потока.

### Пропускная способность и внутренний режим потока

Через модель пропускали поток с расходом от 51 до 512 м<sup>3</sup>/с для оценки эффективности лабиринтных порогов водосброса и пропускной способности туннелей и шахты. Для этих тестов коэффициент расхода при истечении был повышен для обоих водосливов с 0,409 при расходе 51 м<sup>3</sup>/с до 0,428 при расходе 151 м<sup>3</sup>/с и затем понижен до 0,382 при расходе 512 м<sup>3</sup>/с. Лабиринтные пороги при таких условиях работали прекрасно. Они могли пропускать паводковый расход 400 м<sup>3</sup>/с при уровне верхнего бьефа водохранилища на отметке ниже максимального подпорного уровня (323 м над уровнем моря).

Что касается туннелей и шахты, то их размеры необходимо было увеличить, чтобы они пропускали расчетный расход в условиях свободной поверхности потока. Для учета этих геометрических изменений достаточно было увеличить масштаб модели с 1:26,19 до 1:29,33. Шахта была укорочена для соответствия универсальным требованиям быстротока.

Важный подпорный эффект наблюдался при небольших расходах на поворотах туннелей с образованием небольших ударных волн. Тем не менее, поток в шахте был всегда удовлетворительным, т. е. это был поток со свободной поверхностью, благодаря завихрению против часовой стрелки при встрече потоков из двух туннелей.

### Конструкция носка-трамплина

Изначально носок-трамплин был выполнен с подъемом в топографии низового туннеля. Эта ступень, равная 2,19 м, предотвращала подтопление галереи при высоких уровнях воды в реке при условии, если оба донных водовыпуска были открыты. Это также давало дополнительное рассеивание энергии при больших расходах через водосброс. При расходах через водосброс менее 100 м<sup>3</sup>/с в туннеле образовывался гидравлический прыжок. При высоких расходах носок-трамплин работал хорошо, однако низовая струя падала близко к левому берегу реки.

Новая геометрия была разработана с тем, чтобы избежать гидравлического прыжка со стороны верхнего бьефа конструкции и отвести падающую струю от левого берега реки. Чтобы предотвратить подтопление туннеля при высоком уровне воды в реке, самая нижняя точка конструкции была приподнята с одновременным укорочением шахты.

Наилучшим решением оказалась ассиметричная конструкция носка-трамплина относительно оси туннеля. Наивысшая точка носка отброса струи располагается на правой стороне для того, чтобы разворачивать струю от берега реки, а низшая точка — с левой стороны для пропуска малого расхода без образования гидравлического прыжка. Форма и уровни трамплина были пересмотрены с тем, чтобы найти разумный компромисс между рассеиванием энергии, точкой размыва и пропуском малого расхода. В итоге высота носка отброса струи была установлена на уровне 4 м слева и 50 см справа с радиусом 15 м.

### 2.4 График работ

Строительство нового водосброса планировалось завершить в течение 17 месяцев. В первоначальный период строительства в течение сухого сезона предполагалось сооружение двух перемычек. Первая — в верхнем бьефе водохранилища у лабиринтных водосливов, и вторая — в нижнем бьефе водохранилища около водовыпускного сооружения (носка-трамплина).

Таким образом, земляные работы и работы по бетонированию могли быть произведены при полном уровне водохранилища в полноводный период. Затем будет пройден короткий туннель для доступа к подводящему туннелю и к лабиринтным водосливам. Этот туннель будет использоваться для проверок и работ по техническому обслуживанию водосброса после того, как он будет готов. Проходка будет осуществляться при помощи проходческого комбайна, а не буро-взрывным методом, чтобы избежать случайного повреждения плотины. Отводящий туннель и водовыпускное сооруже-

ние будут построены прямо в основании плотины.

### 3 Заключение

Сооружение нового водосброса на плотине Эш-Со-Сюр значительно повысит ее пропускную способность в соответствии с современными требованиями противопоаводковой безопасности. Это также поможет обезопасить города в нижнем течении от подтопления путем снижения пиковых значений сброса, имея в виду нынешнюю ситуацию. Фактически проведенная реконструкция плотины, хотя и обеспечивает лучшее распределение потока и снижение расхода, все же не обеспечивает адекватную противопоаводковую защиту города Эш-Со-Сюр, расположенного в 1,2 км от дамбы вниз по течению. Проект также включает сооружение обходящего город Эш-Со-Сюр обводного туннеля, который повысит общую пропускную способность реки в излучине в прямой видимости от города.

### Литература

- [1] Lazaro, Ph.; Toussin, G.: Flood relief project at Esch-sur-Sure. 3rd International Symposium on Integrated Water Resources Management – Bochum, Germany 2006.

### Авторы

**Philippe Lazaro, Dip. Civil Eng. EPFL**  
Lombardi Engineering Ltd.  
Via R. Simen 19, CH-6648 Minusio-Locarno  
philippe.lazaro@lombardi.ch

**Guy Toussin, Dip. Civil Eng**  
**Gilles Didier, Dip. Civil Eng**  
Division des Ouvrages d'Art,  
Administration des Ponts et  
Chaussees – Luxembourg  
43, bd G.-D. Charlotte, L-2018 Luxembourg  
guy.toussin@pch.etat.lu  
gilles.didier@pch.etat.lu

**Sebastien Erpicum, Ph.D.**  
University of Liege –  
ArGenCo – MS2F – HACH  
Laboratory of Hydraulic Constructions  
B52 / 3 – 1 Chemin des Chevreuils  
B-4000 Liege  
s.erpicum@ulg.ac.be