

ПЕРЕСМОТР МЕХАНИЗМА НАЧАЛА ОБРУШЕНИЯ ПЛОТИНЫ ТИТОН¹

Проф., д-р наук Дж. А. Ленардс², инж. Л. У. ДЭВИДСОН³

Реферат Обзор механизмов, предложенных ранее для объяснения обрушения плотины Титон, показывает, что они не охватывали полностью все имеющиеся данные. На основании их анализа предложен механизм начала обрушения, который удовлетворяет всем имеющимся данным; представлены результаты лабораторных испытаний, подтверждающие этот механизм. Перечислены уроки, которые следует извлечь из этого обрушения.

ВВЕДЕНИЕ

Плотина Титон обрушилась 5 июня 1976 г. Это было первой катастрофой за 74-летнюю историю Бюро мелиорации по строительству плотин. За всю историю плотиностроения Титон—наиболее высокая насыпная плотина среди катастрофически разрушившихся плотин. Эти факты приводят к мысли, что за гибель плотины ответственно уникальное сочетание факторов и что полное выявление механизма обрушения может внести важный вклад в современное состояние науки в этой области. Обрушение было официально изучено двумя группами ученых: Независимой группой специалистов (НГ) и Внутренней обследовательской группой (ВГ). НГ состояла из девяти инженеров, пользующихся международным признанием, которые по завершении исследования в короткий шестимесячный срок опубликовали замечательный отчет (Independent..., 1976). ВГ была составлена из представителей пяти федеральных агентств, занимающихся строительством плотин; они опубликовали два отчета—первый в апреле 1977 г. (US..., 1977) и второй в январе 1980 г. (US..., 1980); последний отчет был составлен после обширных земляных работ на левом примыкании плотины. Обзор данных, содержащихся в этих трех отчетах, с пересмотром затронутых факторов был представлен Десятому международному конгрессу по механике грунтов в 1981 г. и опубликован в его трудах (Seed, Duncan, 1982). К чему тогда снова рассматривать эту катастрофу?

Плотина Титон разрушилась весьма быстро, до того, как уровень воды в водохранилище при первом заполнении достиг порога водослива. Считается, что этому способствовали закупорка открытых

¹ Доклад, представленный Международной конференции по случаям из практики геотехнического строительства в Сан-Луисе, шт. Миссури, в мае 1984 г. (G. A. Leonards, L. W. Davidson, Reconsideration of failure initiating mechanisms for Teton dam, Proc., Intern. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, May 1984). Пер. с англ. Л. Н. Багдасаряна под ред. проф. Г. И. Тер-Степаняна.

² Профессор Школы гражданского строительства университета Пардью, Уест-Ла-файет, шт. Индиана, США.

³ Инженер-строитель, контролер отдела насыпных плотин, Бюро мелиорации, Денвер, шт. Колорадо, США.

трещин в коренных породах и фильтрация через зону I материала ядра и что при строительстве следовало уделить больше внимания этим конструктивным особенностям. Однако нет единодушного мнения в отношении механизма начала обрушения; отсюда нет уверенности в том, что эти меры обязательно предотвратили бы катастрофу. Более того, если бы истинный механизм обрушения был понят, меры по защите от будущего обрушения были бы осуществлены более надежно и при более низких затратах. По этой причине важно вернее установить механизм, вызвавший начало обрушения.

В статье дается обзор возможных механизмов, постулированных в предыдущих публикациях; особое внимание уделяется их эволюции и все увеличивающемуся числу извлекаемых из них уроков. Два новых механизма начала обрушения были предложены в отчете НГ в 1980 г., и еще четыре были выдвинуты Сидом и Дунканом в 1982 г. По нашему мнению, ни один из постулированных ранее механизмов обрушения не подтверждается полностью всеми имеющимися данными. В соответствии с этим предлагается механизм обрушения, который выдерживает такую проверку и подтверждается результатами опытов, специально проведенных для установления правильности данного механизма. В заключение к предложенному ранее списку добавляются новые выводы, которые имеют важное значение для улучшения проектирования земляных плотин и практики строительства.

ОБЗОР ВЕРОЯТНЫХ МЕХАНИЗМОВ ОБРУШЕНИЯ

Общее обсуждение

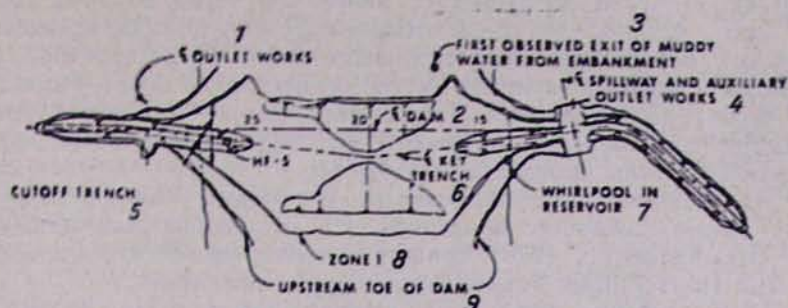
Невозможно, да и нет необходимости детально рассматривать в данной работе условия строительной площадки, конструктивные особенности и избранную конфигурацию плотины, а также последовательность событий, предшествовавших обрушению, так как отличная сводка всех этих фактов уже имеется (Seed, Duncan, 1982); для общей ориентации на рис. 1 представлены план и профиль вдоль оси плотины. В частности, отмечено геометрическое сходство траншей замка (key trench) в примыканиях. Исходя из того, в каком месте на низовой грани плотины был замечен впервые выход мутной воды, а также из характера развития обрушения и местонахождения водоворота, развившегося в водохранилище перед разрушением, можно сделать вывод, что обрушение началось в траншее замка около пикета 14+00, приблизительно у отметки 5200⁴.

О приемлемости предложенного механизма обрушения можно судить исходя из того, насколько удовлетворительно он объясняет следующие наблюдаемые факты.

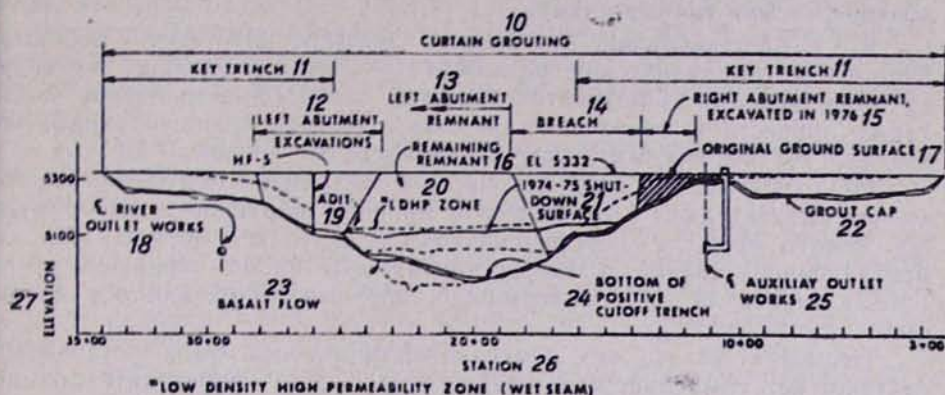
1. Обрушение имело место только на правом примыкании. Земляные работы на левом примыкании не выявили никаких доказательств того, что существовала угроза обрушения из-за внутренней эрозии или что имела место восходящая суффозия (piping), хотя размеры и частота открытых трещин в породе траншей замка левого примыкания были такими же мощными, как и правого. Таким образом, в правом примыкании должно было существовать какое-нибудь другое слабое место, отсутствовавшее в левом. Ни один из постулированных механизмов обрушения до сих пор не пытался установить его природу.

2. Обрушение произошло за исключительно короткий промежуток

⁴ Отметки и пикеты даны в футах.



(A) PLAN OF KEY TRENCH
AND CUTOFF TRENCH



(B) PROFILE ON CENTERLINE CREST
OF DAM (LOOKING DOWNSTREAM)

Рис. 1. Плотина Титон: А) план траншей замка и завесы; 1—центральная линия выпускных сооружений; 2—центральная линия плотин; 3—место, где впервые замечен выход мутной воды из насыпи; 4—центральная линия водослива и вспомогательных выпускных сооружений; 5—траншея завесы; 6—центральная линия траншей замка; 7—водоворот в водохранилище; 8—зона I; 9—верховая пята плотин; В) профиль по центральной линии гребня плотин (вид—вниз по течению); 10—цементационная завеса; 11—траншея замка; 12—земляные работы на левом примыкании; 13—остатки левого примыкания; 14—обрушение; 15—остатки правого примыкания, открытые в 1976 г.; 16—оставшиеся остатки; 17—первоначальная поверхность грунта; 18—центральная линия речных выпускных сооружений; 19—штольня; 20—зона низкой плотности и высокой проницаемости (влажная прослойка); 21—поверхность закрытия в 1974—75 гг.; 22—цементационная шапка; 23—поток базальта; 24—нижний конец достоверной траншеи завесы; 25—центральная линия вспомогательных выпускных сооружений; 26—пикеты в футах; 27—отметки в футах.

Նկ. 1. Տիտոնի ամրագրակը. А) փականի և վարագույրի խրամատների համակարգիչը. 1—բացթողի կառույցների կենտրոնագիծը, 2—ամրագրակի կենտրոնագիծը, 3—այն տեղը, որտեղ առաջին անգամ նկատվել է պարզաբերց պղտոր ջրի կլոր, 4—ջրթողի և օժանդակ բացթողի կառույցների կենտրոնագիծը, 5—վարագույրի խրամատը, 6—փականի խրամատի կենտրոնագիծը, 7—ջրպտույտը ջրամբարում, 8—զոտի 1, 9—ամրագրակի վերին հենահիմք: В) պրոֆիլն ըստ ամրագրակի զագարի կենտրոնագիծի. տեղը՝ հոսանքն ի վար. 10—ցնմենտացման վարագույր, 11—փականի խրամատը, 12—հողային աշխատանքների ձախ հարմում, 13—ձախ հարման մնացորդները, 14—բալրայում, 15—1976 թ. փորված աչ հարման մնացորդները, 16—մնացած մնացորդները, 17—զոտների սկզբնական մակերևույթը, 18—զետային բացթողի կառույցների կենտրոնագիծը, 19—բովանքը, 20—փորը կառույցի և բարձր թափանցելիության զոտի (խոնավ շերտ), 21—1974—75 թթ. փակման մակերևույթը, 22—ցնմենտացման ժամկետը, 23—բազալտի հոսքերը, 24—փականի խրամատի իրական ստորին ծալքը, 25—օժանդակ բացթողի կառույցների կենտրոնագիծը, 26—պիկետների ստանդարտներով, 27—նիշերը ստանդարտներով:

времени. Плотина разрушилась менее чем через 50 дней после того, как вода впервые достигла отметки 5200, где, как предполагается, началось обрушение. Вероятно, вода достигла достаточной для восходящей суффозии отметки всего за несколько дней (возможно даже часов) до обрушения. Таким образом, в объяснение причин обрушения должны быть включены факторы, позволившие, чтобы разрушение плотины произошло так быстро.

Рассмотрим постулированные механизмы обрушения в свете двух вышеизложенных критериев. На основании полученных данных НГ (Independent..., 1976) пришла к заключению, что наиболее вероятными триггерными механизмами обрушения были:

1) «... течение воды через незащищенное и легкоразмывающееся заполнение траншей замка, по трещинам в незаделанной породе непосредственно под цементационной шапкой (grout cap) и около пикета 14+00 и последующее развитие эрозионного туннеля поперек основания насыпи траншей замка»;

2) «...растрескивание, вызванное дифференциальными деформациями или гидравлическим разломом (hydraulic fracturing) материала ядра, которым заполняется траншея замка. Это дробление могло также привести к появлению каналов в насыпи траншей замка, что сделало бы возможной быструю внутреннюю эрозию».

НГ отметила, что хотя их описание механизма обрушения не выявляет окончательно специфической причины обрушения, выбор нужно делать между «...несовершенной цементацией породы под цементационной шапкой и растрескиванием в насыпи траншей замка (около пикета 14+00), а возможно, обрушение вызвали обе причины».

Несмотря на то, что цементационная завеса была установлена искусно, нет сомнений, что течение воды могло происходить под цементационной шапкой через открытые трещины в породе и «окна» в цементационной завесе. Однако для того чтобы восходящая суффозия могла начаться со дна насыпи траншей замка и создать эрозионные туннели через основание траншей замка, в нем должны были быть открытые трещины (Independent..., 1977, рис. 12—4, с. 12—8).

Дэвидсон лично наблюдал дно левой траншей замка после ее вскрытия; он подтверждает, что никаких открытых трещин в траншее замка не было видно. Это же утверждают другие члены Бюро, которые были на месте происшествия. В основании имелись трещины, через которые могла просачиваться вода, однако просветы были не больше, чем в допустимых фильтрах. Поскольку имеются убедительные свидетельства того, что в дне левой траншей замка не было открытых трещин и правая траншея замка была в лучшем состоянии, чем левая (см. показания полевого персонала Бюро; US Dept..., 1977, с. С-14—С-22), то постулат НГ о том, что обрушение началось с восходящей суффозии через открытые трещины в дне траншей замка и последующего развития эрозионного туннеля через основание насыпи траншей замка, не подтверждается.

Несомненно, в низовых и верховых стенках траншей замка имелись открытые трещины, вызванные дифференциальными деформациями в материале ядра, заполнившего траншею замка, которые могли легко развиваться в эрозионные туннели, проходящие через насыпь траншей замка, что привело бы к быстрому обрушению плотины. Однако тщательное изучение откосов обоих примыканий и траншей замка, сравнительная оценка качества насыпей, возведенных на двух участках, и возможности неравномерного нагружения из-за раз-

последовательности возведения сооружения (или сейсмической активности), не дают никакого основания поддерживать предположение о том, что правое примыкание имело больше тенденций к дифференциальной осадке, чем левое. Так как «во время земляных работ при строительстве левой дамбы никаких трещин, вызванных дифференциальным оседанием насыпи, не обнаружено», маловероятно, чтобы этот механизм был одной из основных причин обрушения (US Dept., 1980, с. 7—1).

После обрушения на карту была нанесена открытая трещина (№ 172), которая пересекала основание траншеи замка по диагонали между пикетами 14+64 и 14+83 (Independent..., 1976, с. E—7). В этой зоне большая часть цементационной шапки была унесена огромным потоком вытекшей воды. Так как инспекторы доложили, что открытые трещины на дне траншеи замка были заделаны, мы полагаем, что заполнение трещины № 172 также было унесено водой.

Альтернативным объяснением развития трещин в насыпи траншеи замка является гидравлический разлом (ГР). Независимая группа обосновывала вероятность этого механизма обрушения следующим:

1. Опыты на ГР были проделаны в скважинах, пробуренных в уцелевшей части левой дамбы для определения давления воды, необходимого для того, чтобы вызвать разлом.

2. Для определения соответствующего распределения напряжений в дамбе были проведены анализы методом конечных элементов (МКЭ). Были отобраны такие параметры зависимости между напряжением и деформацией грунта, которые верно предсказывали бы результат опытов на ГР в скважинах.

3. Полученные таким образом параметры были использованы в анализе МКЭ для оценки распределения напряжений в той части плотины, где, как предполагается, имело место обрушение, и для определения вероятности того, что ГР мог вызвать образование трещин, которые могли развиваться в ядре плотины из-за давления воды на верховой грани.

На этом основании НГ пришла к заключению, что ГР является одним из трех наиболее вероятных механизмов обрушения. Мы не согласны с подобным заключением по следующим причинам:

1. В октябре-ноябре 1976 г. НГ запланировала пробурить три скважины в уцелевшей части левой дамбы для опытов на ГР. Бурение одной скважины (HF—6) было прекращено из-за возникших трудностей; во второй скважине (HF—7) гидравлический разлом не имел места, даже когда она была наполнена до наибольшей отметки 5318.5 (максимальная отметка—5302). Трудности, с которыми столкнулись при бурении третьей скважины (HF—5), подробно описаны Дэвидсоном (Davidson, 1978). Бурение велось буровой коронкой и чистой водой на участке, показанном на рис. 1. На глубине ~31 м (отметка 5212) вся буровая вода исчезла. Пробурили еще ~15 м, при этом в скважину накачали ~16000 л воды, которая также исчезла в течение часа. В скважине были установлены обсадные трубы, а кольцеобразное пространство у забоя скважины было герметизировано цементным раствором на высоту ~0,6 м. Далее при помощи коронки меньшего диаметра и давления воздуха было пробурено еще ~12 м, из-за чего герметизация обсадных труб нарушилась. Позже были установлены и закупорены новые внутренние обсадные трубы, однако попытки пробиться глубже отметки 5129 привели к обрушению и заполнению скважины грязью и грязевой водой до от-

метки 5159. НГ пришла к заключению, что разлом имел место при первой потере буровой воды на отметке 5212, и использовала разломный напор в ~ 31 м для обратного расчета методом МКЭ с целью определения параметров зависимости между напряжением и деформацией.

При отрывке левого примыкания в 1977 г. не было найдено никаких следов 16 000 л воды, закачанной в скважину НГ—5 между отметками 5212 и 5163. Не было обнаружено никакой плоскости разлома на отметке, где впервые наблюдалась потеря буровой воды. Учитывая сказанное, нет никаких оснований согласиться с выбором значения разломного напора (fracture head) при обратном расчете параметров зависимости между натяжением и деформацией грунта. Таким образом, надежность всех последующих расчетов, использующих эти параметры, ставится под сомнение.

2. Был проведен двухмерный анализ МКЭ при условии, что свойства грунта изотропны. Крутизна стенок примыкания, анизотропная природа уплотненной глины и чувствительность расчетных боковых напряжений к значениям коэффициента Пуассона давали мало оснований доверять результатам анализа МКЭ. Это тем более справедливо, что расчетное разломное давление для скважины НГ—7 было 310 кПа, в то время как в единственной скважине, пробуренной и испытанной без происшествий, гидравлический разлом не имел места при давлении воды 380 кПа.

Хотя НГ указывала на возможные недостатки расчетов и констатировала, что «критерий начала гидравлического разлома, использованный в данной ситуации, может нуждаться в улучшении», нам кажется, что даже в этом случае было бы по крайней мере столько же оснований сомневаться в адекватности этого механизма обрушения, сколько и для того, чтобы считать его кандидатом номер один.

Ретроспективное тщательное и детальное обследование остатков котлована левой дамбы не выявило никаких свидетельств того, что гидравлический разлом произошел из-за давления воды водохранилища⁵, как предполагалось в отчете НГ. Пока не будет показано, почему ГР должен иметь место в правом, а не левом примыкании, внезапное образование вертикальных трещин в результате ГР, которые быстро прогрессировали бы, образуя непрерывные каналы от верховой стенки траншеи замка к низовой, не может рассматриваться в качестве вероятного механизма обрушения.

Данные, полученные Внутренней исследовательской группой

В своем первом отчете ВГ (US Dept..., 1977) утверждала:

«Наиболее вероятной физической формой обрушения явилось расщепление непроницаемого материала ядра либо из-за гидравлического разлома, либо из-за дифференциальной осадки (differential settlement) в дамбе, вследствие чего началась эрозия».

Этот вывод совпадает со вторым заключением НГ; факторы, вызвавшие сомнение в справедливости этого мнения, уже подробно обсуждались. Далее ВГ продолжает:

«Несколько менее вероятной кажется концепция, согласно которой разрушительная фильтрация началась на контакте зоны I (не-

⁵ Трещины, вызванные бурением с использованием воздушного давления до 105 кПа, действительно наблюдались, но никаких трещин от давления воды водохранилища обнаружено не было.

непроницаемый материал ядра) с поверхностью скальной породы. Открытые трещины в основании примыкания обеспечили прямой доступ воды из водохранилища к непроницаемому ядру с верховой стороны траншеи замка. Вода, текущая через непроницаемое ядро, могла проникнуть в открытые трещины в низовой стороне траншеи замка».

Точное значение приведенной цитаты неясно. Под водой, «текущей через непроницаемое ядро», можно понимать и фильтрацию на границе раздела между дном траншеи замка и насыпью. Учитывая относительно ровную поверхность дна и цементационной шапки в зоне, где началось обрушение, специальное уплотнение, предусмотренное для этого стыка, и заявления руководящего персонала строительной, что все было сделано по проекту (о чем свидетельствуют и сделанные в процессе строительства фотографии), можно заключить, что восходящая суффозия вдоль границы раздела насыпь—скальная опора не могла иметь места, если только гидравлический градиент там был аномально высоким. Примерно на отметке 5200, где, как предполагается, началось обрушение, напор воды в водохранилище при максимальном уровне составил около 32 м, что соответствует максимальному гидравлическому градиенту поперек основания траншеи замка, приблизительно равному 3—4. Градиенты такого порядка на границе раздела ядро—скальная порода многие плотины выдерживали без всяких происшествий.

Вода, протекающая через насыпь траншеи замка от открытых трещин на верховой стенке при максимальном заполнении водохранилища к открытым трещинам на низовой стенке, конечно, могла вызывать эрозию в низовых трещинах. Однако при отрывке траншеи замка левого примыкания не было выявлено случаев, когда поток воды поднимался бы выше, чем до половины насыпи траншеи замка. И опять же, пока не будет показано, что условия в траншее замка при правого примыкания были иными, чем в левом, маловероятно, что обрушение начиналось именно таким образом. Конечно, можно утверждать, что фильтрация могла, в конце концов, происходить через насыпь траншеи замка. Тогда восходящая суффозия, начавшись в трещинах на низовой стенке и прогрессируя, могла промыть канал в верховой стенке, что способствовало бы дальнейшей быстрой эрозии. Это может соответствовать истине, хотя было показано (Wittke, 1985), что восходящая суффозия в открытых трещинах скальной породы будучи медленным процессом должна была послужить сигналом для принятия защитных мер, предотвращающих разрушение плотины. Тем не менее, мы целиком согласны с тем, что отсутствие заделки открытых трещин в скальной породе и фильтров для предотвращения восходящей суффозии явилось серьезной ошибкой в проекте плотины Титон.

В отчете 1977 г. ВГ рекомендовала проведение дополнительных исследований левого примыкания и остатков дамбы. В нем указывалось: «Физические условия левого примыкания весьма похожи на условия правого примыкания. Изучение дамбы и поверхности соприкосновения основания дамбы будет сделано таким образом, чтобы была возможна визуальная инспекция... Исследование в основном будет иметь целью поиск трещин в оставшейся части левой дамбы и выявление данных, подтверждающих наличие эрозионных каналов, проходящих через ядро или в месте соприкосновения зоны I (ядро) с поверхностью скальной породы... Запланированы дальнейшие исследования напряжений *in situ*».

К чести Бюро, эти рекомендации были полностью выполнены. Более 670 000 м³ насыпи дамбы были тщательно открыты и визуальным образом изучены в открытых котлованах, траншеях, штольнях и буровых скважинах. Были проведены дополнительные опыты на гидравлический разлом, проницаемость *in situ*, полевую плотность и влажность; был установлен прибор для мониторинга восстановления скальных пород после деформации; были взяты рекордные образцы (включая блоки размерами 30×30×30 см) для дальнейшего обследования в лаборатории; было проведено дополнительное бурение в траншее замка с получением керна правого и левого примыканий для дальнейшего изучения состояния цементационной завесы. Среди обследований, проведенных после строительства гражданских сооружений, как обрушившихся, так и необрушившихся, это было, пожалуй, наиболее всеобъемлющим. Его результаты представлены во втором отчете ВГ (US Dept., 1980). Были сделаны следующие выводы:

1. Основание левой траншеи замка было относительно гладким и свободным от открытых трещин.

2. Нижние 30—45 см насыпи траншеи замка с верховой стороны цементационной шапки были почти целиком пропитаны водой. Насыпь на контакте с основанием книзу от цементационной шапки вообще не была пропитана водой, но в нескольких местах имело место ее проникновение с верховой стороны в низовую через цементационную шапку. Почти нигде насыпь не была пропитана на всю ширину основания траншеи замка. (Эти суждения основаны на субъективном определении влажности, на измеренной влажности и вычисленной степени водонасыщения. В общем визуальное различать поверхность увлажнения было трудно).

3. Несмотря на то, что в некоторых трещинах в стенках левой траншеи замка, в основном низовой, был обнаружен цементационный материал, оставшийся от обработки поверхности скальной породы, встречалось также много открытых трещин. Одна такая трещина в низовой стенке около 0,9 м высотой и 0,15 м шириной была почти вертикальной.

4. В соответствии с техническими требованиями открытые трещины в стенках траншеи были заделаны материалом насыпи. Материал в трещинах на верховой стенке будучи увлажненным водой водохранилища стал рыхлым. (Однако мы не знаем случая, чтобы размягченный материал проникал в основную часть насыпи в пределах десятка сантиметров).

5. Трещины в породе левого примыкания вне траншеи замка обычно были открытыми, но проникания насыпи в эти трещины не наблюдалось.

6. 19 керновых скважин были испытаны под давлением воды для определения проницаемости цементационной завесы. Потери воды указали, что качество цементационной завесы обеспечивает предотвращение фильтрационных потерь, но что она недостаточно непроницаема для того, чтобы не допустить течь.

7. Были пробурены 3 дополнительных скважины для испытаний на гидравлический разлом методом воздушно-пенного бурения. Бурение, установка обсадных труб и уплотнение испытательных секций были проведены с большой тщательностью. Во всех трех случаях скважины были заполнены водой до верха обсадки, но гидравлического разлома не наблюдалось; во время опытов уровень воды в скважине HF-11 (в траншее замка) был выше уровня воды водохрани-

длины при обрушении на 5,5 м, а в скважинах HF—14 и HF—15 (в центре дамбы)—на 9,15 м.

8. Размыва насыпи не наблюдалось нигде—ни выше, ни ниже цементационной шапки.

9. В насыпи не наблюдалось никаких видимых трещин кроме тех, которые явно были связаны с опытами на гидравлический разлом. Не наблюдалось никакой восходящей суффозии.

Тут стоит остановиться и вспомнить, что главной целью данного обширного исследования были «поиск трещин в сохранившейся части левой дамбы и выявление фактов, свидетельствующих о наличии эрозионных каналов, проходивших через ядро или на контакте зоны I с поверхностью скальной породы» (US Dept..., 1977, с. 105). Фактически ничего подобного не наблюдалось. Однако 5 октября 1977 г. было обнаружено удивительное и до того не наблюдаемое явление: в зоне I у пикета 24+50, расположенного на 46 м выше центральной линии плотины, у отметки 5113, через слой грунта высачивалась вода. О чрезмерной влажности насыпи ничего не было известно. При дальнейших полевых исследованиях было встречено множество таких фильтрационных зон, названных «влажными прослойками» (wet seams). Обнаружение влажных прослоек на левой стороне дамбы позволило сделать предположение, что подобная прослойка на правой стороне могла привести к обрушению плотины. В связи с этим ВГ незамедлительно предприняла тщательное обследование для определения причины, характера, местоположения и значимости влажных прослоек. Невозможно привести здесь даже краткий обзор всех основных выводов; поэтому мы должны ограничиться обсуждением только тех особенностей, которые привели нас к версии механизма обрушения, которую мы считаем наиболее вероятной.

«Влажные прослойки»

Ниже даются характеристики влажных прослоек, наиболее интересные для нашего обсуждения:

а) *Геометрия*. Толщина влажной прослойки, никогда не превышавшая 20 см ($\pm$), обычно составляла не более 10 см. То, что первоначально приняли за одну почти непрерывную влажную прослойку, в действительности представляло собой множество влажных прослоек, локализованных карманов и прерывистых линз. Невозможно существовала связь между влажными прослойками и вариациями процесса уплотнения.

б) *Влажность/плотность*. Влажность *in situ* колебалась от 22,3 до 33,0% и составляла в среднем 28,0%, что на 9,4% больше среднего показателя для всей насыпи в зоне I. Объемный вес сухого грунта *in situ* колебался от 1,32 до 1,54 г/см³ и составлял в среднем 1,44 г/см³, т. е. был на 0,14 г/см³ меньше среднего показателя для всей насыпи в зоне I. Оптимальная влажность грунта по Проктору была выше средней оптимальной влажности для всей насыпи зоны I (19,7%) на 3,1%, а объемный вес в сухом состоянии был ниже среднего максимального объемного веса для всей насыпи зоны I (1,62 г/см³) на 0,08 г/см³. Эти результаты показывают, что:

— Влажность *in situ* намного выше оптимальной, в среднем более чем на 5%, хотя частотное распределение для насыпи зоны I (US Dept..., 1980, с. 4—22) показывает, что при укладке влажность всей насыпи (100%) практически была на 1% меньше оптимальной. Поэ-

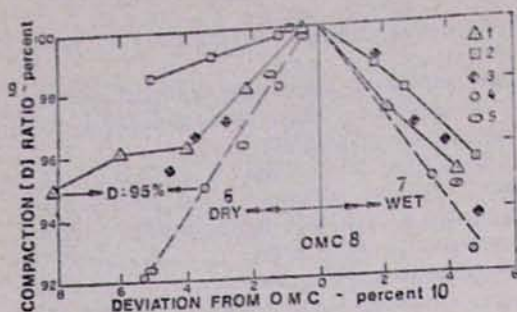


Рис. 2. Отношение уплотнения в зависимости от отклонения от оптимальной влажности для пылеватого грунта из Титона и Небраски: 1—плотина Титон, увлажненный слой ($\gamma_{\max}=1554$ кг м³, $w_{\text{opt}}=22,0$ %); 2—плотина Титон ($\gamma_{\max}=1485$ кг м³, $w_{\text{opt}}=23,7$ %); 3—плотина Титон, зона I ($\gamma_{\max}=1543$ кг м³, $w_{\text{opt}}=21,6$ %); 4—ил Неори, Небраска ($\gamma_{\max}=1685$ кг м³, $w_{\text{opt}}=18,5$ %); 5—Н.рс-Плейт, Небраска ($\gamma_{\max}=1719$ кг м³, $w_{\text{opt}}=17,0$ %); 6—сухой; 7—влажный; 8—оптимальная влажность; 9—отношение уплотнения (D) в %; 10—отклонение от оптимальной влажности в %

Ի՛հ. 2. Խառնման հարաբերությունը խոնավի և ներքախալի փոշխառն գրանդի համար՝ 1—Տիտոնի ամրաբարակ, թրջված շերտ ($\gamma_{\max}=1554$ կգ մ³, $w_{\text{opt}}=22,0$ %), 2—Տիտոնի ամրաբարակ ($\gamma_{\max}=1485$ կգ մ³, $w_{\text{opt}}=23,7$ %), 3—Տիտոնի ամրաբարակ, գոտի I ($\gamma_{\max}=1543$ կգ մ³, $w_{\text{opt}}=21,6$ %), 4—Պեորի արղժ, Նեբր-րասկա ($\gamma_{\max}=1685$ կգ մ³, $w_{\text{opt}}=18,5$ %), 5—Նորի փխլթ, Նեբրասկա ($\gamma_{\max}=1719$ կգ մ³, $w_{\text{opt}}=17,0$ %), 6—չոր, 7—խոնավ, 8—օպտիմալ խոնավություն, 9—խառնման հարաբե-րակությունը %-ով, 10—չեղումը օպտիմալ խոնավությունից %-ով:

тому высокая влажность должна быть приписана инфильтрации уже после укладки насыпи.

— Объемные веса грунта в сухом состоянии in situ и оптимальные плотности по Проктору очень низки по сравнению со средними данными по насыпи зоны I. Это наводит на мысль, что показатели, характеризующие свойства материала во влажных прослойках, отличаются от средних, но так как высокая влажность определяется инфильтрацией после укладки, то могут существовать и другие прослойки, по свойствам схожие с влажными, которые еще не подверглись инфильтрации и поэтому не превратились во влажные прослойки. Таким образом, нет необходимости, чтобы влажная прослойка соприкасалась со скальной породой правого примыкания. Однако не исключено, что траншея замка правого примыкания была заделана материалом, подобным материалу во влажных прослойках.

— Было составлено неправильное суждение о характеристиках уплотнения материала влажных прослоек, и предполагалось, что они в среднем больше похожи на материал зоны I; на самом деле влажность материала при укладке могла быть гораздо ниже оптимальной, допускаемой техническими условиями (более чем на 3,5%).

В результате весьма вероятно, что в плотину как на правом, так и на левом примыканиях были включены слои пылеватого грунта, уплотненные в состоянии значительно суше оптимума. Это наглядно видно из рис. 2, где показано, что пылеватый грунт из Титона может быть уплотнен до $D=95\%$ при влажности более чем на 8% отличающейся от оптимальной в сухую сторону, тогда как илы из Небраски уплотняются до $D=95\%$ при влажности лишь на 3,4% ниже оптимальной.

в) **Водопроницаемость.** Опыты на горизонтальную и вертикальную водопроницаемость проводились на образцах из блоков, вырезанных вручную из насыпи зоны I. На рис. 3 показано соотношение между средней горизонтальной водопроницаемостью и плотностью грунта в сухом состоянии, полученное во время этих опытов. Как правило, водопроницаемость во влажных прослойках на порядок выше, чем вне влажных прослоек. Таковую большую разницу в водопроница-

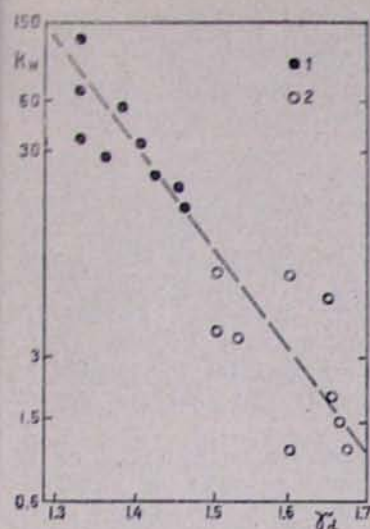


Рис. 3.

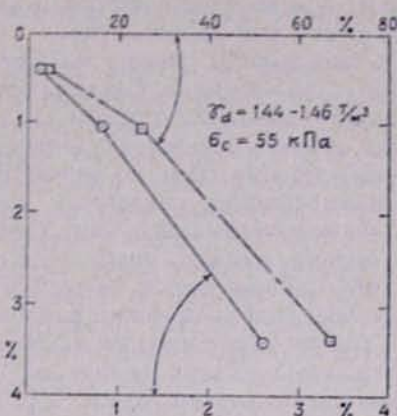


Рис. 4.

Рис. 3. Средний коэффициент проницаемости в горизонтальном направлении в зависимости от плотности в сухом состоянии. Образцы из левого примыкания: 1—«влажные прослойки»; 2—«невлажные прослойки».

Рис. 4. Зависимость оптимальной влажности (ординаты) от уменьшения объема в процентах (нижняя ось абсцисс) и коэффициента просадки (верхняя ось абсцисс); образцы—из «влажной прослойки».

Նկ. 3. Քափանցելիության միջին գործակիցը հորիզոնական ուղղությամբ՝ կախված խտությունից չոր վիճակում: Նմուշները՝ ձախ հարումից. 1—«խոնավ շերտեր», 2—«չոչ խոնավ շերտեր»:

Նկ. 4. Ոպտիմալ խոնավության կախումը օղիմաստների ձավալի նվազումից % -ով (արագիւնների տարրին տասները) և ջրից նստման գործակիցից (արագիւնների վերին տասները): Նմուշները՝ «խոնավ շերտից»:

емости ВГ объясняет в основном различием плотности грунта в сухом и влажном состоянии, а не другими физическими, химическими или минералогическими различиями. Мы понимаем это в том смысле, что образцы из влажных прослоек не только имели меньшую плотность, но и с самого начала при уплотнении содержание воды было в них гораздо меньше, чем оптимальная влажность по Проктору.

г) *Потенциал обрушения.* Три экземпляра нарушенных образцов из влажных прослоек были спрессованы до объемного веса 1.44 г/см^3 (93% максимума по Проктору) при влажности на 0,4, 1,1 и 3,5% ниже оптимальной влажности по Проктору. После выдержки они были быстро консолидированы без увлажнения до 560 кПа, что приблизительно равно предконсолидационному давлению нарушенных образцов из влажных прослоек. Давление 560 кПа поддерживалось в течение 24 ч, после чего образцы были увлажнены. На рис. 4 показано дополнительное сжатие, или «просадка» (collapse), при увлажнении. Просадка при 2,6% считается чрезмерной и нежелательной, так как это, по всей вероятности, может привести к растрескиванию в относительно хрупкой насыпи зоны I.

Данные, полученные ВГ

В 1980 г. ВГ пришла к заключению, что состояние насыпи зоны I подтверждает, что восходящая суффозия могла начаться при следующих физических условиях (US Dept..., 1980): 1) «фильтрации во-

ды водохранилища вдоль поверхности контакта между насыпью и скальной породой или у верхушки цементационной завесы в правой траншее замка» или же 2) «фильтрации воды водохранилища через линзы с низкой плотностью и высокой проницаемостью в правой траншее замка или поблизости».

Эти выводы резко отличаются от выводов, сделанных в отчете 1977 г., и наглядно показывают эволюцию в образе мышления относительно начального механизма обрушения по мере обработки большего объема данных и увеличения времени для изучения всех аспектов обрушения. Тем не менее ВГ продолжает: «Не было обнаружено никаких трещин, связанных с гидравлическим разломом, вызванным водой водохранилища или дифференциальной осадкой насыпи. Однако оценка данных опытов на гидравлический разлом указывает на то, что напряжения в насыпи могли быть достаточно низкими для того, чтобы гидравлический разлом имел место».

Аргументы в пользу нашего мнения о том, что ни вывод 1, ни то, что растрескивание вследствие гидравлического разлома не является вероятными механизмами обрушения, уже были представлены. Хотя мы и предполагали, что плотина обрушилась слишком быстро для того, чтобы объяснить это механизмом, приведенным в выводе 2, он все-таки навел нас на путь, который в конце концов привел к нашему объяснению механизма обрушения.

Данные, полученные Сидом и Дунканом

В ретроспективном обзоре Сиды и Дункана (Seed, Duncan, 1982), включающем несколько важных выводов, выделяется обзор дополнительных исследований на гидравлический разлом, проведенных в Калифорнийском университете (Jaworski, 1979; Jaworski, Duncan, Seed, 1981). В числе предложенных «приемлемых рабочих гипотез», относящихся к возникновению гидравлического разлома, были следующие:

— гидравлическому разлому способствует нарушение непрерывности, как например, буровая скважина, трещина или рыхлый грунт рядом с трещиной в скальной породе, в котором давление воды может вызвать растягивающее напряжение вследствие расклинивающего действия в грунтах;

— гидравлическое разделение может иметь место на границе раздела между грунтом и примыкающим к нему материалом, отличающимся от него (например, бетон или скальная порода), как только давление воды достигнет величины нормального напряжения поперек границы раздела (при условии, что между грунтом и скальной породой нет сцепления).

(Как показали опыты, скорость, с которой растет давление воды, как и размеры зоны, в которой имеют место перераспределение напряжения и изменения во влажности, существенно влияют на давление, которое вызывает разлом).

— ... таким образом давления, необходимые, чтобы вызвать разлом при наполнении водохранилища, в опытах на буровых скважинах могут отличаться от давления воды на ядро плотины.

Сид и Дункан делают следующий вывод: «В результате данных исследований мы приходим к заключению, что гидравлический разлом мог иметь место в траншее замка при фильтрационном и гидростатическом давлении воды под влиянием давления воды при обрушении. Однако обрушение могло произойти только на отдельных

участках насыпи при определенном сочетании ряда факторов: (1) открытых трещин скальной породы; (2) типа грунта; (3) расположения трещин в траншее замка; (4) выводных трещин в скальных породах на низовой грани; (5) условий напряжения *in situ*.

Это может объяснить, почему обрушение случилось около пикета 15+00 и нигде более».

Уже отмечалось, что трещины скальной породы в траншее замка левого примыкания, если уж на то пошло, были более открытыми, чем в правом, и что геометрически обе трещины были по существу идентичны. Не указано ни одной причины, почему тип грунта в траншее замка правого примыкания должен быть более восприимчив к разлому, чем в левой траншее замка. Так как при отрывке левого примыкания не было найдено никаких данных, свидетельствующих о гидравлическом разломе из-за фильтрации воды водохранилища, то аргументация в пользу того, что ГР вызвал обрушение на правом примыкании, не подтверждается. Сид и Дункан (Seed, Duncan, 1982) предложили еще три объяснения причин обрушения, причем во всех трех случаях требовалось, чтобы «вода текла, вызывая эрозию, из открытых трещин на верховой грани (на дне траншей) вдоль дна траншей замка над цементационной шапкой в трещину на низовой грани (на дне траншей)».

Как уже отмечалось, мы полагаем, что вероятность существования таких открытых трещин на дне правой траншеи замка очень мала. Сид и Дункан предложили и четвертый потенциальный механизм обрушения: возможно, в какой-то мере, что в траншее замка правого примыкания имелась влажная прослойка, которая допускала фильтрацию непосредственно через прослойку и связанную с этим внутреннюю эрозию. Этот механизм похож на заключение (2) в отчете ВГ 1980 г. за исключением того, что ВГ не настаивала, чтобы слой с низкой плотностью и высокой проницаемостью с самого начала был влажной прослойкой. Эта возможность будет обсуждена позже.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕХАНИЗМ ОБРУШЕНИЯ

Ниже вновь приводятся основные требования, которым должен удовлетворять механизм, объясняющий обрушение плотины Титон:

1. Правое примыкание должно было быть более слабым по отношению к фильтрационной эрозии, чем левое.

2. Должна была существовать возможность обрушения вследствие фильтрационной эрозии в течение нескольких дней после того, как уровень воды в водохранилище достигнет отметки, достаточной для начала эрозионного действия.

Как только было обнаружено, что в насыпи правой траншеи замка мог образоваться слой, полностью обладающий высокой проницаемостью, а в левой — не мог, сразу стало очевидно, что это можно проверить по результатам опытов по контролю уплотнения. Данные были обработаны на ЭВМ, и были получены результаты опытов на влажность и плотность по всем пикетам. Затем эти данные в соответствии с местоположением пикетов в засыпке траншей замка на обоих примыканиях через каждый ~30-метровый интервал были нанесены на график. Только в одном месте данные указали на непрерывный слой грунта, уплотненный в состоянии суше оптимума (14+00), как показано на рис. 5. Мы полагаем, что этих данных для определенного вывода недостаточно; тем не менее этот примечательный результат

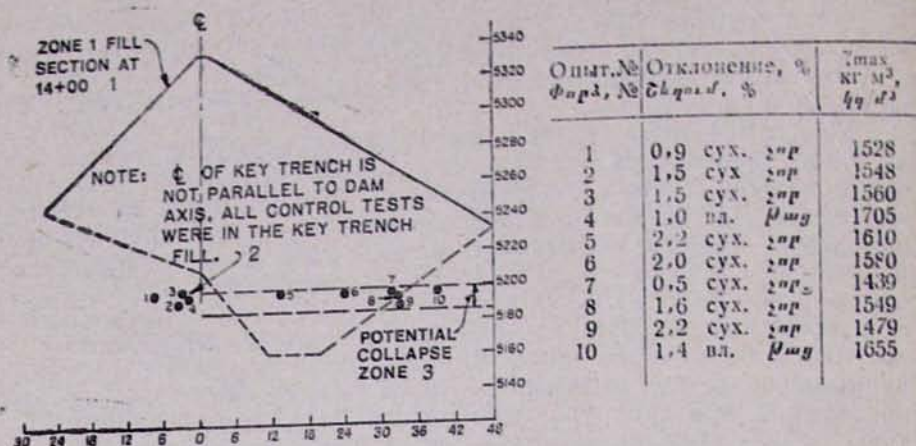


Рис. 5. Результаты опытов на контроль уплотнения между пикетами 13+90 и 14+40 и отметками 5184 и 5198: 1—участок насыпи зоны 1 у пикета 14+00; 2—центральная линия траншеи замка не параллельна оси плотины, все контрольные испытания были проведены в насыпи траншеи замка; 3—зона потенциальной просадки.

Նկ. 5. 13+90 և 14+40 պիկետների և 5184 և 5198 նիշերի միջև խաղցման վերահսկողական փորձարկումների արդյունքները. 1—1 գոտու ամրարտակի տեղամասը 14+00 պիկետի մոտ, 2—փականի խրամատի կենտրոնագիծը զուգահեռ չէ ամրարտակի առանցքին, բոլոր փորձարկումները անց են կացվել փականի խրամատի պատվարում, 3—չրից նստման պոտենցիալ գոտի:

склонил нас к мысли, что вероятность того, что высокопроницаемый непрерывный слой был образован поперек правой, а не левой траншеи замка, выше. Однако, как мы уже отмечали, одного этого недостаточно для объяснения быстрого разрушения плотины, так как (1) для того, чтобы фильтрующаяся вода проникла по всей ширине траншеи замка, требуется время и (2) из-за достаточно малого начального выходного градиента разжиженный грунт попросту проник бы в открытую трещину на низовой грани, а отступающая суффозия всего лишь медленно прокладывала себе путь назад к верховой грани. Мы пришли к заключению, что сочетание этих двух явлений потребовало бы больше времени на обрушение плотины, чем то ограниченное количество дней (возможно—часов), в течение которых плотина обрушилась. Представляется необходимым, чтобы скорость течения воды в низовую трещину с самого начала была настолько высокой, чтобы разжиженный грунт сразу мог быть вымыт, тем самым допуская быстрое образование все увеличивающегося канала. Этому требованию могли удовлетворить заранее образованная трещина или гидравлический разлом. Дилемма, поставленная этим требованием, оставалась нерешенной в течение месяцев, пока однажды Ленардс не вспомнил свои ранние исследования по разрушению уплотненных глин (Leonards, Altschaeffl, 1971). Краткое упоминание «потенциала просадки» в отчете ВГ (обобщенное на рис. 4) оказалось в центре внимания, и стало очевидно, что обрушение сопровождалось (дополнительным) уменьшением нормальных напряжений на дне траншеи замка вследствие арочного эффекта. Таким образом, оседание или «просадка» проницаемого слоя, уплотненного в состоянии суше оптимума и не перекрывающего траншею замка правого примыкания на

есю ширину, позволило, чтобы имел место гидравлический разлом (или отделение) в засышке траншеи замка, что допускало течение из открытых трещин на верховой стенке (с доступом к водохранилищу) к открытым трещинам на низовой стенке.

Это и есть предлагаемый механизм обрушения, который подтверждается всеми имеющимися данными.

Только сочетание проницаемого слоя, обрушивающегося при водонасыщении, и открытых трещин в стенках траншеи замка с доступом к водохранилищу могло обеспечить требуемое отсутствие непрерывности и достаточное уменьшение напряжений на горизонтальных площадках, необходимых для того, чтобы вызвать гидравлический разлом и в результате привести к столь быстрому обрушению плотины.

Мы сразу же решили проверить справедливость нашего предположения путем исследований на крупномасштабной модели в лабораторных условиях, но, к сожалению, не были найдены необходимые средства. Тем не менее были проведены нижеописанные эксперименты.

Как и в предыдущих опытах по потенциалу просадки, образцы уплотнялись в консолидационных кольцах в состоянии суше оптимума. Измеряли компрессию образцов без увлажнения, доводя давление до 550 кПа. Затем образцы увлажнялись, но вместо того чтобы допустить просадку, определялось, насколько можно уменьшить напряжение, необходимое для поддержания приблизительно постоянного объема. После этого допускали, чтобы имела место просадка. Результаты приведены в таблице.

Таким образом, просадка слоя, уплотненного в состоянии суше оптимума (dry side compaction layer) в насыпи траншеи замка в правом примыкании, уменьшала бы вертикальные напряжения посредством арочного эффекта грунта и вызывала бы гидравлический разлом на границе раздела с примыкающей жесткой насыпью. Мы полагаем, что граница раздела между двумя слоями грунта с разной проницаемостью создаст отсутствие непрерывности, вдоль которой и может произойти гидравлический разлом, если даже он изначально не является наименьшей главной площадкой. На это указывает тот факт, что гидравлический разлом, вызванный бурением, при высоких давлениях воздуха создавал только горизонтальные трещины, которые простирались по крайней мере на 8 м, а возможно и более чем на 16 м от буровой скважины⁶.

⁶ После начала испытаний мы узнали о предварительном отчете (Johnson, Pal-merton, 1977), в котором давался обзор к Приложению D отчета ИГ 1976 г. В нем указывалось: «Если аномально сухой слой или слои материала ядра простираются поперек траншеи ядра, то при водонасыщении материал консолидируется гораздо больше, чем окружающий его материал. Это может привести к арочному эффекту на более высоких отметках и, возможно, к образованию горизонтальных каналов. В наиболее вероятном процессе обрушения должен принять участие также гидравлический разлом, так как гидравлический разлом и местное уменьшение объема способствовали бы друг другу».

За исключением требования, чтобы проседающий слой с самого начала имел гораздо большую проницаемость, чем примыкающая насыпь, для обеспечения необходимого отсутствия непрерывной структуры, ведущего к образованию гидравлического разлома, эти утверждения похожи на выводы, которые мы получили после 2 лет трудоемкой работы.

УРОКИ ОБРУШЕНИЯ

Вслед за своим ретроспективным обзором Сид и Дункан перечислили 11 уроков, которые следует извлечь из обрушения плотины Титон. Мы, в основном, согласны со *всеми*, особенно с принципом «множественных линий защиты», который отстаивали Карл Терпани и Артур Казатранде. Отказ от такого подхода, особенно в условиях Титона, был серьезной проектной ошибкой. Этот принцип также подчеркивает важность понимания механизмов обрушения, что является единственным рациональным средством получения оценки соотношения между преимуществами и стоимостью разных предложений «линий защиты». Более того, таким образом можно избежать строительства в условиях, которые, к примеру, могут привести к гидравлическому разлому, или в других нежелательных условиях, если даже приняты меры для предотвращения эрозии от просачивания.

К 11 урокам, приведенным Сидом и Дунканом, мы добавляем следующие:

I. Образцы титонского пылеватого грунта можно уплотнить до такой степени, чтобы величина отношения уплотнения была выше 95%, при влажности более чем на 8% ниже оптимальной влажности по Проктору; отсюда следует, что было бы особенно трудно судить визуально о приемлемости полевого уплотнения. Поэтому частота опытов по контролю уплотнения должна быть выше обычной. В будущем «нормы» частоты опытов по контролю уплотнения не должны без разбора применяться ко всем грунтам.

II. Учитывая серьезность потенциального ущерба, сложность распознавания ошибок визуальной инспекцией и неизбежные случайные отклонения от технических требований, когда дело касается крупных сооружений, спецификация уплотнения грунта в состоянии суше оптимума (до 3,5% ниже оптимальной влажности в Титоне) должна рассматриваться с большой осторожностью.

III. Колебания свойств уплотненных дамб бывают больше, чем обычно можно ожидать. При проектировании и строительстве весьма существенно, чтобы были приняты меры, направленные не столько на уменьшение этих колебаний, что обошлось бы очень дорого, сколько на выявление потенциальных проблем и обеспечение условий, при которых слон с нежелательными свойствами не были бы так велики, чтобы вызвать беспокойство. В Титоне, вероятнее всего, образовался непрерывный слой пылеватого грунта в состоянии намного суше оптимума, которым была заделана траншея замка; в Лейк Шелбивиль обрушение верхового откоса вскоре после заполнения водохранилища приписывалось главным образом тонкой слабой прослойке более пластичной глины (Humphry, Leonards, 1984).

IV. Несмотря на большое количество исследований свойств уплотненных мелкозернистых грунтов, многое еще следует выяснить в а) механике процесса полевого уплотнения, включая способ уплотнения плов и пылеватых глин в состоянии суше оптимума кулачковым катком; б) различиях в свойствах грунтов, уплотненных в полевых и лабораторных условиях, особенно в оптимальной влажности, водопроницаемости и уплотняемости; в) механике гидравлического разлома. Гидравлический разлом потенциально является настолько разрушительным процессом, что вполне заслуживает дальнейшего интенсивного исследования.

V. К плотине Титон была применена методология изучения обрушения, предложенная Ленардсом (Leonards, 1979). Поиск механизма обрушения продолжался, пока не был найден механизм, учитывающий все имеющиеся факты, которые в свою очередь привели к специфическим исследованиям, о которых в иных условиях не стали бы и думать. Результатом этих исследований стало: (а) обнаружение факта, что титонские илы имели необычные характеристики уплот-

Результаты опытов на просадку
Հրկց նստման փորձերի արդյունքները

	Теоретический или из Не- браски, об- разец 60N—642	Влажная про- слойка плотины Титон, образец 51B—328
Պերրիսիան տիգրի ներ- քանակից, նմուշ 60N—642		Տեղան ամրա- տակի խոնավ միջնաշերտը, նմուշ 51 B-328
Характеристики грунта Դրանի բնութագրեր		
Проходит через сито с отверстием 0,074 мм, % Անցնում է 0,074 մմ անցքով մաղից, %	100,0	75,0
Показатель пластичности, % Պլաստիկության ցուցիչը, %	10,0	Непластичный? Ոչ պլաստիկ ⁷
Испытания по Проктору Փորձարկումներ քստ Պրոկտորի		
Макс. плотность в сухом состоянии, кг/м ³ Առավելագույն խտությունը չոր վիճակում, կգ/մ ³	1680	1550
Оптм. влажность, % Օպտիմալ խոնավությունը, %	18,5	22,0
Условия уплотнения Խտացման պայմաններ		
Плотность в сухом состоянии, кг/м ³ Խտությունը չոր վիճակում, կգ/մ ³	1550	1480
Влажность, % Խոնավություն, %	13,5	17,0
Отношение уплотнения (D), % Խտացման հարաբերությունը (D), %	92,2	95,4
Осевая деформация Առանցքային դեֆորմացիա		
Уплотнение без увлажнения при 0—550 кПа, % Խտացում խոնավացման ժամանակ 550 կՊա պահին, %	3,3	2,9
Уплотнение при увлажнении при 550 кПа, % Խտացում խոնավության ժամանակ 550 կՊա պահին, %	3,9	0,3
Коэффициент просадки, % Հրկց նստման գործակիցը, %	118,0	11,0
Опыты с «ограничением» Փորձեր «սահմանափակումներով»		
Уменьшение напряжения при увлажнении, % Հարման նվազումը խոնավացման ժամանակ, %	39,0	15,4
Осевая деформация при «ограничении» ⁸ , % Առանցքային դեֆորմացիա «սահմանափակման» ¹⁰ ժամանակ, %	1,4	0,2
Отношение напряжение «ограничения» / напряжение увлажнения, % «Սահմանափակման» լարում / խոնավացման լարում հարա- բերությունը, %	36,0	67,0

⁷ Более пластичного образца из влажных прослоек для опытов не было.

⁸ Из-за допусков в соединениях приборов.

⁹ Ավելի պլաստիկ նմուշ խոնավ միջնաշերտերից փորձերի համար չկար.

¹⁰ Սարքերի միացումներում թուլաստիկության պատճառով.

нения в состоянии суше оптимума (рис. 2); (б) направленное изучение данных контроля уплотнения для определения возможного существования непрерывного слоя в траншее замка с материалом, уплотненным в состоянии суше оптимума (рис. 5); (в) специальные опыты на измерение уменьшения напряжения, связанного с просадкой при увлажнении (таблица).

VI. Каждое последующее исследование обрушения плотины Тетон вносит определенный вклад в наше понимание поведения земляных плотин. Это указывает на то, что еще многому можно научиться из ретроспективных анализов обрушений в свете современных знаний. Было показано, что не следует удовлетворяться уроками прошлых исследований обрушений (Leonards, 1982). Национальное агентство, которое имело бы возможность проводить экспертизы и располагало необходимыми средствами для таких длительных исследований, принесло бы большую пользу как гражданскому строительству, так и обществу в целом.

Мы выражаем свою благодарность Сунилу Шарма—ассистенту университета Пардю, который составил программу обработки данных по соотношению влажность/плотность при строительстве и составил график по всем пикетам, а также Т. И. Меткалфу, А. А. Бенавидесу и Б. Уилсону, которые провели для нас все опыты на «просадку».

ՏԻՏՈՆԻ ԱՄԲԱՐՏԱԿԻ ՔԱՅՔԱՅՈՒՄՆ ԱՌԱՋԱՑՐԱՅ ՄԵԽԱՆԻԶՄԻ ՎԵՐԱՆԱՅՈՒՄԸ¹

Պրոֆ. ԶԵՐԱՎԻ Ա. ԼԵՆԱՐԴՍԻՍ², ԻՆՃԵՆԵՐ-ԴԻՃԱՐԱՐ ԼՅՈՒԹԵՐ Վ. ԴԵՎԻԴՍՈՆ³

Թեթևառ—նախկինում առաջարկված Տիտոնի ամրաբառակի բայրայման մեխանիզմների ամփոփումը ցույց է տալիս, որ դրանք ամրադաշտայն չեն հաստատվում առկա տվյալներով: Ելնելով այդ մեխանիզմների վերլուծությունից՝ առաջարկվում է բայրայման մի մեխանիզմ, որը լիովին բավարարում է բոլոր առկա տվյալները: Ներկայացված են այդ մեխանիզմը հաստատող լաբորատոր փորձարկումների արդյունքները: Թվարկված են բայրայման լրացուցիչ դասերը:

RECONSIDERATION OF FAILURE INITIATING MECHANISMS FOR TETON DAM¹

GERALD A. LEONARDS², Prof., LUTHER W. DAVIDSON³, C. E.

Synopsis. A review of failure mechanisms previously suggested for Teton dam indicated that they were not fully supported by all the available data. The original mechanisms are reviewed and a failure initiation mechanism is then proposed which does satisfy all the available data; laboratory tests supporting this mechanism are presented. Additional lessons to be learned from the failure are listed.

¹ 1984 թ. մայիսին Սան Լուիսում (Միսսուրի նահանգ) կայացած Գեոտեխնիկական կառուցման պրակտիկայում տեղի ունեցած զեպրերին նվիրված միջազգային կոնֆերանսին ներկայացրած զեկուցում:

² Պարզուրի համալսարանի (Ուեստ Լաֆայետ, Ինդիանա նահանգ, ԱՄՆ) Քաղաքացիական շինարարության դպրոցի պրոֆեսոր:

³ Լցնովի ամրաբառակների բաժնի հսկիչ, Մեկտրացիայի բյուրո, Դենվեր, Կոլորադո նահանգ, ԱՄՆ:

⁴ A paper presented to the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, May 1984.

⁵ Professor, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana.

⁶ Supervisory Civil Engineer, Embankment Dams Branch, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.

ՊՐԱԿԱՅԻՆ ԼԻՏԵՐԱՏՈՐԱ—LITERATURE—REFERENCES

- Davidson L. W. 1978. Hydraulic Fracture in Embankment Dams, paper presented at the annual meeting of ASCE, Chicago, Ill.
- Humphry D. N., Leonards G. A. 1984. A Slip in the Upstream Slope of Lake Shelbyville Dam, Special Report, St. Louis District, Corps of Engineers. In Press.
- Independent Panel to Review Cause of Teton Dam Failure, 1976. Failure of Teton Dam. Report to U. S. Department of the Interior and State of Idaho, Dec.
- Jaworski G. W. 1979. An Experimental Study of Hydraulic Fracturing, Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil Engrg., University of California, Berkeley, Calif.
- Jaworski G. W., Duncan J. M., Seed H. B. 1981. Laboratory Study of Hydraulic Fracturing. — J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol. 107, No. GT6, June, p. 713—732.
- Johnson S.J., Palmerton J. B. 1977. Draft Review of Appendix D, Report of the Independent Panel to Review Cause of Teton Dam Failure. Hydraulic Fracturing and its Possible Role in the Teton Dam Failure, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Leonards G. A. 1979. Discussion of paper, «Foundation Performance of Tower of Pisa», by J. K. Mitchell, V. Vittrai, and T. W. Lambe, — Journal Geotechnical Division, ASCE, Vol. 105, No. GT1 (Jan.), p. 95—105.
- Leonards G. A. 1982. Investigation of Failures. — Journal, Geotech. Engrg. Division, ASCE, Vol. 108, No. GT2, p. 187—246.
- Leonards G. A., Altschaeffl A. G. 1971. Discussion of «Review of Collapsing Soils», by J. H. Dudley. — Journal Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No. SM1, (January), p. 269—271.
- Seed H. B., Duncan J. M. 1982. The Teton Dam Failure. — A Retrospective Review. Proc. Tenth Intern. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Stockholm, vol. 4, p. 219—238.
- Turnbull W. J. 1942. Investigation, Design and Construction of Jeffrey Dam. Thesis, presented to the Faculty of the Graduate College of the University of Nebraska in partial fulfillment of the requirements for the Professional Degree of Civil Engineer.
- U. S. Department of the Interior Teton Dam Failure Review Group, 1977. Failure of Teton Dam, A Report of Findings, Apr.
- U. S. Department of the Interior Teton Dam Failure Review Group, 1980. Failure of Teton Dam, Final Report, Jan.
- Wittke W. 1985. Erosionserscheinungen bei der Gründung von Staudämmen im Bundsandstein, Bautechnik, Spec. issue «6th Nat. Rock Mech. Symp., April 1984», p. 165—176.