ГИДРАВЛИКА. ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.824

Н.А. Анискин, А.С. Антонов
ФГБОУ ВПО «МГСУ»

ОПЫТ И ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ В РОССИИ

Проведен анализ существующих грунтовых плотин, построенных в суровых климатических условиях за последнее столетие. Рассмотрены случаи аварий и выходов сооружений из строя. Сделаны выводы о необходимости более тщательного изучения фильтрационного потока и температурного режима грунтовых плотин.

Ключевые слова: фильтрация, грунтовые плотины, вечная мерзлота, температурный режим.

Необходимым конструктивным элементом для водохозяйственного использования рек являются водоподпорные гидротехнические сооружения или плотины. Как показала мировая [1, 2] и отечественная практика [3, 4], в условиях сурового климата (вечная мерзлота, низкие температуры, большие амплитуды колебания температуры воздуха) наиболее целесообразным типом водоподпорного сооружения являются грунтовые плотины. Они могут быть разделены на две основные группы: плотины с мерзлотной завесой (не фильтрующие) и плотины без мерзлотной завесы (талые или фильтрующие) [4].

N.A. Aniskin, A.S. Antonov

EXPERIENCE AND PROBLEMS OF EARTH DAM CONSTRUCTION AND EXPLOITATION IN SEVERE CLIMATIC CONDITIONS IN RUSSIA

Hydraulic engineering constructions or dams are necessary constructive elements for river development. In severe climatic conditions (deep-frozen soil, low temperatures, high amplitudes of temperature fluctuations) the most expedient type of water retaining constructions are soil dams.

In our paper we have examined economic conditions of the region with severe climate, available water resources and their development. We made the conclusions concerning preference for building reservoirs on the territory of Siberia. A two-century period, beginning with the first soil dams in the end of the 18th century, was considered for the building analysis.

Our attention has been mainly focused on structures, engineering decisions and causes of accidents, which took place in operating cycle period. The results showed the importance of investigation of filtration and temperature regimes, as well as their collaboration in hydro technical structures design and operation.

Key words: filtration, soil dams, deep-frozen soil, temperature mode.

Hydraulic engineering constructions or dams are necessary constructive elements for river development. The world [1, 2] and domestic practice [3, 4] shows, that in severe climatic

© Анискин Н.А., Антонов А.С., 2014

Первые сведения о строительстве в этом регионе плотин из грунтовых материалов относятся к концу XVIII в. Одна из таких конструкций — грунтовая плотина на р. Мыкырт в г. Петровске-Забайкальском, построенная в 1792 г. для создания водохранилища хозяйственно-питьевого назначения. Длина плотины по гребню — 910 м, высота — 9,5 м. Плотина была возведена из тяжелых супесей и имела деревянный водосброс. С целью промораживания тела плотины и сохранения его при эксплуатации в мерзлом состоянии она строилась в течение семи зимних периодов. Около 140 лет плотина эксплуатировалась успешно, но во время ремонтных работ по водосбросу (1929 г.), начатых в теплое время года, был нарушен температурный режим основания водосброса, и по оттаявшим грунтам началась фильтрация. Дальнейшая эксплуатация стала возможной только после полной перестройки плотины.

Во время строительства Забайкальской и Амурской железных дорог (1912—1916 гг.) были возведены грунтовые низконапорные плотины для создания небольших водохранилищ хозяйственно-питьевого назначения. В этот период были возведены плотины на реках Амазар, Могоча, Урка, Чичатка для водоснабжения железнодорожных станций. После заполнения водохранилища, плотина на р. Амазар, построенная для водоснабжения станции Могоча, начала фильтровать, и в теле плотины образовались промоины. Уменьшить фильтрационный расход удалось только с созданием траншеи по всей длине плотины для промораживания массива (рис. 1).

conditions (deep-frozen soil, low temperatures, high amplitudes of temperature fluctuations), the most expedient type of water retaining constructions are soil dams. They can be divided into two main groups: dams with deep-frozen soil screen (non filter) and dams without deep-frozen soil screen (dam in loose staff or tabel dams) [4].

The first data on soil dams construction in this region refer to the end of the 18th century. One of the first constructions was a soil dam on the river Mykyrt in Petrovsk-Zabaykalsk, constructed in 1792 for making a drinking reservoir. The crest length was 910 m, the height — 9.5 m. The dam was built of heavy sandy loams and had a wooden spillway. The dam had been built within seven winter periods to freeze dam body and to preserve its wintertime operation. The dam has been operating successfully about 140 years, but the repair work of the spillway in warm season in 1929 disturbed the temperature regime, and that gave start to tabel soil filtration. Further operation became possible only after full dam reconstruction.

During Transbaikal and Amur railroad construction in 1912—1916, soil low pressure dams were built for making a drinking reservoir. At that time other water supply systems were also built on the rivers Amazar, Mogocha, Urka, Chichatka for drinking needs of the local railway stations. After reservoir filling, the dam on the river Amazar, constructed for water supply of Mogocha station, started filtering, that resulted in cavities in a dam body. Digging trenches along the dam for massif freezing reduced the discharge of seepage (fig. 1).

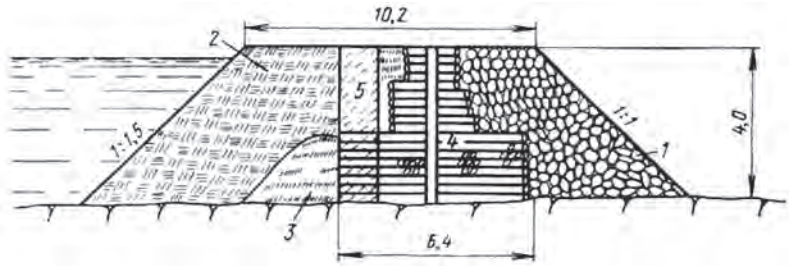

Рис. 1. Временная плотина на р. Амазар: *1* — скальный грунт; *2* — суглинок; *3* — мешки с грунтом; *4* — ряж загруженный скалой; *5* — траншея для промораживания грунта

Fig.1 Temporary dam at the river Amazar: *1* — rocky soil; *2* — суглинок; *3* — soil filled bags; *4* — rock filled crib; *5* — trench for soil freezing

Эта временная плотина была признана неудачной, так как вода постепенно убывала из водохранилища. Постоянная плотина была построена в конце марта 1914 г. В основании плотины залегают скальные грунты, прикрытые плащом аллювиальных отложений, мощностью до 1,5 м. Высота этой плотины 4 м при напоре 2,5 м.

Плотина имеет ряжевую диафрагму, заполненную скальным грунтом. Низовой клин плотины отсыпан из скальных грунтов, а верховой — из глинистых. Такая конструкция была выбрана в результате того, что через гребень плотины должен был производиться сброс паводковых расходов. По оси плотины для предотвращения фильтрации была пройдена траншея, но надежного промораживания тела и основания плотины достигнуть не удалось, поскольку работы велись в период эксплуатации сооружения при наличии напорной фильтрации.

Для водоснабжения железнодорожной станции Амазар была построена плотина высотой 4,5 м. Условия строительства и конструкции плотин были такими же, как и на станции Могоча. Плотина состояла из ряжей в несколько отсеков. Передние отсеки ряжа заполнялись трамбованным суглинком, а задние — камнем. Ряжи были оперты на скалу, для чего потребовалась выемка аллювия на глубину до 2,9 м.

В зимний период значительные объемы воды уходили на льдообразование. Это привело к необходимости строительства во-

This temporary dam was classified unfit because of water falling. The constant dam was constructed at the end of March, 1914. The dam base is embedded with rocky soil covered with alluvial deposits, 1.5 m wide. The dam height is 4 m at the water height of 2.5 m.

The crib coffer dam is rock filled. The downstream slope is made of rocky soil and upstream — of clay. The reason for such construction was that floodwater was spilt over a dam crest. To prevent filtration a trench was made, but dam body and base of dam hadn't been frozen enough because of head filtration during the work.

For water supply of Amazar railway station, 4.5 m high dam was constructed. Building conditions were the same as those at Mogocha station. The dam consisted of cribs with several compartments. Front compartments were filled with rammed loam, and back compartments — with a stone. Cribs were set on the rock that required alluvial dredging 2.9 m deep.

Considerable outflow volumes were spent for ice formation. That demanded constructing

дохранилища большого объема. В то же время бурные летние паводки, несущие с собой наносы и природный мусор, требовали водосброса по всей длине плотины. На рис. 2 приведен поперечный разрез плотины. Она имеет каменную кладку, работающую по всей длине как водослив, на пороге установлены фермы Поарэ.

of spacious reservoirs. At the same time torrential floods with deposits and natural garbage, needed a spillway along the whole way of the dam. Fig. 2 shows the dam cross-section. The masonry works as a spillway with Poare farm on the crest.

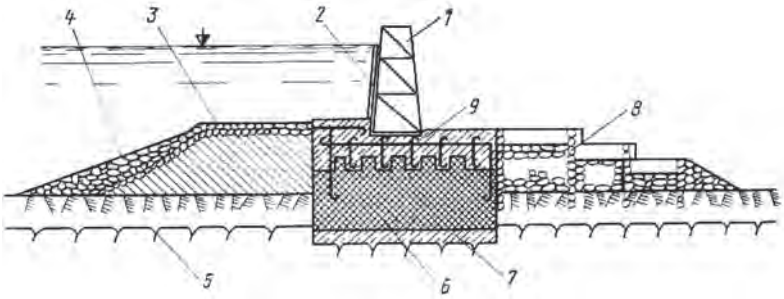

Рис. 2. Водосливная плотина на р. Амазар: *1* — фермы Поарэ; *2* — щиты; *3* — фашинное крепление; *4* — крепление камнем; *5* — скала; *6* — каменная кладка; *7* — бетон; *8* — ряжи, загруженные камнем; *9* — железобетон

Fig. 2. Spillover dam on the Amasar (river): *1* — Poare farms; *2* — shields; *3* — faggot lining; *4* — stone lining; *5* — rock; *6* — masonry; *7* — concrete; *8* — stone loaded cribs; *9* — reinforced concrete

Эксплуатация этих сооружений показала, что вечная мерзлота в основании водохранилищ под воздействием фильтрационного потока быстро оттаивает и, если не предусматривать противофильтрационные мероприятия, возникает фильтрационный поток в основании сооружения.

Как пример возникновения фильтрации по оттаявшим грунтам можно привести плотину на р. Правая Магдагача, построенную в 1932 г. В основании плотины залегают туфы и разрушенные порфириты. Мощность толщи вечномерзлых грунтов в основании плотины колеблется от 25 до 30 м. Бетонная диафрагма в эти породы была заглублена недостаточно, а меры по промораживанию основания не были предусмотрены. В первый год плотина работала удовлетворительно, хотя и наблюдалась фильтрация в основании. Наблюдения за температурным состояни-

Operation practice of these constructions showed that deep-frozen soil in the reservoir base melts quickly because of pressure filtration, and the lack of antiseep actions leads to filtration in dam base.

The dam on the river Pravaya Magdagacha, constructed in 1932 can serve as an example of filtration in tabel soil. In dam base lie tufas and destroyed porphyrites. The thickness of deep-frozen soil in dam base varies from 25 to 30 m. The concrete diaphragm in these rocks was not deep enough, and no freezing actions were taken. During the first year the dam worked well in spite of filtration in the base. Temperature condition of the dam showed that during the first year of operation, the depth of zero isothermal line under the dam was varied: under back of dam it sank 4 m

ем плотины показали, что в первый год эксплуатации нулевая изотерма под плотиной оказалась на разной глубине: под верховым клином она опустилась на 4 м, а под низовым — только на 2,5 м. В результате чего произошла авария.

Похожий случай произошел на р. Большой Невер на плотине длиной по гребню 530 м и высотой 9,6 м, построенной также в 1932 г. для водоснабжения железнодорожной станции Сковородино. Мощность слоя вечной мерзлоты составляет около 90 м. Коренные породы менее трещиноваты, чем в створе плотины на р. Правая Магдагача, прикрыты плащом пылеватых суглинков. Плотина, выполненная из пылеватых суглинков с глинистым ядром, оказалась недостаточно надежной. Сквозь тело плотины пробился фильтрационный поток расходом в 2000 м^3/сут. Организовали перехват потока воды и перекачку ее обратно в водохранилище. Состояние плотины ухудшалось, и для обеспечения ее устойчивости в 1934 г. верховой и низовой откосы были пригружены щебенистыми грунтами. В ядро плотины забили деревянный шпунт на глубину 8 м, а грунт за шпунтом заменили суглинком, уложенным насухо с уплотнением. Фильтрация сократилась, однако оттаивание грунтов основания продолжалось. В 1936 г. нулевая изотерма опустилась на 6…18 м, хотя не было отмечено резкого ухудшения фильтрационных свойств грунтов основания или их деформации. Плотина устойчивости не потеряла.

В 1940—1950 гг. в результате освоения природных богатств крайнего севера происходит интенсивное развитие гидротехнического строительства. К примеру, плотины на ручьях Квадратном и 89-го пикета были построены из талых грунтов. В основании их залегали льдистые супеси и суглинки. Опыт строительства этих плотин оказался неудачным: первая разрушилась после

deep, and under front of dam — only 2.5 m deep. And that lead to an accident.

The similar accident took place on the river Bolshoy Never on the dam with 530 m of crest length and 9.6 m high, constructed also in 1932 for water supply of Skovorodino railway station. The depth of deep-frozen soil layer makes about 90 m. The rock is less crumbling, than in a dam alignment on the river Pravaya Magdagacha, and is covered with dusty loams. The dam made of dusty loams with a clay kernel, was not solid enough. The discharge of filtration flow through a dam body was 2000 m^3/day. The flow was captured and pumped back to the reservoir. The dam condition became worse, and in order to stabilize it in 1934 upstream and downstream slopes were surcharged with gravel. A sheet pile was driven into dam kernel 8 m deep, and the soil behind the pile was replaced with clay loam laid dry packed. The filtration was reduced, however melting of frozen soil in the base proceeded. In 1936 the zero isotherm line fell to 6…18 m though no worsening or deformation of soil filtration properties in the base was detected. The dam didn't collapse.

In 1940—1950 as a result of natural resources exploration in the Far North there was intensive development of hydraulic construction. For example, dams on the streams Kvadratniy and the 89th piket were constructed of melted soil. In their base there were icy sandy clays and loams. The con-

1 месяца, вторая — после 1,5 года эксплуатации. Причиной разрушения обеих плотин явилась фильтрация в правобережном примыкании и в основании, появившаяся вследствие вытаивания ледяных включений в грунтах основания и недостаточно качественного выполнения береговых примыканий плотин.

Но существуют и удачные примеры конструкций плотин этого периода. Например, плотина на ручье Разведочном, построенная в 1942 г., с напором 1,5…2 м (рис. 3). Тело плотины отсыпано из песчаных грунтов, прикрыто торфом и пригружено камнем. Противофильтрационным элементом служил деревянный шпунт. В основании плотины находились супеси с прожилками льда. Водохранилище заполнялось весенним паводком, излишек воды сбрасывался через гребень плотины, поэтому низовой откос сделали более пологим с мощным креплением камнем. В зимний период водохранилище срабатывалось, а тело плотины и ложе водохранилища, оттаивавшие летом, промерзали.

struction of these dams wasn't successful: the first dam collapsed in a month, the second — after 1,5 years of operation. The reason for the destruction of both dams was the filtration in the right-bank adjoining and in the base, because of ice melting in soil base and defective construction of dam abutment.

But there are also examples of good dam construction at that time. For example, a dam on the stream Razvedochniy, which was constructed in 1942 at the height 1.5…2 m (fig. 3). The dam body is made of sandy soil, covered with peat and surcharged with a stone. A sheet pile served as an antiseed element. In dam base there were sandy loams with ice streaks. The reservoir was filled with spring flood, water surplus spilt over the dam crest therefore downstream slope was more flat, masonry lined. In winter the reservoir ran out, while the dam body and the reservoir bed, melting in summer, froze through.

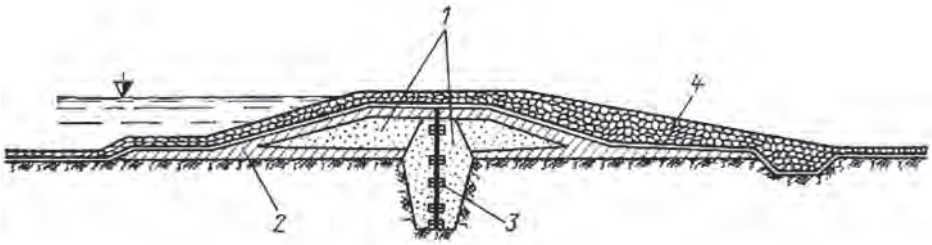

Рис. 3. Плотина на ручье Разведочном: *1* — мелкий песок; *2* — торф; *3* — диафрагма; *4* — крепление камнем

Fig. 3. Dam on the stream Razvedochniy: *1* — fine sand; *2* — peat; *3* — diaphragm; *4* — masonry lining

Другая плотина — на р. Наледной, длиной 65 м и высотой 10 м, построена в 1950—1951 гг. (рис. 4). Она имела воздушную замораживающую систему сооружения из 30 замораживающих колонок.

The other dam — on the river Nalednaya, 65 m long and 10 m high, constructed in 1950—1951 (fig. 4). It had air freezing system made of 30 freezing pipes.

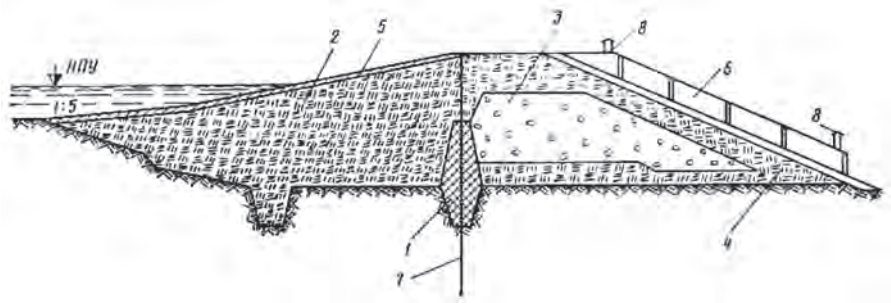

Рис. 4. Плотина на р. Наледной: *1* — ядро из глинобетона; *2* — верховой клин из талого суглинка; *3* — часть низового клина из мерзлых комьев суглинка; *4* — часть низового клина из мерзлых комьев суглинка, уложенная при отрицательной температуре; *5* — одерновка откоса; *6* — деревянный навес; *7* — замораживающая колонка; *8* — вентиляционная шахта

Fig. 4. Dam on the river Nalednaya: *1* — clay concrete dam core; *2* — upstream slope of loam clusters; *3* — part of downstream slope of frozen loam clusters; *4* — part of downstream slope of frozen loam clusters, set at negative temperatures; *5* — slope sodding; *6* — a wooden shed; *7* — a freezing pipe; *8* — an air shaft

В низовой клин плотины укладывался мерзлый грунт с поливом водой. От отепляющего действия снега и прямого солнечного облучения низовой откос защищался деревянным навесом, пространство под которым обдувалось специальным вентилятором. Через 2 года эксплуатации подрусловой талик был проморожен, в основании и низовом клине установились устойчиво отрицательные температуры.

С 1960 г. в Восточной Сибири начинается этап строительства крупных энергетических гидроузлов, таких как Вилюйская, Усть-Хантайская, Колымская ГЭС и др. Вилюйская ГЭС (1963—1970 гг.) была построена в зоне сплошного распространения вечной мерзлоты (мощность толщи вечномерзлых пород более 350 м). Каменно-земляная плотина с экраном из суглинков, переходящим на верхних отметках в ядро, имеет высоту 74,5 м. В основании залегают диабазы (рис. 5). При строительстве плотины была разработана технология работ для укладки грунта при температурах наружного воздуха до –40…–45 °С. По этой технологии было уложено в экран плотины более 500 тыс. м^3 суглинка. Эта технология использовалась и при строительстве других объектов (Усть-Хантайской, Колымской ГЭС и др.).

Watered frozen soil was put to downstream slope, which was protected from snow and direct sun with a wooden shed the space under which was blown by a special fan. After 2 years of operation the underflow talik was frozen, there were stable negative temperatures in the base and downstream slope.

Since 1960 in Eastern Siberia there began the construction of large hydroelectric power systems, such as Vilyuysky, Ust-Hantaysky, Kolyma hydroelectric power stations, etc. Vilyuysky hydroelectric power station (1963—1970) was constructed on deep-frozen soil (more than 350 m thick). Stone soil dam with loam shield, becoming core in upper sections, is 74.5 m high. There are dibasic structures in the base (fig. 5). In dam construction, there was used a new technology for placing soil at temperatures –40…–45 °C. With this technology more than 500 thousand m^3 of loam were laid in dam screen. This technology was used in other objects construction (Ust-Hantayskiy HPP, Kolyma HPP and others.).

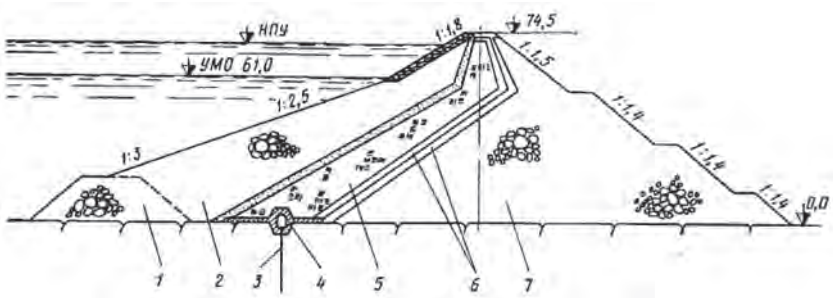

Рис. 5. Каменно-земляная плотина Вилюйской ГЭС: *1* — упорный банкет; *2* — пригрузка; *3* — цементационная завеса; *4* — цементационная потерна; *5* — экран; *6* — обратные фильтры; *7* — упорная призма

Fig. 5. Stone soil dam of Vilyuyskaya HPP: *1* — downstream banked earth; *2* — surcharge; *3* — a cement barrier; *4* — cement footway; *5* — screen; *6* — loaded filters; *7* — a downstream toe

В 1963—1975 гг. проходило строительство Усть-Хантайской ГЭС. В районе сооружения вечномерзлые грунты не имеют сплошного распространения. Русловая каменно-земляная плотина с ядром высотой 65 м (рис. 6) создает водохранилище объемом 23,5 км^3.

In 1963—1975 there was construction of Ust-Hantayskaya HPP. Deep-frozen soils in the construction area are not massive. Run-of-river stone and soil dam with a core 65 m high (fig. 6) makes a reservoir of 23.5 km^3.

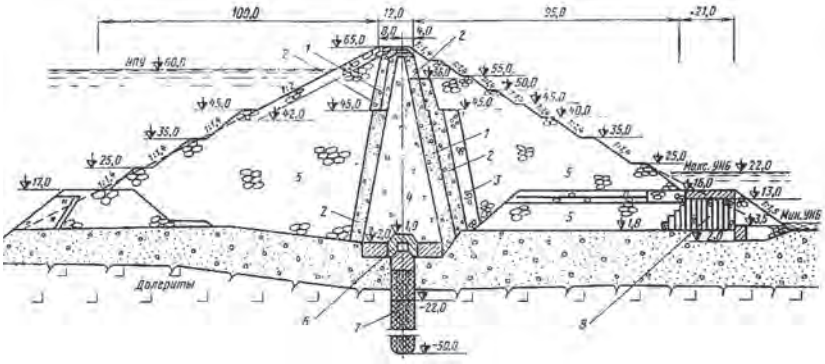

Рис. 6. Русловая плотина Усть-Хантайской ГЭС: *1—3* — фильтры; *4* — ядро из мореного суглинка; *5* — горная масса; *6* — цементационная потерна; *7* — цементационная завеса; *8* — крепление плотины при пропуске паводка

Fig. 6. Run-of-river dam of Ust-Hantayskya HPP: *1—3* — filters; *4* — thin loam dam core; *5* — mined rock; *6* — cement footway; *7* — cement curtain; *8* — dam lining at flood discharge

Упорные призмы плотины были отсыпаны из скальных грунтов. Ядро плотины при зимней укладке промерзало и к заполнению водохранилища было в разнотемпературном режиме. Затем через 6 лет после ввода сооружений в эксплуатацию оно оттаяло.

Downstream dam toes were filled with rocky soil. In winter the dam core set froze through and before reservoir filling was in the mode of different temperatures. Then, 6 years after commissioning, it melted.

Каменно-земляная плотина Колымской ГЭС [6, 7] (строительство проходило в 1970—1994 гг.) высотой 125 м образовала водохранилище объемом 14,6 км^3 (рис. 7). Среднегодовая температура наружного воздуха в районе плотины –12 °С. Минимальные температуры зимой могут достигать –60 °С, а максимальные летом 36 °С. В основании сооружений грунты находятся в вечномерзлом состоянии и оттаивают на 1…1,1 м. Мощность мерзлоты в береговых склонах реки неодинакова: наибольших значений она достигает на левом берегу (200…300 м), а на правом берегу мощность их меньше (25…150 м). Под руслом реки имеется сквозной талик.

Stone and soil dam of Kolyma HPP [6, 7] (constructed in 1970—1994) 125 m high formed the 14.6 km^3 reservoir (fig. 7). Average annual outer temperature around the dam was –12 °C. Winter temperatures go below –60 °C, and maximum summer temperatures rise up to 36 °C. The soil in the base is deep-frozen and melts at a height of 1…1.1 m. The thickness of deep-frozen soil on river slopes is different: it is the biggest on the left bank (200…300 m), and on the right bank the soil is less thick (25…150 m). Under the river bed there is a through talik.

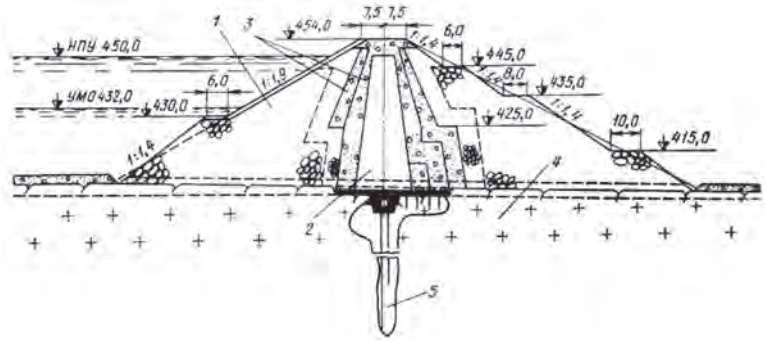

Рис. 7. Каменно-земляная плотина Колымской ГЭС: *1* — каменная наброска; *2* — ядро; *3* — песчано-гравийный фильтр; *4* — гранит; *5* — цементационная завеса

Fig. 7. Stone and soil dam of Kolyma HPP: *1* — rock blanket; *2* — dam core; *3* — sand and gravel filter; *4* — granite; *5* — cement curtain

Сооружения гидроузла расположены на скальных грунтах. Упорные призмы плотины отсыпаются из горной массы без сортировки и специального уплотнения. Ядро плотины запроектировано из суглинков и супесей, а переходные зоны — из естественных песчано-гравийных грунтов и дробленого щебня. Ядро плотины с основанием сопрягается зубом, врезанным в скалу. В зубе предусмотрена потерна для создания цементационной завесы.

После первого наполнения водохранилища в октябре 1988 г. увеличился приток воды в левобережную

Water-engineering constructions are built on rocky soil. Downstream dam toes are filled with mined rock without sorting and special compaction. The dam core is designed of loams and sandy loams, and transitional zones — of natural sand-gravel soil and shredded rubble. The dam core is mated to the base with a toe cut in the rock. In the toe there is a footway for a cement curtain.

After the first filling the reservoir in October, 1988 the inflow of water to left-bank gallery internal monitoring device rose. On October 6—8 there began jet filtration through the cracks in the walls of L-2 gallery section, and on October 18

галерею КИА. 6—8 октября началась струйная фильтрация через трещины в стенах секции галереи Л-2, а 18 октября через раскрытый температурный шов между секциями Л-1 и Л-2 пошел большой поток воды.

Галерея имела уклон в сторону цемпотерны плотины, поэтому вода затопила ее, так как насосы производительностью 300 м^3/ч с притоком не справились. В результате отсечения железобетонными стенками секции Л-2 в ноябре удалось отвести воду из цемгалереи [7].

При наполнении водохранилища летом 1989 г. ситуация повторилась. Максимальный суммарный приток был оценен в 400…450 л/с. За период активной фильтрации было вынесено около 1000 м^3 материала. 30 июня 1989 г. фильтрация снизилась до 30…40 л/с. Это позволило возвести в левобережной галерее КИА мощные бетонные пробки в секциях К-1 и Л-6 для исключения повторения аналогичных ситуаций.

Главной причиной фильтрации плотины явилась низкая эффективность цементационной завесы. «Наращивание» цемзавесы по глубине отставало от темпов снижения границы протаивания скального массива. Это привело к тому, что цемзавеса не доходила до водоупора, и профильтровавшаяся вода попадала через основание в низовую зону плотины, двигалась по фильтрам, обводняя их и постепенно увеличивая напор. В зоне галереи КИА, являющейся препятствием на пути потока, напор увеличивался до 20…25 м и изливался в галерею через раскрытые швы и трещины. Необходимо отметить, что аварийная ситуация произошла из-за недостаточного внимания к температурному режиму основания, а так же неудачной конструкции галерей КИА.

В процессе дальнейшей эксплуатации плотины Колымской ГЭС произошла осадка гребня плотины, достигшая местами величины 1,6 м. В связи с возможным

there was a big water inflow through the expansion joint between the sections L-1 and L-2.

The gallery had a slope to the dam footway, therefore, water flooded it as pumps working with a speed 300 m^3/h did a poor job of the inflow. By cutting off the section L-2 with reinforced concrete walls in November it was possible to dewater the gallery [7].

During the reservoir filling in summer 1989 the situation repeated. The total inflow volume was 400…450 l/s. During an active filtration about 1000 m^3 of the material was taken out. On June 30, 1989 the filtration reduced to 30…40 l/s. It helps to build powerful concrete plugs in the left-bank gallery of internal monitoring device in the sections K-1 and L-6, to except the similar situations.

Low efficiency of the cement curtain was the main reason for dam filtration. Depth growth lagged behind falling of rock mass thaw line. As a result cement curtain didn't reach confining layer, and the filtered water got through the base to the downstream, moved along the filters, flooding them and gradually increasing pressure. In the gallery of internal monitoring device, which obstructed the flow, the pressure increased to 20…25 m and streamed to the gallery through the exposed seams and cracks. It should be noted that the accident took place because of insufficient attention to a temperature mode of the base, and poorly engineered galleries.

Further operation of Kolyma HPP dam lead to the settlement of dam crest, as deep as 1.6 m in some places. The analysis of dam crest

повышением отметки верхнего бьефа был проведен анализ конструкции пригребневой зоны плотины, показавший ошибочность реализованного решения и необходимость реконструкции этой части плотины. Были также проведены численные расчеты фильтрационно-температурного режима пригребневой зоны, показавшие возможность повышения уровня верхнего бьефа [8].

Аварийная ситуация, связанная с фильтрационно-температурным режимом системы грунтовая плотина — основание, возникла и во втором правобережном понижении на плотине Курейской ГЭС, строительство которой происходило в 1984—1987 гг. [9]. Плотина возведена в суровых климатических условиях со среднегодовой температурой воздуха порядка –7 °С. Максимальная высота плотины в центральной части данного участка составляет около 38,0 м. Плотина по конструкции каменно-земляная с экраном из суглинка. Призмы плотины выполнены из гравийных грунтов с супесчаными заполнителями.

После начала эксплуатации плотины и наполнения водохранилища под воздействием фильтрационного потока в плотине — ее бортах и основании постепенно начались изменения ее температурного режима. К 1989 г. низовая призма плотины в этой области почти полностью оттаяла в верхней части плотины, что вызвало отрицательные последствия. В пределах данного участка возникла аварийная ситуация, связанная с выходом фильтрационного потока на низовой откос грунтовой плотины. В дальнейшем, за 10-летний период эксплуатации (1990—2000 гг.) осадки гребня плотины достигли 64 см и продолжают постепенно увеличиваться.

Анализ натурных наблюдений за фильтрационным и температурным режимами плотины и основания, а также осадками плотины позволили сделать вывод о том, что основной причиной такого поведения конструкции является постепенное оттаивание массива грунта как внутри самой плотины, так и в ее основании и бортовых примыка-

zone construction, due to the possible rise of upstream, showed poorly engineered design and the need of reconstruction of this part of the dam. Numerical calculations of a filtrational and temperature mode of the crest zone showed the possibility of upstream rising.

The accident related to a filtration and temperature mode of the system "soil dam — base" also took place in the second right-bank fall on Kureyskaya hydroelectric dam constructed in 1984—1987 [9]. The dam is built in severe climatic conditions with average annual air temperature about –7 °C. The maximum height of the dam in the central part is about 38.0 m. Dam toes are made of gravel soils with sandy fillers.

After the start of dam operation and reservoir filling with filtration flow in the dam, the temperature mode in the abutments and the base began to change gradually. By 1989, downstream toe of dam melted almost completely in the top part that caused negative consequences. There appeared an emergency situation in reach, connected with filtration flow on downstream slope of the dam. Further, for the 10-year period of operation (1990—2000), the dam crest rainfall reached 64 cm and continue to increase gradually.

The observation of filtration and temperature modes of the dam base and dam settlement showed that the main reason of the construction behavior is gradual soil massif melting both

ниях, вызванное тепломассопереносом за счет фильтрации воды. Для прогноза ее дальнейшего поведения на кафедре гидротехнических сооружений МГСУ была создана математическая модель температурно-фильтрационного режима грунтовой плотины Курейской ГЭС и проведены численные исследования, показавшие затухающее развитие процесса оттаивания грунта в основании и теле плотины до 2015 г. [9].

Анализ мировой практики эксплуатации грунтовых плотин в суровых климатических условиях показывает, что причиной большинства возникших на таких сооружениях аварийных ситуаций является нарушение их фильтрационно-температурного режима [10, 11]. Исследованиям фильтрационно-температурного режима грунтовых плотин и их оснований в условиях вечной мерзлоты посвящено достаточно много работ [12—15]. Однако методы решения подобных совместных задач нуждаются сегодня в дальнейшем развитии.

Заключение. Практика гидротехнического строительства показывает, что строительство крупных гидротехнических сооружений в условиях вечной мерзлоты возможно. Однако при этом особое внимание должно быть уделено фильтрационному и температурному режимам системы грунтовая плотина — основание, изменения которых, в основном, являются причиной аварийных ситуаций. Это устанавливает повышенные требования к конструкциям и качеству противофильтрационного элемента, а также требует дополнительных исследований и совершенствования методов решения фильтрационно-температурных задач.

in the dam, and in its base and abutments, caused by heat mass transfer with water filtration. In order to predict further behavior of the construction, the specialists from the Department of Hydraulic Construction created a new mathematic model of temperature filtration in Kureyskaya HPP dam and made numeric researches, which showed exhaustive process of soil melting in dam base and body as long as up to 2015 [9].

Operating practice of soil dams in severe climatic conditions shows that violation of their filtrational and temperature mode [10, 11] is the main reason of most accidents in such constructions. A lot of researches [12—15] are devoted to filtration and temperature mode of deep-frozen soil dams. However, the solution methods of similar simultaneous tasks need further development nowadays.

Conclusion. The hydraulic construction practice shows the possibility of large hydraulic constructions in severe climatic conditions. However, special attention must be paid to filtration temperature modes of the system: soil dam — base, the change of which, generally, is the main reason of accidents. It establishes increased requirements to designs and quality of an antifiltration element, and demands additional researches and improvement of filtration and temperature methods.

Библиографический список

1. *Rogers J.R., Brown G.O., Garbrecht J.D.* Water Resources and Environmental History. Salt Lake City, Utah : ASCE — American Society of Civil Engineers. New York, 2004. 285 p.

2. *Andersland O.B., Ladanyi B.* Introduction to Frozen Ground Engineering. Chapman&Hall,

References

1. Rogers J.R., Brown G.O., Garbrecht J.D. Water Resources and Environmental History. ASCE — American Society of Civil Engineers. New York, 2004, 285 p. DOI: http://dx.doi.org/10.1061/9780784406502.

New York : USA, ASCE & John Wiley & Sons, 2003. 363 p.

3. *Куперман В.Л., Мызников Ю.Н., Торопов Л.Н.* Гидроэнергетическое строительство на Севере. М. : Энергоатомиздат, 1987. 303 с.

4. *Гольдин А.Л., Рассказов Л.Н.* Проектирование грунтовых плотин : 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во АСВ, 2001. 375 с.

5. *Когодовский О.А., Фриштер Ю.И.* Гидроэнергетика крайнего Северо-Востока. М : Энергоатомиздат, 1996. С. 201—205.

6. *Пехтин В.А.* О безопасности плотин в северной строительно-климатической зоне // Гидротехническое строительство. 2004. № 10. С. 6—9.

7. *Рассказов Л.Н., Анискин Н.А., Саинов М.П.* Анализ состояния грунтовой плотины Колымской ГЭС // Вестник МГСУ. 2009. Спецвып. № 2. С. 111—118.

8. *Анискин Н.А.* Температурно-фильтрационный режим пригребневой зоны грунтовой плотины в суровых климатических условиях // Вестник МГСУ. 2013. № 4. С. 129—137.

9. *Анискин Н.А.* Температурно-фильтрационный режим основания и плотины Курейской ГЭС во втором правобережном примыкании // Вестник МГСУ. 2006. № 2. С. 43—52.

10. *Foster M., Fell R., Spannagle M.* The statistics of embankment dam failures and accidents // Canadian Geotechnical Journal. 2000. Vol. 37 (5). Pp. 1000—1024.

11. *Sherard J.L.* Hydraulic Fracturing in Embankment Dams // Seepage and Leakage from Dams and Impoundments. R.I. ASCE. New York, 1985, pp. 115—141.

12. *Белов А.Н., Горохов Е.Н.* Трехмерное математическое моделирование температурного режима грунтовых плотин в криолитозоне // Приволжский научный журнал. 2010. № 1. С. 65—71.

2. Andersland O.B., Ladanyi B. Introduction to Frozen Ground Engineering. Chapman&Hall, New York, USA, ASCE & John Wiley & Sons, 2003, 363 p.

3. Kuperman V.L., Myznikov Yu.N., Toropov L.N. *Gidroenergeticheskoe stroitel'stvo na Severe* [Hydropower Construction in the North]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 303 p.

4. Gol'din A.L., Rasskazov L.N. *Proektirovanie gruntovykh plotin* [Design of Soil Dams]. Moscow, ASV Publ., 2001, 375 p.

5. Kogodovskiy O.A., Frishter Yu.I. *Gidroenergetika kraynego Severo-Vostoka* [Hydropower Engineering in Far Noth-East]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1996, pp. 201—205.

6. Pekhtin V.A. O bezopasnosti plotin v severnoy stroitel'no-klimaticheskoy zone [On the Safety of Dams in the Northern Construction-Climatic Zone]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 2004, no. 10, pp. 6—9.

7. Rasskazov L.N., Aniskin N.A., Sainov M.P. Analiz sostoyaniya gruntovoy plotiny Kolymskoy GES [Analysis of Soil Dam Condition of Kolyma HPP]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2009, no. 2, pp. 111—118.

8. Aniskin N.A. Temperaturno-fil'tratsionnyy rezhim prigrebnevoy zony gruntovoy plotiny v surovykh klimaticheskikh usloviyakh [Temperature-Filtration Mode of the Crestal Zone of Embankment Dam in Severe Climatic Conditions]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013, no. 4, pp. 129—137.

9. Aniskin N.A. Temperaturno-fil'tratsionnyy rezhim osnovaniya i plotiny Kureyskoy GES vo vtorom pravoberezhnom primykanii [Temperature-Filtration Mode Regime of Kureyskaya HPP Dam Base in Second Right Bank Abutment]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2006, no. 2, pp. 43—52.

10. Foster M., Fell R., Spannagle M. The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents. Canadian Geotechnical Journal. 2000, vol. 37 (5), pp. 1000—1024. DOI: http://dx.doi.org/10.1139/t00-030.

11. Sherard J.L. Hydraulic Fracturing in Embankment Dams. Seepage and Leakage from Dams and Impoundments. R.I. ASCE. New York, 1985, pp. 115—141.

13. *Соболь С.В., Горохов Е.Н., Соболь И.С., Ежков А.Н.* Исследование для обоснования проектов малых водохранилищ в криолитозоне // Известия вузов. Строительство. 2005. № 9. С. 29—31.

14. *Горохов Е.Н.* Температурный режим грунтов левобережного примыкания Ви-люйской ГЭС-3 // Гидротехническое строительство. 2003. № 2. С. 12—15.

15. *Sheng-Hong C.* Adaptive FEM analysis for two-dimensional unconfined seepage problems // Journal of hydrodynamics. 1996. Ser. B. Vol. 8. No. 1. Pp. 60—66.

Поступила в редакцию в апреле 2014 г.

Об авторах: **Анискин Николай Алексеевич** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидротехнических сооружений, директор института гидротехнического и энергетического строительства, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, nikolai_aniskin@mail.ru;

Антонов Антон Сергеевич — аспирант кафедры гидротехнических сооружений, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, a.s.antonov90@gmail.ru.

Для цитирования: *Анискин Н.А., Антонов А.С.* Опыт и проблемы строительства и эксплуатации грунтовых плотин в суровых климатических условиях в России // Вестник МГСУ. 2014. № 7. С. 133—146.

12. Belov A.N., Gorokhov E.N. Trekhmernoe matematicheskoe modelirovanie temperaturnogo rezhima gruntovykh plotin v kriolitozone [3D Thermal Modeling of Soil Dams in Cryolithic Zone]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Review]. 2010, no. 1, pp. 65—71.

13. Sobol' S.V., Gorokhov E.N., Sobol' I.S., Ezhkov A.N. Issledovanie dlya obosnovaniya proektov malykh vodokhranilishch v kriolitozone [Design Consideration of Small Reservoirs in Cryolithic Zone]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2005, no. 9, pp. 29—31.

14. Gorokhov E.N. Temperaturnyy rezhim gruntov levoberezhnogo primykaniya Vilyuyskoy GES-3 [The Temperature Regime of Left Bank Abutment Soils of Vilyuiskaya HPP-3]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 2003, no. 2, pp. 12—15.

15. Sheng-Hong C. Adaptive FEM Analysis for Two-Dimensional Unconfined Seepage Problems. Journal of Hydrodynamics. 1996, Ser. B., vol. 8, no. 1, pp. 60—66.

About the authors: **Aniskin Nikolay Alekseevich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chair, Department of Hydraulic Engineering Structures, Director, Institute of Hydraulic Engineering and Energy Sector Construction, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; nikolai_aniskin@mail.ru;

Antonov Anton Sergeevich — postgraduate Student, Department of Hydraulic Engineering Structures, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; A.S.ANTONOV90@gmail.ru.

For citation: Aniskin N.A., Antonov A.S. Opyt i problemy stroitel'stva i ekspluatatsii gruntovykh plotin v surovykh klimaticheskikh usloviyakh v Rossii [Experience and Problems of Earth Dam Construction and Exploitation in Severe Climatic Conditions in Russia]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 7, pp. 133—146.