

6
A-1

АКАДЕМИЯ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР — ИНСТИТУТ СООРУЖЕНИЙ

Аспирант И. М. ЕЛШИН

**СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ИСТИРАНИЮ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ БЕТОНОВ И
РАСТВОРОВ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

ТАШКЕНТ—1956

I.

Реки Средней Азии на предгорных и горных участках несут большое количество донных наносов, которые могут иметь различную крупность: от песка до булыг и даже валунов.

Из практики эксплуатации гидротехнических сооружений, расположенных на этих участках рек, известны многочисленные случаи повреждений бетона и облицовки частей сооружений от действия донных наносов. В зависимости от крупности наносов, насыщенности ими потока и скорости движения повреждения бетона могут носить либо характер поверхностного истирания, либо приводить к частичному или полному разрушению отдельных конструкций.

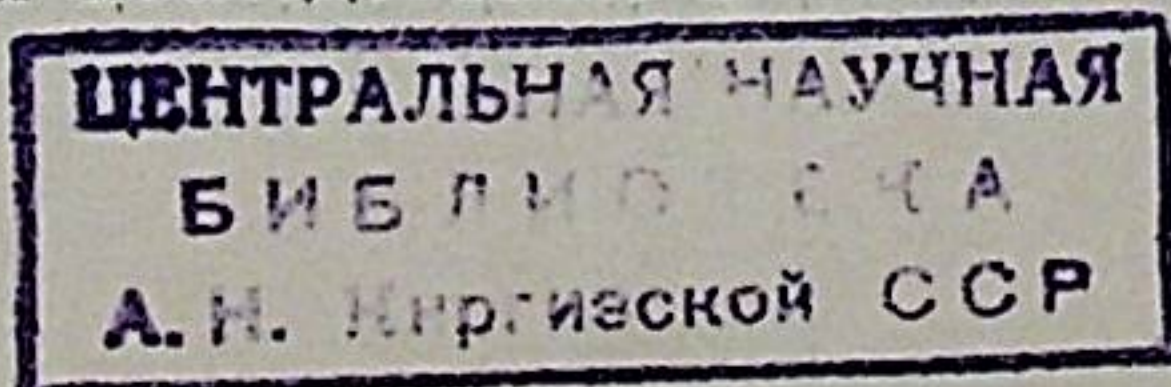
До настоящего времени как в отечественной, так и в зарубежной литературе отсутствуют результаты исследований, позволяющие разрешить сложную задачу выбора строительного материала для зон сооружений, подвергающихся воздействию донных наносов в зависимости от крупности последних, насыщенности ими потока, скорости и т. д.

В частности, для наиболее распространенного материала в гидротехническом строительстве — бетона имеется весьма ограниченное число исследований, направленных на повышение износостойкости и установления границ целесообразности его применения без защитной облицовки.

Все это приводит к тому, что при проектировании бетона для зон сооружений, испытывающих действие донных наносов, как правило, или ограничиваются назначением бетонов повышенных марок, или предусматривают устройство облицовки из металла.

В МХТИ им. Менделеева под руководством профессоров В. Н. Юнга и Ю. М. Бутта в течение 1951—53 г. г. были проведены исследования истираемости цементных растворов. В результате работ даны рекомендации по изготовлению и выбору цементов для бетонов, подверженных истиранию наносами.

Реферируемая работа является как бы продолжением проведенных с растворами исследований в МХТИ им. Менделе-



102824

ежа и посвящена вопросам изучения истираемости гидротехнических бетонов. Проведены также исследования истираемости некоторых других материалов, применяемых или рекомендованных для применения в качестве облицовки.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании трудноистираемых бетонов; кроме того, они позволяют более сознательно подходить к выбору облицовочного материала для гидротехнических сооружений.

II.

Автором проведены обследования состояния бетона и облицовок сооружений восьми гидротехнических узлов Средней Азии. Результаты натурного изучения поведения бетона и защитных облицовок, а также данные литературных источников позволяют сказать следующее:

1. В предгорных участках рек Средней Азии движение донных наносов происходит, главным образом, в период май-август месяцы. Значительная часть всех донных наносов проходит за короткий паводковый период, когда в движение вовлекаются и наиболее крупные их фракции. В это время наблюдаются основные повреждения материала гидротехнических сооружений.

2. Характер воздействия наносов разной крупности на материал сооружений различен. Если песок и гравий при своем движении, в основном, лишь истирают его, то наносы большей крупности, обладая значительной массой, кроме истирания, подвергают материал сооружений заметному ударному воздействию. Однако нужно отметить, что в натуре различить роль того или иного воздействия, как правило, не представляется возможным.

3. Износ, т. е. повреждение поверхностного слоя бетона от совместного действия истирания и удара, начинается с разрушения раствора между зернами крупного заполнителя, последние по мере освобождения от связей отрываются от массы бетона и уносятся водой. В случае применения слабого заполнителя изнашивание его зерен идет одновременно с изнашиванием раствора.

Использование крупного гравия в качестве заполнителя, а также введение «изюма» способствует повышению износостойкости бетона, так как при этом увеличивается площадь, занятая крупным заполнителем, имеющим большую износостойкость в сравнении с раствором.

4. Защитные покрытия из листов котельного железа, двутавров, швеллеров и т. п. служат хорошим средством для предохранения гидротехнических сооружений от разрушающего действия донных наносов.

Высокую износостойкость показали также облицовки из дерева. Дерево — более долговечно в частях сооружений, подверженных износу, чем бетон.

5. При отсутствии в потоке донных наносов, даже при больших скоростях течения воды, истирания бетона не наблюдается. Взвешенные наносы, состоящие из ила или продуктов разрушения мягких горных пород, для бетона практически безопасны.

III.

В настоящее время еще отсутствует единая методика исследований воздействия на бетон донных наносов. Это, в свою очередь, сказалось на разнотипности приборов, использованных для указанной цели.

Все лабораторные установки, применявшиеся или предложенные для исследования износостойкости бетона, можно свести к следующим 4-м типам:

1 тип. «Круги истирания» систем Баушингера, Амслера, Боме и др. Основной частью этих приборов является чугунный вращающийся диск, к которому под определенным давлением прижимается испытываемый образец в виде кубика. На диск подсыпается абразив и подается вода. После испытания образец представляет собой гладкий шлиф;

2 тип. Приборы, имеющие вращающиеся камеры с насыпанными внутрь кусками бетона. Наиболее распространенными приборами подобного типа являются «барабаны Деваля» и «барабаны для испытания износа плитных материалов». В приборах образцы подвергаются совместному действию истирания и удара;

3 тип. Все приборы, имеющие вращающиеся камеры, с образцами, прикрепленными к ее стенкам. Внутри камеры закладываются металлические шары или гравий, которые оказывают на образцы истирающее и ударное воздействия;

4 тип. Приборы, в которых образцы подвергаются воздействию потока воды с песком. По одной из схем образцы закрепляются на валу или диске, вращающемся в цилиндре, в который загружена смесь воды с песком. По другой схеме образцы устанавливаются с внутренней стороны цилиндра, а

вращается диск или вал с лопастями. В этих приборах испытываемый материал подвергается истиранию песком в присутствии воды.

Учитывая, что исследование всего сложного комплекса явлений, входящих в состав понятия «износ», должно начинаться с изучения отдельных элементов этого комплекса, для исследования «истираемости» материалов нами использована схема 4-го типа приборов, по которой образцы подвергаются истирающему действию песка, движущегося с потоком воды. В этом случае условия испытаний наиболее близко приближаются к условиям истирания материала гидротехнических сооружений песчано-гравийными наносами.

По указанному принципу работает прибор МХТИ-Гидропроект, на котором в МХТИ им. Менделеева проведены все исследования истираемости цементного камня и раствора. В этом приборе движение воды с песком создается вращающейся металлической крыльчаткой в специальной форме, в которую при испытании помещается образец в виде кольца с внутренней поверхностью, подвергаемой истиранию и равной $78,5 \text{ см}^2$. Бетонные кольца изготавливаются большей высоты с внутренней поверхностью, равной $282,6 \text{ см}^2$.

Возможен и такой вариант, когда по открытому лотку, на дне которого закреплены образцы, пропускаются с потоком воды в смеси с абразивом также и крупные камни, подвергающие бетон одновременно истиранию и удару.

Несмотря на то, что осуществление этой схемы затруднительно ввиду необходимости подъема большого количества каменного материала и создания высокого напора для получения высоких скоростей, она все же наиболее близко отображает реальные условия работы бетона в гидротехнических сооружениях, расположенных на предгорных участках рек. Однако исследования износостойкости бетонов по этому варианту целесообразны только после отдельного изучения истираемости и ударной прочности бетонов.

При проектировании прибора для изучения истираемости строительных материалов автором использован принцип прибора МХТИ-Гидропроект, в который внесены изменения, позволившие значительно увеличить размеры образцов, осуществить охлаждение их и прибора, а также вынос мелких продуктов истирания за счет непрерывной смены воды, несущей абразив. Кроме того, конструкция прибора позволяет одновременно испытывать 2 или 3 образца.

Схема прибора САНИИРИ следующая. В цилиндрическом полом кожухе диаметром 316 мм вращается цилиндрический ротор диаметром 167 мм, к которому по образующим приварены из уголкового железа лопасти. Кожух с обеих сторон закрыт крышками. Вал ротора опирается на три опоры и с электромотором соединен ременной передачей. Мощность электромотора — 3,7 кВт. При испытаниях в кожух закладываются 2 или 3 образца в виде полого цилиндра, высотой 214 или 143 мм и толщиной 44 мм, каждый с площадью истирания соответственно 1535 и 1025 см^2 . К обеим крышкам подсоединяются шланги, через которые внутрь кожуха непрерывно подается свежая и отводится отработанная вода. Через патрубок в крышке производится загрузка абразива.

На описанном приборе проведены испытания истираемости образцов из раствора и бетона, а также ряда облицовочных и других строительных материалов.

IV.

Основные исследования истираемости растворов и бетонов проведены на портландцементе Хилковского завода без активных минеральных добавок, и добавок — наполнителей, марки «400», с удельной поверхностью $2740 \text{ см}^2/\text{г}$. В дополнительных опытах использован портландцемент Карагандинского завода, также марки «400», но с удельной поверхностью $3450 \text{ см}^2/\text{г}$.

В исследованиях для раствора и бетона применялись песок и гравий, отсеянные из естественной смеси песчано-гравийных отложений р. Чирчик. В качестве мелкозернистого заполнителя использован песок из р. Сыр-Дарья, взятый в районе ж. д. станции Пахта. Щебень получен дроблением чирчикского гравия.

V.

При разработке методики лабораторных исследований необходимо было разрешить ряд вопросов, а именно:

- 1) количественная оценка истираемости,
- 2) выбор и дозировка абразива,
- 3) период истирания и количество периодов,
- 4) количество образцов-близнецов.

Истирание характеризуется разрушением и удалением материала в поверхностном слое, в результате чего происходит уменьшение веса тела.

При испытании на приборе САНИИРИ истираемость определялась потерей в весе образца, отнесенной к единице площади за единицу времени:

$$I = \frac{P_1 - P_2}{F \cdot t} \text{ кг/м}^2 \text{ час (1),}$$

где: P_1 и P_2 — вес образца до и после испытания в кг,
 F — площадь образца в м²,
 t — время испытания в час.

В качестве абразива применен песок, отсеянный из донных отложений р. Чирчик.

Для определения крупности песка и дозировки его проведена серия опытов, во время которых были установлены фракционный состав песка и его количество, а также время испытаний за один период. При этом автор руководствовался следующими соображениями. С одной стороны, абразив должен быть настолько мелким, чтобы не было сильного нагрева прибора и интенсивного разрушения слабых образцов. С другой стороны, он должен быть достаточно крупным, чтобы его не выносило циркулирующей через прибор водой и время испытаний не стало бы слишком длительным. В результате, в качестве абразива был принят песок крупностью от 2,5 до 0,75 мм в количестве 13,9 проц., от веса воды. Продолжительность испытаний за один период установлена в 5 часов. Цикл испытаний, т. е. общее время испытания, для образцов из раствора принят в один период, для бетона — два, после первого периода бетонный образец взвешивается, заменяется абразив и испытание начинается снова. Прочие материалы испытывались при разном количестве периодов в зависимости от их стойкости к истиранию. Число образцов-близнецов установлено два.

Параллельно с основными исследованиями проведены испытания цементного камня на «круге истирания» системы Амслера, выполненные по обычной методике, принятой для испытания каменных материалов.

VI.

Процессы, происходящие при абразивном истирании растворов и бетонов, можно представить себе следующим образом.

Зерна абразива имеют шероховатые поверхности. При движении происходит зацепление выступов абразива о выступы истираемого тела. Срыв с зацеплений обоих хрупких материалов сопровождается срезом выступов тела или абразива.

Бетон (раствор) является неоднородным телом, состоящим из твердых минеральных частиц, распределенных в цементном камне.

Проф. В. Н. Юнг указывает, что в первые несколько дней

твердения цементный камень представляет собой изотропную недифференцированную массу с вкрапленными многочисленными зернами неразложившегося клинкера. Новообразования находятся в коллоидном состоянии. Процесс твердения сопровождается уплотнением геля и кристаллизацией гидроалюмината кальция и гидрата окиси кальция.

К месячному сроку твердения в коллоидной массе наблюдается большое количество рассеянных в ней субмикроскопических и очень мелких кристаллов, а также неразложившихся зерен клинкера.

Наблюдениями В. Н. Юнга, В. В. Лапина, Б. Г. Скрамтаева и др. установлено, что преобладающее содержание геля в цементном камне сохраняется очень долго.

Следовательно, цементный камень в бетоне представляет собой аморфную массу гидросиликата кальция, в которую погружены обломки непрореагировавших цементных зерен. Вся масса пронизана тонкими игольчатыми кристаллами гидроалюмината кальция и кристаллами $\text{Ca}(\text{OH})_2$, которые, как указывает В. Н. Юнг, имеют вид таблиц или призм гексагональной системы.

Цементный камень при длительном твердении, в основном, состоит из геля гидросиликата кальция (около 60 проц.) и кристаллов гидрата окиси кальция (не менее 15 проц.).

Как было установлено в МХТИ им. Менделеева, твердость кристаллического гидрата окиси кальция невелика. В шкале Мооса он занимает 3—4 место. Еще меньшую твердость имеет гелеобразная масса гидросиликата кальция.

Выступы зерен абразива — песка, представленные, главным образом, кварцем и полевым шпатом, при движении по поверхности цементного камня «пропахивают» мягкий гель гидросиликата кальция, оставляя в нем борозды, и обламывают кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и тонкие иглы гидроалюмината кальция, сами получая незначительные повреждения.

Механический процесс истирания сопровождается растворением в воде обнаженных кристаллов гидрата окиси кальция.

Параллельно с описанными процессами в более глубоких «зонах предразрушения» цементный камень ослабляется «расклинивающим действием водных пленок» в микротрещинах материала.

В пуццолановых портландцементных, как указывает В. Н. Юнг, взаимодействие между гидравлической добавкой и гидратом извести протекает медленно. Процесс связывания извести активным кремнеземом в новое химическое соединение

кристаллического состояния, которое может быть представлено выражением $m \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$, идет месяцами. Некоторые исследователи полагают, что за год гидравлическая добавка связывает не более 20 проц. $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Следовательно, в течение довольно длительного времени твердения пуццоланового портландцемента в его составе в сравнении с обычным портландцементом будет находиться повышенное содержание коллоидальных масс, что отрицательно отразится на его стойкости к истиранию. Этим можно объяснить результаты исследований, проведенных в МХТИ им. Менделеева, по которым истираемость цементных растворов на пуццолановых цементах во все сроки от 28 дней до одного года оказалась в 1,7 — 2,0 раза больше, чем на портландцементе без добавок.

Такова, повидимому, картина истирания цементного камня между зернами заполнителя бетона (раствора).

При движении зерна абразива по поверхности зерна заполнителя выступы его зацепляются за выступы однородного с ним материала, при этом повреждаются и обламываются выступы обоих тел.

Процесс истирания цементного камня между зернами заполнителя идет значительно быстрее, чем самого заполнителя, в результате чего зерна последнего обнажаются и стрываются тем скорее, чем ниже клеящая способность цемента, чем более гладкая поверхность зерен заполнителя.

VII.

На приборе САНИИРИ с цементными растворами состава 1:3 проведено изучение влияния на их истираемость водоцементного отношения, предела прочности при сжатии и растяжении, а также возраста образцов. Результаты опытов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость истираемости образцов из цементного раствора от водоцементного отношения и прочности

№ п/п	В/Ц	Предел прочности при сжатии, кг/см ²			Предел прочности при растяжении в 28 сут., кг/см ²	Истираемость, кг/м ² час		
		28 суток	90 суток	198 суток		28 суток	90 суток	198 суток
1	0,50	290	—	—	34	1,00	—	—
2	0,65	235	339	422	31	1,70	0,66	0,24
3	0,80	157	—	—	21	4,00	—	—

Данные табл. 1 показывают, что повышение прочности раствора при сжатии и растяжении в результате снижения водоцементного отношения приводит к значительному росту его стойкости против истирания. Еще более резкое нарастание стойкости против истирания наблюдается у цементных растворов с увеличением срока твердения.

Уменьшение пористости положительно отражается на стойкости раствора к истиранию. Так, например, соотношение пористости и истираемости образцов следующее:

пористость в %	истираемость, кг/м ² час
17	0,30
26	1,00
28	2,20

VIII.

На цементных бетонах проведены исследования зависимости истираемости от прочности при сжатии. Получение бетонов различной прочности осуществлялось за счет изменения водоцементного отношения при неизменной пластичности смеси. При этом соответственно менялись расходы цемента. В табл. 2 приведены результаты испытаний сопротивляемости истиранию бетонов различного вида и состава, а также и раствора состава 1:3.

Как видно из табл. 2, для всех разновидностей бетона падение прочности за счет повышения В/Ц приводит к увеличению истираемости бетонных образцов.

Объяснение полученным зависимостям для цементных растворов и бетонов следующее.

В результате повышения В/Ц усиливается водотделение. Часть воды выделяется на поверхности раствора или бетона, другая часть скопится под зернами заполнителя. При испарении воды и отсасывании ее внутрь зерен цемента остаются поры и капилляры, которые ослабляют цементный камень бетона (раствора). В процессе истирания по мере разрушения цементного камня зерна заполнителя обнажаются. В тот момент, когда сила потока, стремящаяся сорвать частицы заполнителя, превысит силу сцепления зерна с цементным камнем, произойдет отрыв и унос частицы потоком. Повышение В/Ц способствует скоплению воды у зерен заполнителя, что

Таблица 2

Результаты испытаний растворов и бетонов на истираемость

Вид бетона или раствора	В/Ц	Расход цемента в 1 м ³ бетона (раствора).	Отношен. объема (площади) цемент. теста к объему (площади) заполн.	Предел прочности при сжатии, кг/см ²	Истираемость, кг/м ² час	Примечание	
1. Бетон на цементе Хилковского завода, песке и гравии из р. Чирчик	0,55	324	0,41	307	0,29	Для всех видов и составов бетона пластичность смеси выдерживалась постоянной.	
	0,65	269	0,37	245	0,45		
	0,75	227	0,33	170	0,72		
2. Бетон на цементе Хилковского завода, гравии из р. Чирчик и мелкозернистом песке из р. Сыр-Дарьи	0,55	366	0,48	298	0,44		
	0,65	302	0,43	193	0,65		
	0,75	256	0,39	114	0,97		
3. Бетон на цементе Хилковского завода, песке из р. Чирчик и щебне.	0,55	407	0,56	340	0,11		
	0,65	312	0,44	273	0,14		
	0,75	272	0,41	189	0,29		
4. Бетон на цементе Карагандинского завода, песке и гравии из р. Чирчик	0,55	324	0,41	319	0,13		Пластичность раствора с повышением В/Ц увеличивалась
	0,65	269	0,37	213	0,19		
	0,75	227	0,33	178	0,46		
5. Раствор состава 1:3 на цементе Хилковского завода и песке из р. Чирчик	0,55	488	0,78	280	0,95		
	0,65	465	0,87	235	1,70		
	0,75	445	0,96	177	2,80		

облегчает их отрыв от массы бетона. Таким образом, понижение прочности цементного камня и уменьшение сил адгезии, удерживающих зерна заполнителя, и являются основными причинами падения стойкости растворов и бетонов против истирания при повышении водоцементного отношения смеси.

Из табл. 2 также видно, что бетон на щебне имеет большую сопротивляемость истиранию, чем бетон на гравии. Это

объясняется тем, что зерна щебня имеют сильно шероховатую поверхность, между выступами которой происходит заклинивание цементного камня, отчего сила сцепления щебня с цементным камнем больше, чем у гравия той же крупности. Кроме того, в щебне свежего дробления имеют место реакции химического взаимодействия по поверхностям излома, протекающие активнее, чем на поверхности гравия, что повышает силы адгезии цементного камня к зернам щебеночного заполнителя.

Бетон на мелкозернистом Сыр-Дарьинском песке показал более низкую стойкость к истиранию, чем бетон той же прочности с песком нормальной крупности. В то же время и растворы состава 1 : 3 одинаковой с бетоном прочности имеют значительно более низкую сопротивляемость истиранию (табл. 2).

Объясняется это следующим.

Так как цементный камень бетона (раствора) в сравнении с заполнителями является менее стойкой к истиранию его частью, то, очевидно, чем большая площадь по сечению бетона (раствора) будет занята заполнителями, тем более стоек к истиранию будет и сам бетон (раствор).

Положение это справедливо для случая, когда смеси имеют одинаковые водоцементные отношения и количество теста достаточно для заполнения пустот и смазки поверхности зерен заполнителей.

Считая, что отношение суммарной площади цементного теста к суммарной площади заполнителей по сечению образца пропорционально их объемному соотношению, проведем сопоставление площадей, занятых цементным тестом и заполнителями, для всех видов бетона и раствора состава 1 : 3 при одинаковых водоцементных отношениях.

Объем цементного теста в 1 м³ бетона (раствора) определится по формуле:

$$V_{ц} = \frac{Ц + В}{\gamma_{ц}} \quad (2),$$

где: Ц — расход цемента на 1 м³ бетона (раствора) в кг,
В — расход воды на 1 м³ бетона (раствора) в кг,
 $\gamma_{ц}$ — объемный вес цементного теста, полученный экспериментальным путем, в кг/л.

Объем песка и гравия в 1 м³ бетона определится как частное от деления веса заполнителя на объемный вес его зерен.

Указанные расчеты проведены для всех видов бетона, а

также раствора состава 1 : 3 при В/Ц=0,55; 0,65 и 0,75; отношения объема (площади) цементного теста к объему (площади) заполнителей для них сведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что при одинаковых водоцементных соотношениях в растворе по сравнению с бетонами площади в сечении образца, занятые цементным камнем, значительно больше.

Это и является одной из основных причин того, что растворы имеют стойкость к истиранию значительно ниже, чем бетоны.

Этим же объясняется и то обстоятельство, что бетон на песке нормальной крупности более стоек к истиранию по сравнению с бетоном на мелкозернистом песке.

На первый взгляд кажется противоречивым то, что с уменьшением В/Ц для всех разновидностей бетона стойкость к истиранию растет, в то время как повышаются и расходы цементного теста.

Однако, происходящие при снижении В/Ц повышение стойкости цементного камня и увеличение адгезии его к заполнителям повышают сопротивляемость истиранию бетона. Последние положительные обстоятельства преобладают над отрицательным, связанным с увеличением площадей, занятых цементным камнем, что в итоге выражается в повышении стойкости к истиранию и самого бетона.

Данные о бетоне на щебне казались бы также противоречат высказанным соображениям. Действительно, повышенные расходы цементного теста в бетоне со щебнем по сравнению с бетоном на гравии, безусловно, отрицательно сказываются на его стойкости к истиранию. В то же время высокая адгезия цементного камня к зернам щебня привела к повышению его сопротивляемости истиранию. Последний фактор преобладает над первым, что в итоге и привело к возрастанию стойкости против истирания бетона на щебне.

В случае, если В/Ц понижается за счет снижения расходов воды на 1 м³ смеси, что сопровождается уменьшением ее пластичности, то наряду с повышением стойкости к истиранию цементного камня происходит также и увеличение доли заполнителей в общем объеме бетона (раствора). Оба указанных обстоятельства приводят к резкому повышению сопротивляемости истиранию самого бетона (раствора).

Положение это подтверждено опытами с растворами состава 1 : 3 (табл. 2).

С увеличением возраста бетонных образцов, так же как и в растворах, наблюдается повышение их стойкости к истиранию.

Так, образцы бетона, изготовленные на портландцементе Хилковского завода, песке и гравии из р. Чирчик при В/Ц=0,65, имели в различном возрасте следующие показатели истираемости:

возраст бетона в днях	предел прочности при сжатии, кг/см ²	истираемость, кг/м ² час
7	47	11,6
28	245	0,45
105	330	0,26
180	395	0,22

Увеличение сопротивляемости истиранию с возрастом в бетонах, как и в растворах, идет более интенсивно, чем рост прочности. Особенно низкую стойкость к истиранию бетон показывает в первые дни твердения, когда цементный камень представлен, в основном, легкоистираемой коллоидной массой с втопленными в нее многочисленными зернами неразложившегося клинкера.

Способ укладки также влияет на истираемость бетона. Так, вибрированный бетон имел истираемость 0,45 кг/м² час и предел прочности при сжатии — 245 кг/см², в то время как истираемость штыкованного бетона оказались равной 0,25 кг/м² час и предел прочности при сжатии — 220 кг/см². Это объясняется тем, что при вибрации на поверхностном слое бетона выделяются избыточная вода и пузырьки воздуха, в результате чего слой получается слабым и легкоистираемым. Более глубокие слои вибрированного бетона, наоборот, имеют повышенную плотность из-за частичного удаления из него избыточной воды и воздуха, что положительно сказывается на его стойкости к истиранию.

Данные табл. 2 показывают также, что бетоны на цементе Карагандинского завода, имея близкие показатели предела прочности при сжатии с бетонами на цементе Хилковского завода, обладают значительно более высокой стойкостью к истиранию, что можно объяснить большей тонкостью помола данного цемента.

Известно, что повышение тонкости помола цемента способствует уменьшению водоотделения и увеличивает усадку. В связи с этим, в бетоне на цементе тонкого помола наблюдается

ся большая суммарная адгезия из-за лучшего зацементления зерен заполнителя в результате усадки и меньшее количество пустот под зернами заполнителя, образующихся при выделении избыточной воды.

Изучение влияния добавок поверхностно-активных веществ на показатели стойкости растворов и бетонов к истиранию в ее обширном комплексе не являлось задачей реферируемой работы. Небольшая серия опытов над бетонами с добавками поверхностно-активных веществ все же была проведена для установления лишь наличия этого влияния.

В качестве добавки использованы ссб и мылонафт.

Таблица 3

Влияние добавок поверхностно-активных веществ на стойкость бетона против истирания.

Вид добавки	Расход цемента на 1 м ³ бетона	Предел прочности при сжатии, кг/см ²	Истираемость, кг/м ² час.
В/Ц = 0,55			
1. Без добавки	324	—	0,29
2. Ссб	281	—	0,22
3. Мылонафт	303	—	0,23
В/Ц = 0,65			
4. Без добавки	269	245	0,45
5. Ссб	254	181	0,27
6. Мылонафт	257	168	0,28
В/Ц = 0,75			
7. Без добавки	227	—	0,72
8. Ссб	223	—	0,38
9. Мылонафт	218	—	0,51

Результаты опытов (табл. 3) показывают, что при неизменных В/Ц и пластичности смеси введение добавок ссб и мылонафта для всех составов приводит к повышению сопротивляемости бетонов истиранию. При этом возможна экономия цемента.

Введение добавок поверхностно-активных веществ способствует ускоренному образованию мелкокристаллических новообразований, более стойких к истиранию, чем гель, и кроме того, снижает водоцементное отношение. Однако, наряду с положительным влиянием добавок поверхностно-активных веществ имеют место отрицательные явления (адсорбционное, воздухововлекающее). Вовлеченный воздух, создавая замкнутые поры-вакуоли, увеличивает шероховатость цементного камня и, адсорбируясь на поверхности заполнителя, ухудшает его контакт с цементным камнем; это должно отрицательно сказаться на стойкости бетона к истиранию. С другой стороны, вакуоли уменьшают капиллярный подсос, что снижает размягчение, а значит и истирание цементного камня. Как показывают опытные данные, в сравнении с положительным влиянием добавок поверхностно-активных веществ отрицательное действие других факторов, повидимому, незначительно.

IX.

Исследованиям истираемости, кроме бетонов и растворов, подвергались чугун, дерево, асбестоцемент, сталебетон и резинобетон.

Результаты испытаний (табл. 4) позволяют сделать некоторые выводы:

1. Чугун по сопротивляемости истиранию стоит далеко впереди всех исследованных материалов. Хорошее качество чугуна в роли облицовочного материала подтверждается практикой его работы в гидротехнических сооружениях;

Таблица 4

Истираемость некоторых облицовочных материалов

Наименование материала	Истираемость, кг/м ² час.	Примечание
1. Чугун	0,005	Образцы изготовлены из серого чугуна заводской отливки с тщательно обработанной поверхностью истирания.
2. Асбестоцемент	0,058	Образцы изготовлены из асбестоцементной трубы.
3. Дерево	0,071	Образцы изготовлены из толстых сосновых досок хорошего качества.

Наименование материала	Истираемость, кг/м ² час	Примечание
4. Сталебетон	0,100	Весовой состав: одна часть цемента Хилковского завода, одна часть песка и полторы части стальной стружки, отсеянной через сито 5 мм; В/Ц=0,50
5. Резинобетон	0,310	Весовой состав: одна часть цемента Хилковского завода; 1,4 части песка; 1,8 части резиновых обрезков длиной 15–20 мм, толщиной 2–3 мм; В/Ц=0,60.
6. Бетон на гравии	0,290	Данные о бетоне см. табл. 2, п. 1.

2. Асбестоцемент имеет высокую сопротивляемость истиранию. Известные его свойства повышенной вязкости и химической стойкости, в сравнении с цементным раствором, указывают на необходимость более глубокого изучения возможности применения асбестоцементных плит в качестве облицовочных или использования асбестоцементных растворов в бетоне;

3. Дерево имеет более высокую стойкость против истирания, чем бетон. Кроме того, дерево обладает и хорошей вязкостью, что в выгодном свете представляет его как материал для облицовки сооружений, подвергающихся воздействию крупных донных наносов.

Опыты показали, что после долгого нахождения образцов в воде истираемость их уменьшается. Замечено также, что истирание у древесины вдоль волокон происходит несколько интенсивнее, чем поперек;

4. Образцы из сталебетона имеют стойкость к истиранию в 2,9 раза выше, чем у бетона. Испытанный в плитах размерами 30×30×10 см сталебетон показал в 3,6 раза более высокую, чем у бетона, сопротивляемость удару. Однако, учитывая высокие расходы цемента для его приготовления (около 700 кг/м³) и трудоемкость работ, связанную с доставкой, отсеиванием стружки и плохой удобоукладываемостью смеси, применение сталебетона в каждом частном случае должно быть экономически обосновано;

5. Резинобетон изготовлен по рецепту, предложенному В. Ф. Журавлевым (труды ЛХТИ им. Ленсовета, вып. 12, 1946). Полученные показатели его стойкости истиранию оказались довольно низкими. Ударная прочность резинобетона в плитах размерами 30×30×10 см близка к показателям обычного бетона. Все это ставит под сомнение целесообразность использования этого материала в качестве облицовки для гидротехнических сооружений, учитывая его высокую стоимость и трудоемкость при изготовлении.

Х.

Наряду с основными исследованиями проведены испытания истираемости образцов из цементного камня 28-дневного возраста на «круге истирания» системы Амслера, изготовленных из 7 различных цементов, в том числе Хилковского и Карагандинского заводов.

Таблица 5

Результаты исследований некоторых свойств цементного камня.

Наименование цемента	В/Ц	Объемный вес, г/см ³	Удельный вес, г/см ³	Пористость в %	Предел прочности при сжатии, кг/см ²	Истираемость г/см ²
1. Портландцемент Хилковского завода	0,30	1,91	2,35	19	701	0,41
	0,35	1,85	2,32	20	601	0,65
	0,40	1,74	2,31	25	481	0,94
	0,45	1,67	2,31	28	321	1,33
	0,50	1,62	2,29	29	269	1,42
2. Портландцемент Карагандинского завода	0,25	2,03	2,47	18	947	0,41
	0,30	1,88	2,40	22	750	0,51
	0,35	1,80	2,34	23	563	0,59
	0,40	1,77	2,32	24	570	0,90
	0,45	1,64	2,30	29	450	1,03
	0,50	1,63	2,29	29	362	1,29
	0,55	1,52	2,28	33	308	1,41

Данные исследований (табл. 5) показывают, что между водоцементным отношением, пределом прочности при сжатии, с одной стороны, и истираемостью образцов из цементного камня — с другой существует та же связь, которая была установ-

102824

лена на приборе САНИИРИ: повышение В/Ц и соответствующее падение прочности цементного камня приводит к уменьшению его сопротивляемости истиранию. Поскольку пористость цементного камня обусловлена величиной В/Ц, то правомерно было ожидать и наличие зависимости между его пористостью и истираемостью. Из таблицы 5 видно, что с ростом пористости цементного камня увеличивается и его истираемость.

Полученные данные указывают также на зависимость объемного и удельного весов от водоцементного отношения.

Исследования, проведенные с образцами цементного камня на 5-ти других цементах и 90-дневных образцах на всех 7-ми цементах, подтвердили существование зависимостей, указанных выше.

Проведенные опыты показывают, что для получения сравнительных данных об истираемости цементного камня может быть использован «круг истирания».

XI.

Результаты реферируемой работы показывают, что истираемость бетонов и растворов не является каким-то специфическим их свойством, находящимся вне зависимости от других свойств, как это предполагают отдельные исследователи.

Стойкость к истиранию тесно связана с другими характеристиками бетона (раствора) и, прежде всего, его прочностью и плотностью.

Установление зависимости сопротивляемости истиранию бетона (раствора) от отдельных факторов позволяет наметить пути проектирования трудноистираемых бетонов.

Стойкость к истиранию бетонов и растворов определяется стойкостью цементного камня, его адгезией к заполнителю, а также состоянием поверхности и стойкостью к истиранию самих заполнителей.

При проектировании трудноистираемых бетонов (растворов) необходимо руководствоваться следующими соображениями:

1. Так как наиболее слабой, с точки зрения сопротивляемости истиранию, частью бетона (раствора) является цементный камень, то в бетоне (растворе) его должно быть возможно

меньше — не больше того количества, которое должно обеспечить заполнение пустот и смазку зерен заполнителей.

Бетоны на мелкозернистом песке, а тем более растворы одинаковой с обычным бетоном прочности, обладают меньшей стойкостью к истиранию, чем последний. В связи с этим устройство покрытий из жирных штукатурок в целях предохранения бетонных поверхностей от истирания нецелесообразно;

2. Смесь заполнителей в бетоне (растворе) должна иметь минимальную пустотность и при составлении ее необходимо использовать фракции максимальной крупности, что уменьшит расходы цементного теста. Из этих соображений целесообразно применение в бетоне «изюма»;

3. В соответствии с рекомендациями МХТИ им. Менделеева для бетонов (растворов) должны применяться высококачественные цементы без активных минеральных и микрозаполнительных добавок;

4. В бетонах (растворах), повидимому, целесообразно применять цементы повышенной тонкости помола;

5. В качестве заполнителей необходимо применять песок и щебень из плотных и прочных пород. Применение гравия не рекомендуется;

6. Понижение В/Ц в бетоне (растворе) приводит к повышению прочности цементного камня, а значит и его стойкости против истирания.

Для этих целей, повидимому, целесообразно применение добавок поверхностно-активных веществ и пластификаторов. Однако для окончательного решения вопроса об использовании добавок поверхностно-активных веществ для повышения сопротивляемости истиранию бетона (раствора) необходима постановка дополнительных исследований;

7. Стойкость бетона (раствора) к истиранию во времени растет более интенсивно, чем прочность. Это указывает на необходимость производства в первую очередь укладки бетона в части сооружений, подвергающихся воздействию наносов;

8. Для получения вибрированных бетонов с поверхностью, обладающей хорошей стойкостью к истиранию, ее необходимо подвергать вакуумированию или устанавливать на ней абсорбирующие щиты. Вибропрессование жестких смесей, вероятно, должно явиться наиболее совершенным технологическим приемом для получения бетонных облицовочных плит.

В случае, когда сооружения пропускают наносы большой крупности, бетон необходимо покрывать износостойкими облицовками. Для этих целей лучшими из исследованных материалов являются чугун и дерево.

Следует изучить возможность широкого применения для облицовочных плит асбестоцемента.