МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра теоретической и геотехнической механики

Составители
Ю. В. Бурков
В. А. Хямяляйнен

ТАМПОНАЖНЫЕ РАСТВОРЫ

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Тампонаж горных пород» для студентов очной формы обучения

Рекомендованы учебно-методической комиссией направления подготовки 21.05.05 «Физические процессы горного или нефтегазового производства» в качестве электронного издания для использования в учебном процессе

Кемерово 2017

Рецензенты:

Богатырева А. С., доцент кафедры теоретической и геотехнической механики КузГТУ

Бурков Юрий Васильевич

Хямяляйнен Вениамин Анатольевич

Тампонажные растворы: методические указания к практическим занятиям по дисциплине «**Тампонаж горных пород**» [Электронный ресурс] для студентов специальности 21.05.05 «Физические процессы горного производства» очной формы обучения / сост.: Ю. В. Бурков, В. А. Хямяляйнен; КузГТУ. – Кемерово, 2017.

В предлагаемых указаниях представлены основные теоретические положения по выбору основных параметров предварительного тампонажа горных пород и приведены варианты выполнения курсового проекта.

© КузГТУ, 2017

© Бурков Ю. В.,
Хямяляйнен В. А.,
составление, 2017

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Тампонажные растворы в технологии тампонирования породных массивов твердеющими смесями на основе цемента занимают одно из ведущих мест. От их состава и свойств зависит качество противофильтрационных оболочек, прочность упрочненного массива.

Расход тампонажных материалов при выполнении тампонажных работ может оказать решающее влияние на применение технологии в определенных горно-геологических условиях

Изучению свойств тампонажных растворов в зависимости от их составов, режимов нагнетания, определению расходов материалов на их приготовление посвящена настоящая работа.

Целью практических занятий является закрепление теоретических знаний по изучению составов и свойств тампонажных растворов для создания противофильтрационных завес или упрочнения горных пород при сооружении горных выработок в сложных горно-геологических условиях.

Задачами занятий являются освоение способов и методов определения основных характеристик тампонажных растворов и определение потребности в материалах и растворах при тампонаже породных массивов вокруг горных выработок в различных горно-геологических и горнотехнических условиях

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1. Общие требования к цементам и цементационным растворам

Для приготовления цементационных растворов могут быть использованы различные цементы: портландцемент, шлакопортландцемент, пуццолановый портландцемент, глиноземистый цемент, тампонажный цемент и сульфатостойкий портландцемент. В основном следует ориентироваться на применение первых трех указанных цементов. При этом следует иметь в виду, что необходимость применения дефицитных глиноземистого, сульфатостойкого и тампонажного цементов должна быть обоснована.

При выборе вида и марки цемента необходимо руководствоваться следующими положениями.

Применяемый цемент должен удовлетворять в отношении физико-механических свойств требованиям соответствующих государственных стандартов. Слежавшиеся, подмоченные или содержащие посторонние примеси цементы применять не разрешается.

Для обеспечения долговечности цементационной завесы в условиях агрессивных вод цемент должен обладать достаточной химической стойкостью. Выбор цемента в этом случае должен производиться с учетом требований строительных норм и правил в соответствии с разделами "Признаки и нормы агрессивности воды – среды для железобетонных и бетонных конструкций" и "Вяжущие материалы неорганические и добавки для бетонов и растворов".

Вода, употребляемая для приготовления цементационных растворов, должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к воде для приготовления бетонов и не должна содержать вредных примесей, препятствующих нормальному схватыванию и твердению вяжущего.

Цементационный раствор должен обеспечивать водонепроницаемость, или укрепление породного массива. Отсюда следуют основные технические требования, предъявляемые к цементационным растворам:

– образовывать в результате схватывания и твердения цементный камень, не проницаемый для жидкости и газа;

– обеспечивать плотное заполнение трещин и пустот цементным камнем либо путем управления процессом седиментации цементных частиц, либо введением стабилизирующих добавок;

– проникать в тонкие трещины и не растекаться в крупных под действием гравитационных сил;

– обладать хорошей адгезией с цементируемыми породами;

Технологические требования к цементационным растворам заключаются в обеспечении возможности простого производительного приготовления раствора и хорошей прокачиваемости.

2.2. Добавки к цементационным растворам

Для изменения реологических свойств, сроков схватывания, повышения седиментационной устойчивости и водонепроницаемости в цементационные растворы вводят добавки [1]. По основному воздействию и назначению добавки цементационных растворов делят на несколько групп.

Добавки-наполнители:

– неактивные (инертные) добавки-наполнители – известняки, песчаники, граниты, гнейсы, сиениты, пески, древесные опилки, различные волокнистые материалы – хлопковые, кожаные волокна, нарезанная фибра, измельченный асбест, шелуха и др.;

– активные добавки-наполнители – природные и искусственные; к природным относятся диатомиты, трепелы, опоки, вулканические пеплы, туфы, трассы, пемзы и др., к искусственным – доменные гранулированные шлаки, нефелиновый шлам, зола и др.

Пластафицирующие-добавки:

– минеральные пластифицирующие добавки – бентонитовые и обычные глины, известковое тесто, тонкомолотые кремнеземистые горные породы, минеральные отходы содового производства;

– поверхностно – активные пластифицирующие добавки – концентраты сульфитно-дрожжевой бражки, мылонафтасидол, гидрофобизирующие кремнийорганические жидкости ГКЖ10, ГКЖ11 и др.

Добавки, регулирующие время схватывания и твердения раствора:

– добавки-ускорители схватывания и твердения цементов – хлористый кальций, хлорное железо, алюминат натрия, хлористый алюминий, соляная кислота, каустическая сода, отходы электросинтеза (ОЭС), углекислый калий, нитрат калия, нитрат кальция, нитрат натрия, тринатрийфосфат, хлоралюмокальций, кремнефтористый натрий, жидкое стекло и т. д.;

– добавки-замедлители схватывания и твердения раствора – поверхностно-активные пластифицирующие добавки, клей животный, сахар, крахмал, в малых дозах сернокислый калий, соля-

ная кислота, углекислый калий, хлористый аммоний и др.

Кроме того, применяют противоморозные добавки (основная масса добавок-ускорителей схватывания и твердения цементов); добавки, повышающие водонепроницаемость тампонажного камня, – тонкомолотый трепел и диатомит, различные виды глин, церезит, битумная эмульсия "Эмульбит", алюминат натрия, поташ, хлорное железо, хлористый алюминий, ОЭС, хлоралюмокальций и др.

Комплексные добавки представляют собой различные сочетания как по виду, так и объему вышеперечисленных добавок.

2.3. Проникающая способность цементационных растворов

Под *проникающей способностью* понимается способность раствора только проникать в трещины.

Практикой установлено, что цементации поддаются трещины с раскрытием не менее $(0{,}1 \div 0{,}2) \cdot 10^{-3}$ м. Проникновение твердой фазы в трещину зависит от ряда факторов, основными из которых являются: раскрытие трещины, размер твердых частиц, насыщенность потока твердой фазой, давление (напор) потока. Тогда расход раствора через устье трещины можно представить как функцию четырех независимых между собой переменных [2]:

$$Q_{\text{р}} = f(\delta, d, n, P_{\text{ск}}), \qquad (1)$$

где δ – величина раскрытия трещины на устье, м; d – диаметр твердой частицы, м; n – насыщенность потока твердыми частицами; $P_{\text{ск}}$ – давление (напор) потока в скважине, МПа.

В качестве критерия проникающей способности $K_{\text{п}}$ возьмем отношение расхода раствора и воды через устье трещины при одной величине ее раскрытия и одинаковом давлении:

$$K_{\text{п}} = Q_{\text{р}} / Q_{\text{в}}, \qquad (2)$$

где $Q_{\text{р}}$ и $Q_{\text{в}}$ – расходы соответственно раствора и воды.

Следует отметить, что длина трещины принимается достаточно малой, так как в противном случае на величину $K_{\text{п}}$ кроме проникающей способности раствора будут оказывать влияние силы трения и явление седиментации цементных частиц.

Введем безразмерную величину $\xi = d / \delta$. Тогда критерий $K_п$ можно представить в виде функции трех переменных $K_п = f(\xi, n, P_{ск})$.

В случае идеальной проникающей способности раствора $K_п = 1$. Наиболее интересен другой предельный случай, когда $K_п = 0$. Этот случай как раз и отвечает явлению кольматации устьев трещин (сводообразованию). Наиболее характерные графики зависимости $K_п$ от $P_{ск}$ для различных значений n и ξ приведены на рис. 1. Для уточнения приведенных гипотетических кривых необходимо выполнить большой объем экспериментальных исследований.

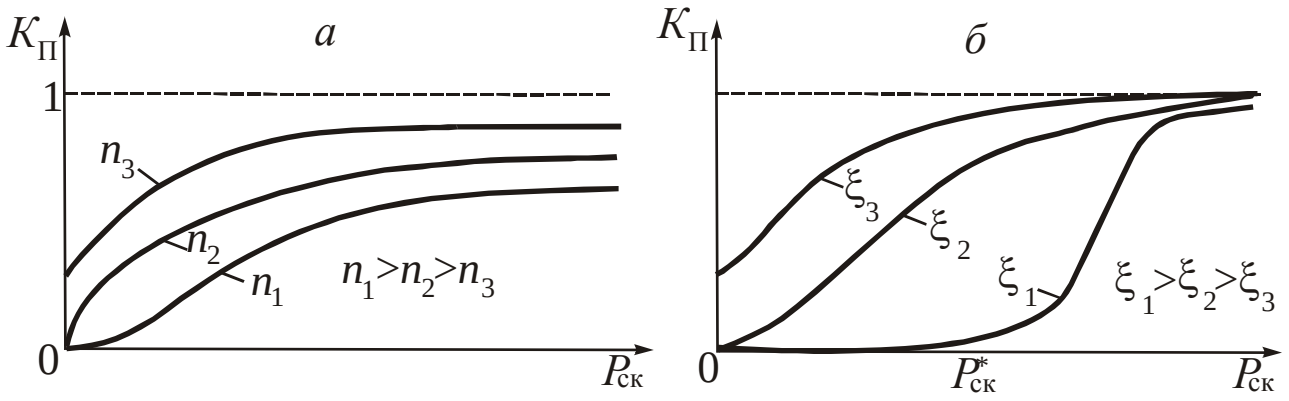

Рис. 1. Зависимость критерия проникающей способности $K_п$ от давления потока в скважине $P_{ск}$ для различных значений n (*а*) и ξ (*б*)

Вышеприведенный качественный анализ показывает, что сводообразование возможно не только в устье трещины, но и в самой трещине на некоторой ее глубине (рис. 2). Действительно, пусть зависимость $K_п$ от $P_{ск}$ для значения $\xi = \xi_1$ имеет вид кривой, изображенной на рис. 1, давление потока в устье трещины $P_{ск} > P^*_{ск}$. Твердые частицы, проникнув в трещину и достигнув в ней некоторой точки, в которой $P_{ск} > P^*_{ск}$, образуют свод, так как при $P_{ск} > P^*_{ск}$ значение $K_п = 0$. Существует такое значение ξ^*, что при $\xi < \xi^*$ сводообразование исключено. На рис. 1 для $\xi^* > \xi_3$.

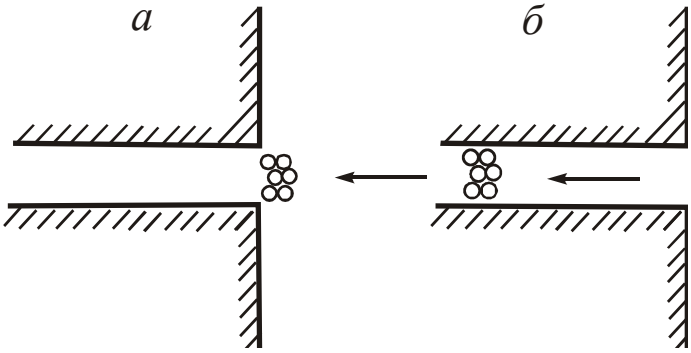

Рис. 2. Схемы сводообразования на устье (*а*) трещины и в ее глубине (*б*)

Следует иметь в виду, что процесс сводообразования по длине потока в трещинах носит более сложный характер и дополнительно определяется гидродинамическим процессом, сопровождающимся седиментацией цементных частиц и деформациями породного массива.

В качестве примера приведем результаты экспериментальных исследований проникающей способности цементационных растворов Е. Г. Дуды, выполненных в КузНИИшахтострое на лабораторной установке (рис. 3).

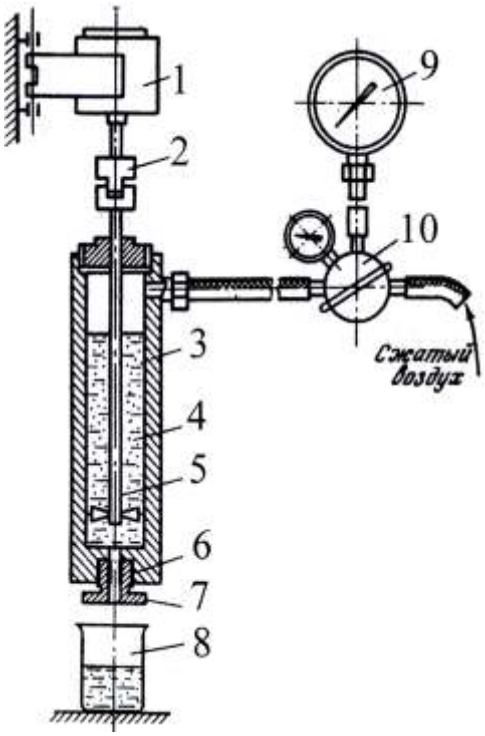

Рис. 3. Схема установки для исследования проникающей способности цементационных растворов:
1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – камера; 4 – цементационный раствор; 5 – побудитель; 6 – калиброванная трубка; 7 – уплотнительное устройство; 8 – мерная емкость; 9 – манометр; 10 – редуктор

Цементационные растворы приготавливали в лабораторном турбулентном смесителе на портландцементе М400 Топкинского цементного завода. Испытывали растворы с цементноводным отношением 1:0,5; 1:1; 1:5; 1:10; 1:20; 1:40, Раствор каждого состава пропускали через калиброванные отверстия (трубки длиной $15 \cdot 10^{-3}$ м) при давлениях 0,0125; 0,025; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35 и 0,5 МПа. Диаметр калиброванных отверстий принимался равным 1,35; 1,2; 1,15; 0,9; 0,7; 0,45; 0,4 и 0,35 мм.

Испытания растворов проводились в следующем порядке. В камеру с установленной трубкой заливали 700 см^3 испытуемого раствора. После сборки камеры включали двигатель побудителя и с помощью редуктора создавали требуемое давление. Открывали калиброванное отверстие и регистрировали время истечения 500 см^3 раствора.

По полученным данным строили зависимости давления потока в скважине $P_{ск}$ от расхода $Q_р$ растворов различных концентраций (рис. 4). Пунктирными линиями на графиках показаны области, в которых истечение растворов сопровождалось накоплением уплотненной твердой фазы над отверстием и закупориванием последнего. Закупоривание отверстий ликвидировали прочисткой, так как повышение давления приводило к дальнейшему накоплению твердой фазы и ее уплотнению.

На графиках хорошо прослеживается зависимость проникающей способности растворов от их концентрации. Так, если раствор с Ц:В = 1:0,5 хорошо проходит через отверстия диаметром 1,35 мм при давлении свыше 0,025 МПа, а через отверстие диаметром 1,15 мм при давлении более 0,125 МПа, то через отверстия диаметром 0,9 мм и менее он вообще не проникает. Раствор с Ц:В = 1:1 хорошо проходит через отверстия диаметром более 0,9 мм. При диаметре отверстия 0,9 мм и меньше раствор отфильтровывается у входа и закупоривает отверстие. Раствор с Ц:В = 1:2 хорошо проходит в отверстия диаметром 0,9 мм и более и не проходит в отверстия меньшего диаметра. Через отверстие диаметром 0,35 мм проходит лишь раствор с Ц:В = 1:40 при давлении более 0,3 МПа.

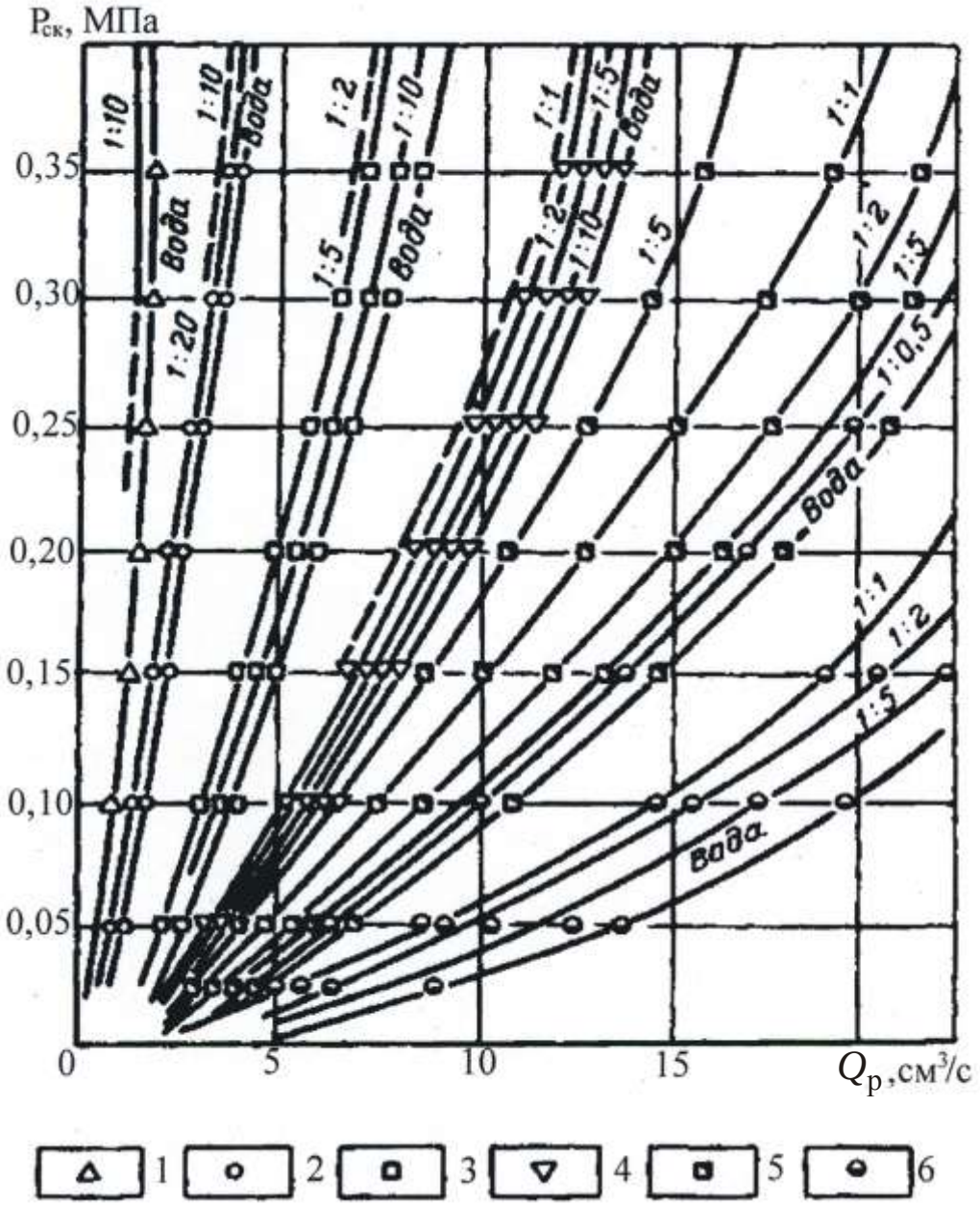

Рис. 4. Зависимость давления потока в скважине $P_{ск}$ от расхода $Q_р$ при истечении раствора через комбинированные круглые отверстия различного диаметра:
1 – 0,35 мм; 2 – 0,45 мм; 3 – 0,65 мм; 4 – 0,9 мм; 5 – 1,15 мм; 6 – 1,35 мм

Из графиков видно, что при повышении давления проникающая способность раствора несколько увеличивается. Однако, если раствор с Ц:В = 1:0,5 через отверстие с диаметром 1,15 мм хорошо проникает при давлении более 0,125 МПа, то через от-

верстия диаметром 0,9 мм этот раствор не проникает уже при любом давлении, применявшемся в опытах.

2.4. Седиментационная устойчивость и водоотдача цементационных растворов

Поскольку цементационный раствор представляет собой двухфазную водотвердую смесь, то сразу же после его приготовления начинается процесс разделения фаз: цементные частицы начинают оседать (седиментировать) на дно емкости, а жидкая фаза поднимается вверх. Плотность цементных частиц в три раза больше плотности воды. На процесс седиментации и водоотделения оказывают влияние концентрация твердых частиц, их размер и вязкость жидкой фазы. Основная масса частиц при этом обтекается жидкой фазой в ламинарном режиме, а наиболее крупные частицы могут обтекаться и в турбулентном. Над осевшей цементной массой образуется практически чистая вода. Распределение воды в осевшей цементной массе неравномерно. Плотность осевшей цементной массы в нижней части емкости больше, чем в верхней.

Седиментационная устойчивость характеризуется выходом цементного камня, определяемого отношением объема осевшей цементной массы к первоначальному объему раствора. В лабораторных условиях выход цементного камня определяют после отстаивания раствора в течение 1–1,5 ч в мерном сосуде вместимостью 100 см^3.

Величина выхода цементного камня зависит от концентрации раствора, вида и количества применяемых добавок цементационного раствора. При нагнетании раствора по зажимной схеме с постоянным расходом выход цементного камня является одним из основных факторов, обеспечивающих степень эффективности цементации.

На рис. 5–9, по данным А. П. Максимова и В. В. Евтушенко, приведены зависимости плотности цементационного раствора и величины выхода цементного камня от водоцементного отношения, вида и количества добавок [1].

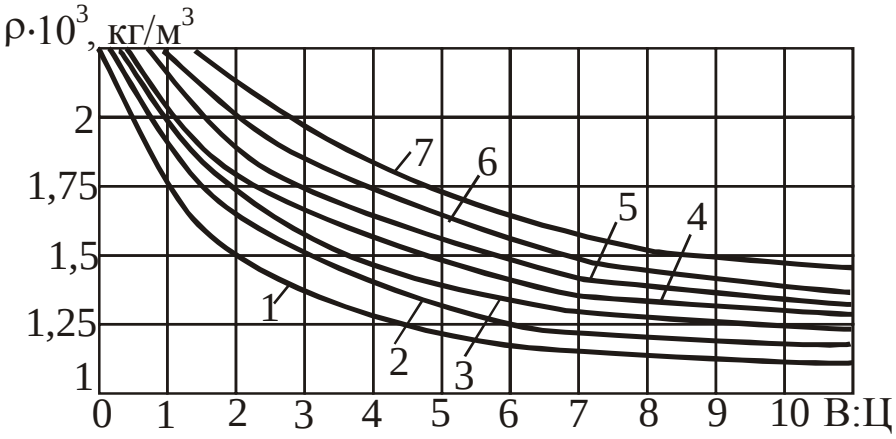

Рис. 5. Зависимость плотности цементно-песчаных растворов ρ от водоцементного отношения В:Ц:
1 – цементный раствор; 2 – Ц:П = 1:1; 3 – Ц:П = 1:2; 4 – Ц:П = 1:3; 5 – Ц:П – 1:5; 6 – Ц:П = 1:7; 7 – Ц:П = 1:10

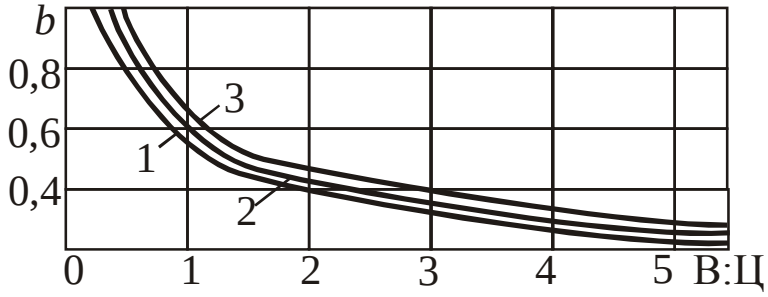

Рис. 6. Зависимость выхода цементного камня *b* цементных растворов от В:Ц:
1 – сульфатный цемент; 2 – среднеалюминатный цемент; 3 – высокоалюминатный цемент

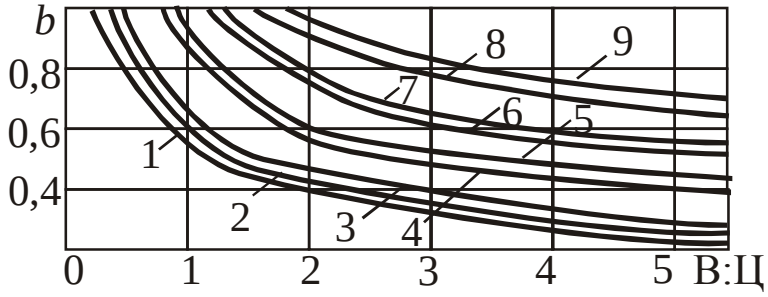

Рис. 7. Зависимости выхода цементного камня *b* цементных растворов от В:Ц при различных добавках-активаторах в количестве 5 % массы цемента:
1 – NaCl, KC1, $NaNO_3$, KNO_3; 2 – без добавок; 3 – хлористый кальций; 4 – $ZnCl_2$; 5 – CuCl; 6 – $FeCl_3$; 7– Na_3PO_4; 8 – $AlCl_3$; 9 – жидкое стекло

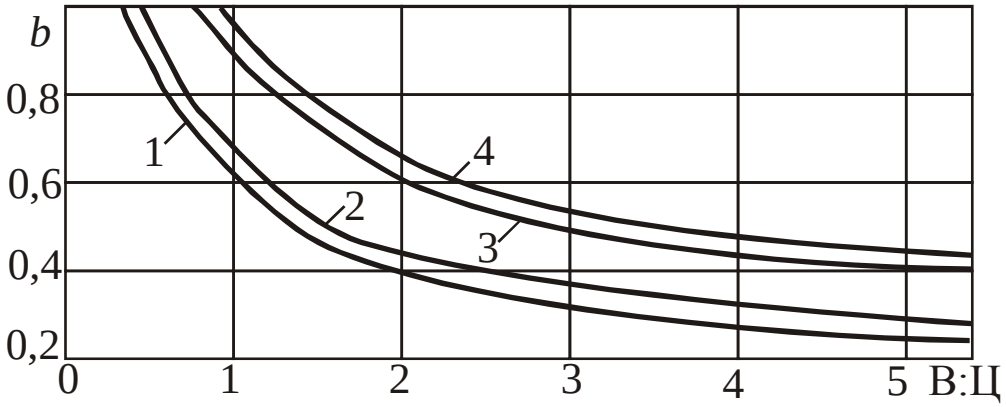

Рис. 8. Зависимости выхода камня *b* цементных растворов от В:Ц для различного количества добавок-активаторов:
1 – без добавок; 2 – 3 % $CaC1_2$; 3 – 2 % $FeC1_3$; 4 – 3 % $CaCl_2$ + +2 % $FeCl_3$

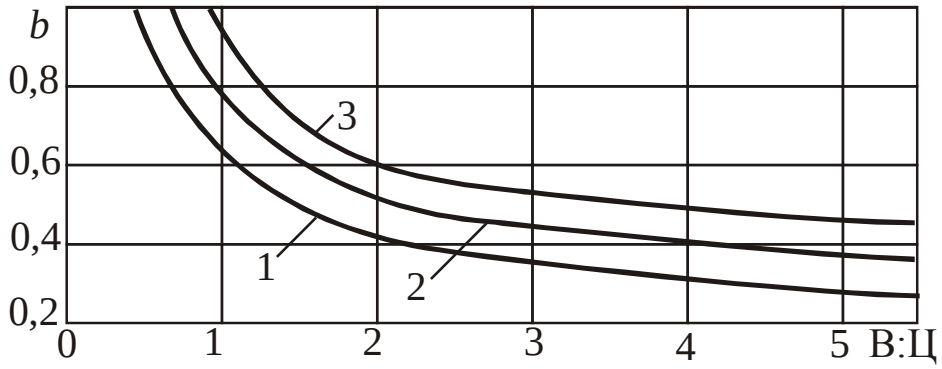

Рис. 9. Зависимости выхода камня *b* цементных растворов от В:Ц при добавках глин и бентонитов:
1 – без добавок; 2 – 5 % каолиновых глин; 3 – 5 % натриевого бентонита

Портландцементы обладают способностью удерживать определенный объем воды, избыточный для гидратации цемента. Цементноводное отношение цементного осадка характеризует водоудерживающую способность цемента без учета фактора воздействия давления нагнетания.

Кроме водоотделения вследствие седиментации цементных частиц при нагнетании раствора в породный массив происходит процесс отделения воды из раствора под действием перепада давления – водоотдача цементного раствора. Величина водоотда-

чи и ее скорость зависят от концентрации и температуры раствора, добавок, перепада давления и проницаемости фильтрующей среды.

Эксперименты проводили на установке, снабженной фильтрационными камерами (рис. 10).

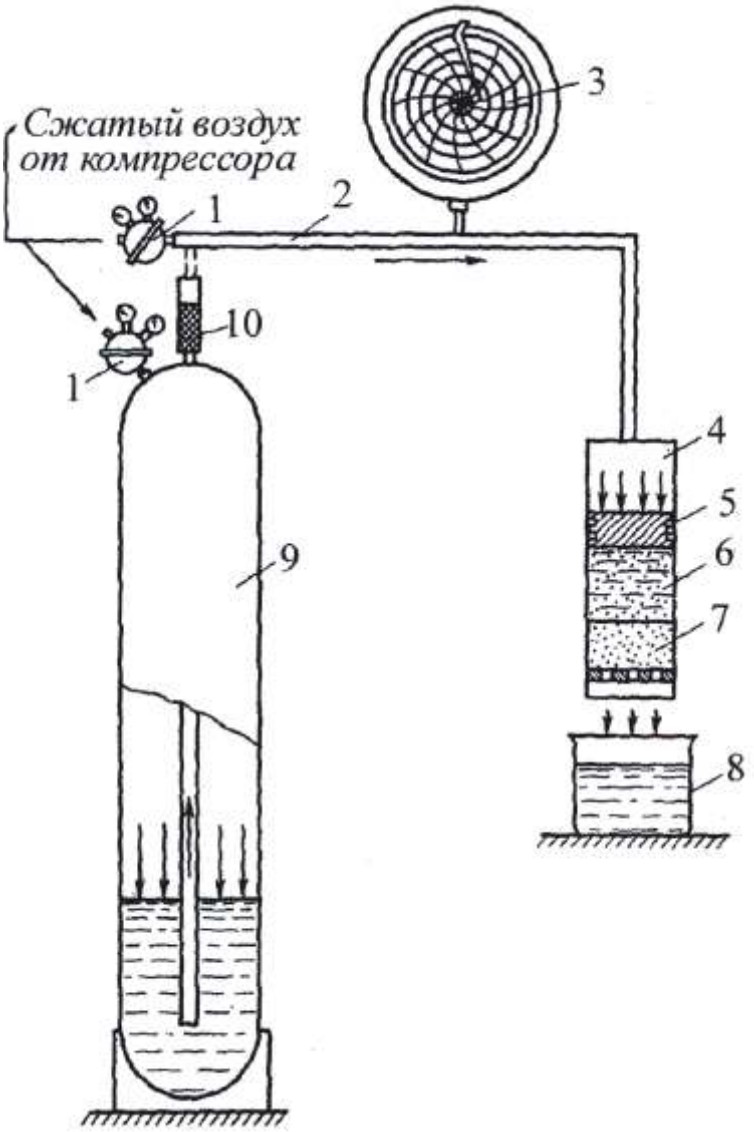

Рис. 10. Схема лабораторной установки для исследования водоотдачи цементационных растворов:

1 – редуктор кислородный; 2 – шланг высоконапорный; 3 – манометр-самописец МСТМ-410; 4 – фильтрационная камера; 5 – поршень; 6 – раствор; 7 – образец проницаемой среды; 8 – мерная емкость; 9 – баллон; 10– фильтр

Установка состоит из баллона для воды, фильтрационной камеры, компрессора, соединительной арматуры и контрольно-измерительных приборов. Основным элементом установки является фильтрационная камера, в которую устанавливается образец проницаемой среды и заливается исследуемый тампонажный раствор.

В опытах использовали две камеры: объемом 0,2 и 3 л (рис. 11).

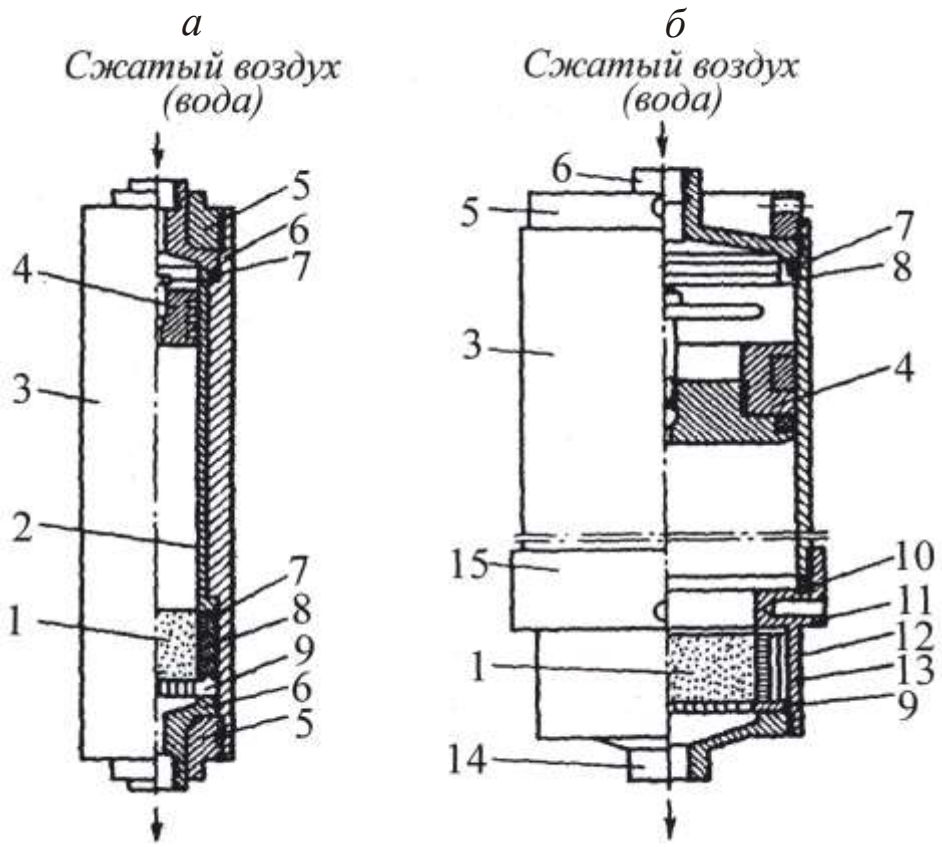

Рис. 11. Схемы фильтрационной камеры объемом 0,2 (*а*) и 3 л (*б*): 1 – образец проницаемой среды; 2 – втулка; 3 – стакан; 4 – поршень; 5 – гайка; 6 – крышка-штуцер; 7, 10, 11 – кольца резиновые; 8 – кольцо распорное; 9 – решетка; 12 – менделеевская замазка; 13 – обойма; 14 – крышка нижняя; 15 – съемная часть стакана

На рис. 12–13 представлены результаты экспериментальных исследований водоотдачи, интенсивность которой определена в виде отношения количества фильтрата $Q_в$ к количеству залитого в фильтрационную камеру раствора $Q_р$.

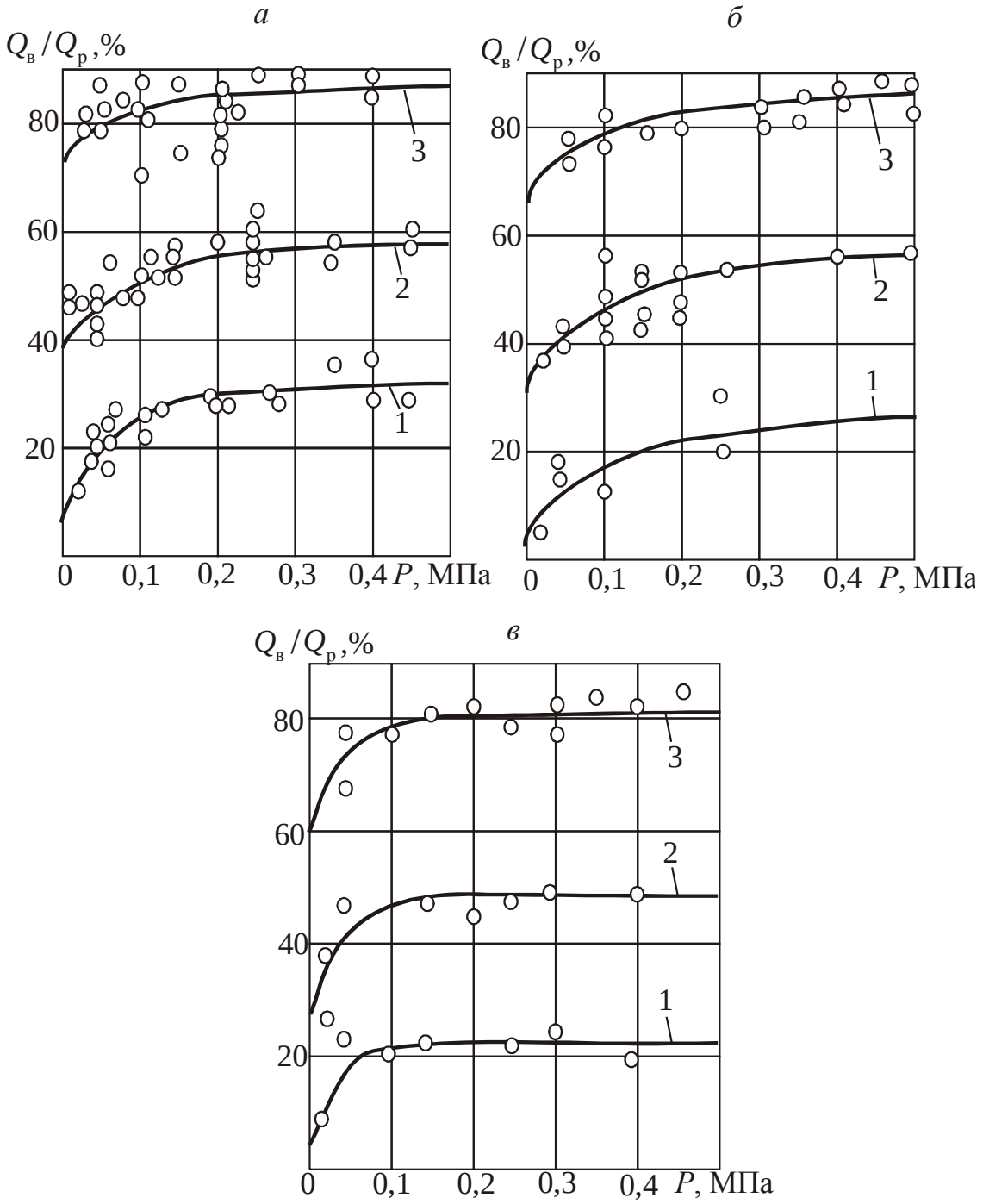

Рис. 12. Зависимость изменения относительных количеств отфильтровывающейся жидкой фазы 100 $Q_в$ / $Q_р$ от перепадов давления P для растворов без добавок и с добавкой 3 % хлористого кальция (*а*), 4 % бентонитового глинопорошка (*б*) и 4 % жидкого стекла с модулем, равным 3, и объемным весом 1,4 г/см^3 (*в*) (портландцемент М 500 Топкинского завода):
кривые 1, 2 и 3 – при концентрации растворов соответственно 1:0,5; 1:1 и 1:3

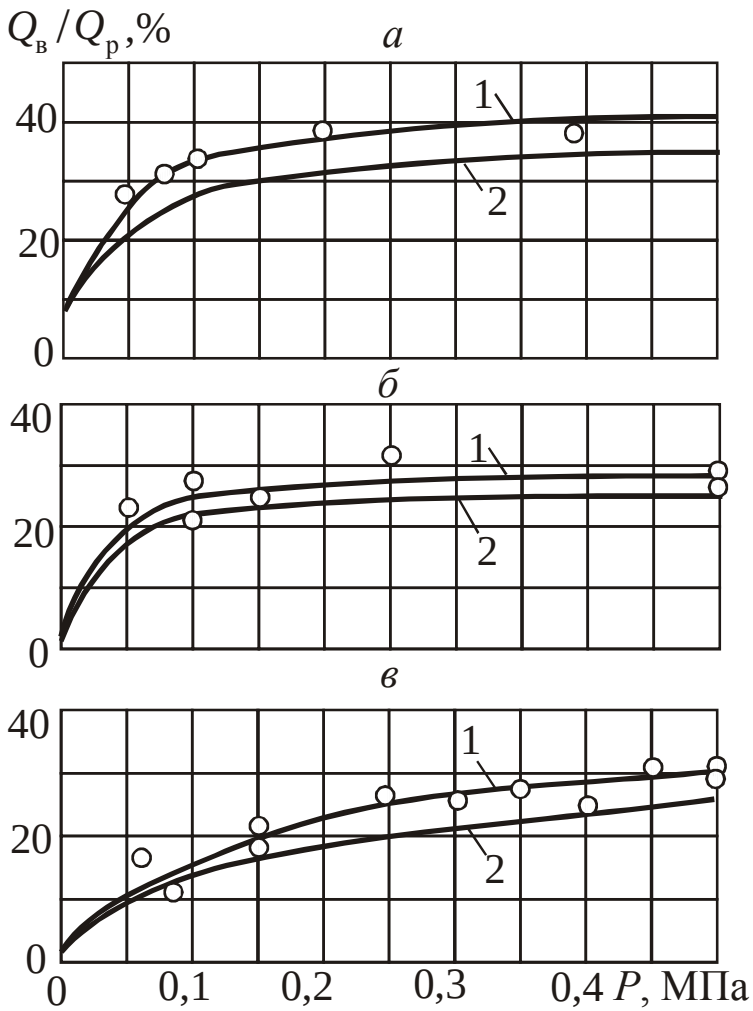

Рис. 13. Зависимость изменения относительных количеств отфильтровывающейся жидкой фазы 100 $Q_в$ / $Q_р$ от перепадов давления P для растворов концентрации 1:0,5, приготовленных из различных цементов:

а, *б* и *в* – растворы соответственно без добавок и с добавкой 3 % $CaC1_2$, 4 % жидкого стекла и 4 % бентонитовой глины; кривые 1 и 2 – для растворов, приготовленных из портландцемента соответственно М400 Яшкинского завода и М500 Топкинского завода

Зависимости водоцементного отношения растворов, из которых отфильтрована жидкая фаза, от перепадов давлений представлены на рис. 14 и 15.

Результаты эксперимента в фильтрационных камерах позволили установить следующее.

Под действием перепада давления при наличии проницаемой среды водоотдача увеличивается. Рост количества фильтрата

при водоотдаче растворов без добавок происходит равномерно и наблюдается до давления 0,25 МПа. При возрастании давления от 0,25 до 0,5 МПа увеличение объема фильтрата незначительное.

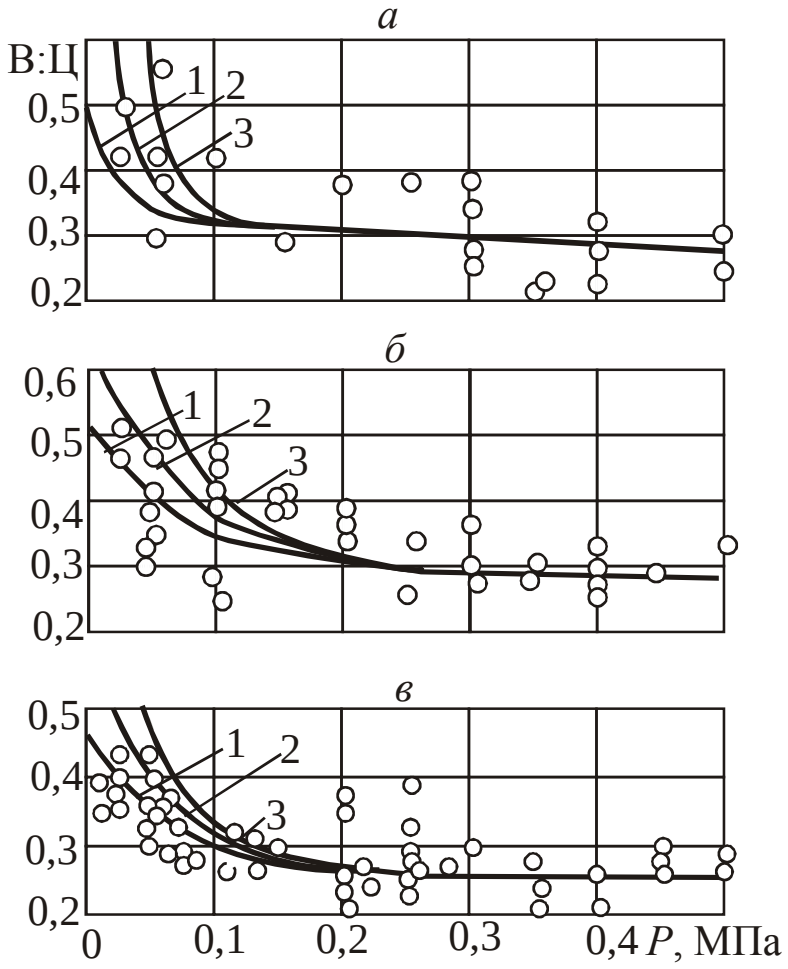

Рис. 14. Зависимость изменения остаточного В:Ц растворов от перепадов давления *P* портландцемента М500 Топкинского завода:

а, *б* и *в* – растворы соответственно с добавкой 4 % жидкого стекла, 4 % бентонитовой глины и без добавок; кривые 1, 2 и 3 – для растворов концентрации соответственно 1:0,5; 1:1 и 1:3

Добавка хлористого кальция не оказывает влияния на изменение объема фильтрата, кривая предельной водоотдачи для растворов с добавкой хлористого кальция совпадает с кривой для растворов без добавок.

Добавки бентонитового глинопорошка и жидкого стекла способствуют уменьшению объема фильтрата, причем добавка

жидкого стекла более эффективна. Действие добавки жидкого стекла на изменение объема фильтрата резко уменьшается с увеличением давления до 0,1 МПа, а в интервале давлений от 0,1 до 0,5 МПа – уменьшается незначительно.

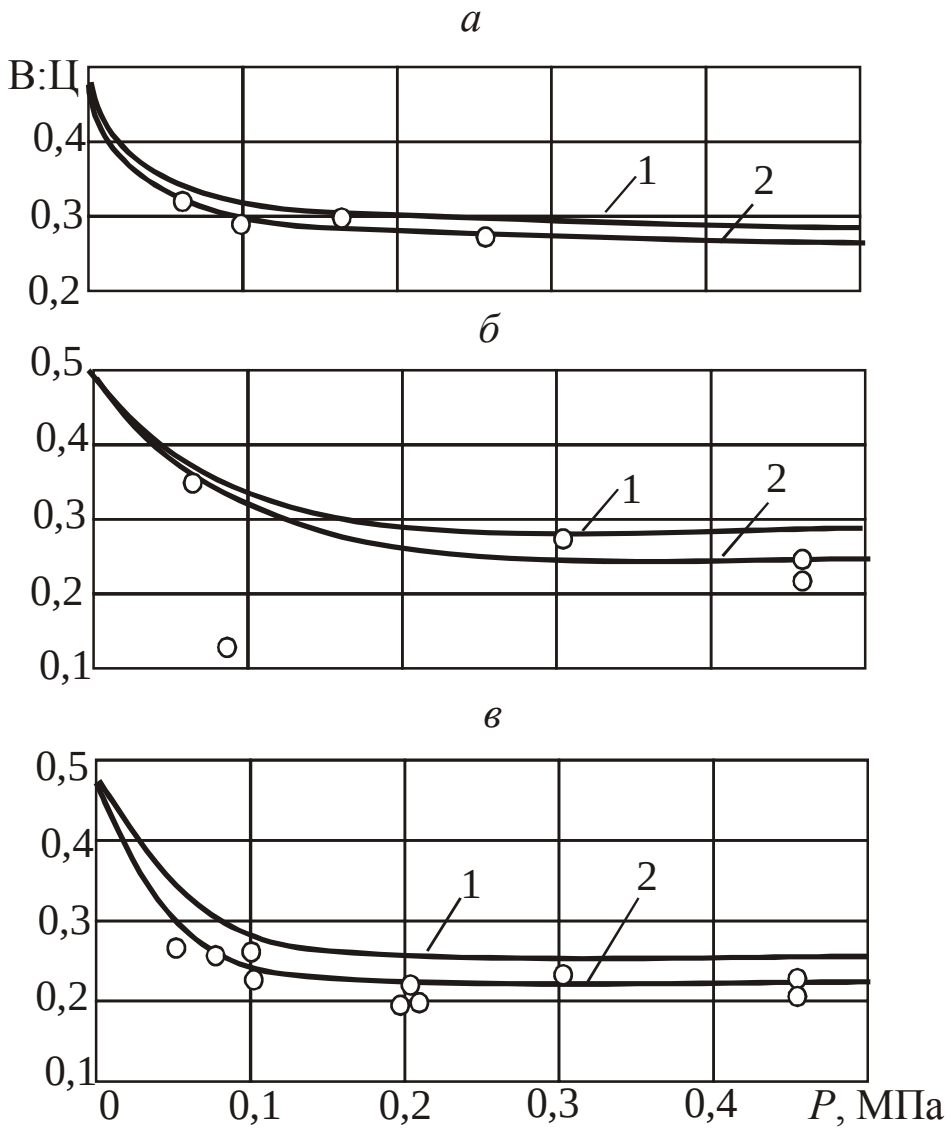

Рис. 15. Зависимость изменения остаточного В:Ц растворов концентрации 1:0,5 от перепадов давления *P* для портландцемента М500 Топкинского завода (кривая 1) и портландцемента М400 Яшкинского завода (кривая 2):
а, *б* и *в* – растворы соответственно с добавкой 4 % жидкого стекла, 4 % бентонитовой глины и без добавок

Водоотдача под давлением и при наличии проницаемой среды для растворов, приготовленных из портландцемента марки

400 Яшкинского завода, больше, чем водоотдача растворов, приготовленных из портландцемента марки 500 Топкинского завода.

Остаточное водоцементное отношение растворов также зависит от давления, при котором осуществляется отфильтровывание. Для нефильтрованных растворов без добавок водоцементное отношение камня колеблется в зависимости от концентрации от 0,47 до 0,82 (на графике данные значения соответствуют нулевому давлению). Резкое уменьшение водоцементного отношения происходит в интервале давлений от 0 до 0,25 МПа. При большем увеличении давления уменьшения остаточного водоцементного отношения почти не наблюдается, поэтому кривая зависимости в интервале давлений от 0,25 до 0,5 МПа выполаживается и приближается к прямой. При давлении в период отфильтровывания 0,5 МПа остаточное водоцементное отношение независимо от первоначальной концентрации раствора и равно 0,24.

Так как добавка хлористого кальция не влияет на изменение количества фильтрата, остаточное водоцементное отношение растворов, обработанных хлористым кальцием, не отличается от остаточного водоцементного отношения растворов без добавок.

2.5. Реологические свойства цементационных растворов

Плотный высокопрочный цементный камень образуется при твердении цементного теста, полученного при затворении сухого цемента и 20–25 % (от массы цемента) воды. Однако концентрация такого раствора настолько велика, что его транспортирование в породный массив невозможно. Поэтому при приготовлении в раствор вводят гораздо большее количество воды, чем это нужно для гидратации цемента. Уменьшение концентрации раствора приводит к повышению седиментационной неустойчивости и необходимости рассмотрения раствора как суспензии. Экспериментальные исследования по заполнению трещин цементным материалом, выполненные в КузНИИшахтострое, показывают, что ориентировочно растворы с цементноводным массовым отношением Ц:В $\geq$ 1:0,5 можно рассматривать как вязкопластичные жидкости, с Ц:В $\leq$ 1:1 – как нестабильные суспензии, а растворы

промежуточных концентраций – как обладающие проявлением и вязкопластичных свойств и седиментационной неустойчивостью. При этом введение стабилизирующих добавок приводит к преобладанию пластичности.

Зависимость касательного напряжения τ от градиента скорости раствора по высоте потока dv/dh для стабильных растворов (Ц:В ≥ 1:0,5) имеет вид

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dh}, \tag{3}$$

а для нестабильных растворов (Ц:В ≤ 1:1) эту зависимость предлагается аппроксимировать следующим уравнением:

$$\tau = \begin{cases} \tau_0 + \mu \left(\dfrac{dv}{dh} \right)^{\dfrac{\ln\left(a^* - \tau_0/\mu\right)}{\ln a^*}}, & 0 < \dfrac{dv}{dh} \le a^*; \\ \mu \dfrac{dv}{dh}, \dfrac{dv}{dh} \ge a^*. \end{cases} \tag{4}$$

Известное уравнение (3) не требует никаких пояснений, а его использование предполагает лишь информацию о величинах предельного динамического напряжения сдвига τ_0 и коэффициента структурной вязкости μ. Поэтому остановимся несколько подробнее на описании предлагаемого уравнения (4).

При малых скоростях потока раствора и, соответственно, малых величинах градиента скорости dv / dh в режиме интенсивной седиментации нестабильный раствор ведет себя как пластичное тело. При $dv / dh \to 0$ $\tau \to \tau_0$. По мере возрастания скорости v и градиента dv / dh все более проявляются вязкостные свойства. При достижении средней скорости потока (отношение расхода раствора к площади живого сечения потока), равной минимальной безосадочной $v_{кр}$, т. е. при $dv / dh \ge a^*$, раствор движется в безосадочном режиме и вязкостные свойства преобладают над пластическими. Нелинейная реологическая зависимость плавно переходит в линейный закон трения гомогенной жидкости. При этом несколько меняется физическая сущность коэффициента μ: коэффициент структурной вязкости переходит в коэффициент динамической вязкости. Величину критерия перехода от нели-

нейного к линейному закону трения, очевидно, ориентировочно можно принять равной $a^* = v_{кр} / (0{,}5\delta)$, где δ – диаметр живого сечения потока раствора.

Реологические характеристики раствора (τ_0, μ) определяют на ротационных вискозиметрах, например, таких как СНС-2, ВСН-2, РВЦ-1, РПЦ-1. Основными частями ротационного вискозиметра СНС-2 (рис. 16) являются стакан, приводящийся во вращение электродвигателем, и соосно вложенный в него цилиндр, подвешенный на упругой нити. В кольцевой зазор между цилиндром и стаканом заливается раствор. Определение реологических характеристик осуществляется по измеренному углу закручивания стальной нити.

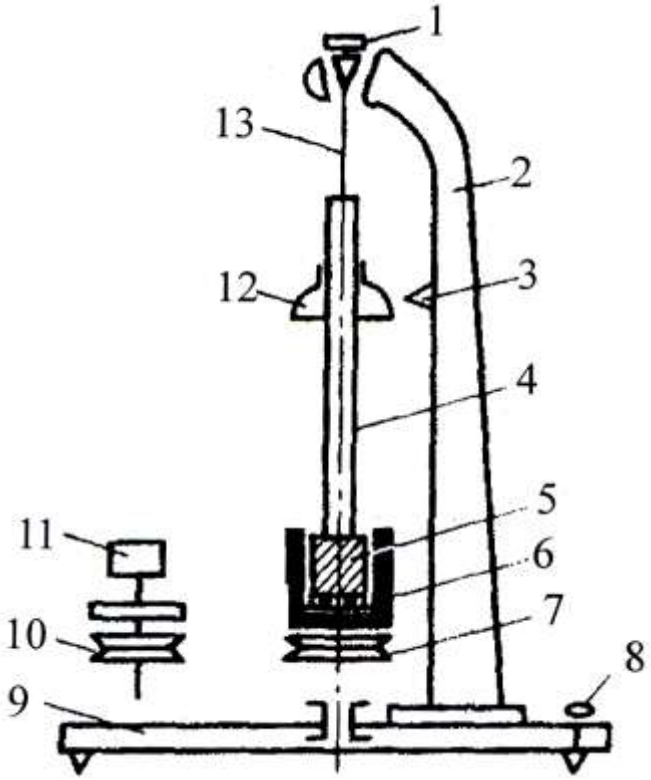

Рис. 16. Схема ротационного вискозиметра СНС-2:
1 – пробка; 2 – стойка;3 – указатель; 4 – трубка; 5 – внутренний цилиндр; 6 – стакан; 7, 10 – шкивы; 8 –установочный винт; 9 – плита; 11 – электродвигатель; 12 – лимб; 13 – стальная упругая нить

Ориентировочные значения реологических характеристик приведены в табл. 1. [3].

На практике часто для определения текучести раствора и возможности его перекачивания насосами пользуются показателями расплыва и условной вязкости раствора. Расплыв раствора определяют при помощи конуса конструкции АзНИИ, а условную вязкость – полевым вискозиметром СВП-5. Широко применяемые на практике растворонасосы могут перекачивать растворы с минимальным расплывом 12 см и минимальной условной вязкостью 45–50 с.

Таблица 1

Реологические свойства цементационных растворов

Состав раствора		τ_0, кПа	μ, Па·с
Ц:В	добавка, % массы цемента		
1:0,4	–	15,25	60,3
1:0,6	–	2,822	14,7
1:0,8	–	0,747	8,7
1:1	–	0	5,99
1:2	–	0	3,1
1:3	–	0	2,3
1:5	–	0	1,6
1:10	–	0	1,3
1:0,6	0,2 % ССБ 5 % бентонита 3 % $CaCl_2$, 5 % жидкого стекла Выдерживание в покое 30 мин	2	12
1:0,6		9	63
1:0,6		4,5	30
1:0,6		6,3	96
1:0,6		21,3	89

2.6. Сроки схватывания цементационных растворов и прочность цементного камня

Сроки схватывания цементных растворов зависят от минералогического состава и марки цемента, количества воды затворения, вида и количества вводимых в состав раствора добавок-ускорителей или замедлителей схватывания и температуры окружающей среды.

Процесс схватывания цементных растворов обычно оценивают прибором Вика. Иглу прибора погружают в цементный раствор через каждые 5 мин до начала схватывания и через 15 мин – в последующее время до конца схватывания. Началом схватывания считают время от начала затворения до того момента, когда

игла не будет доходить до дна прибора на $(0{,}5 \div 1)10^{-3}$ м. Концом схватывания считают время от начала затворения до момента, когда игла будет опускаться в раствор не более чем на 1мм.

Процесс загустевания-схватывания цементных растворов может также изучаться на пластометрах различных конструкций.

Типичные кривые изменения пластической прочности во времени для цементного раствора составов 1:0,5 и 1:1 (цемент: вода) без добавок показаны на рис. 17 [1]. В начальный период пластическая прочность невелика и нарастает медленно. Первый период характеризуется наличием в системе разобщенных частиц и гидратных новообразований, поэтому, например, перемешивание раствора в этот период не нарушает процесса твердения. Второй период – характеризуется интенсивным нарастанием пластической прочности, когда начинают возникать кристаллообразования. Нарушение структуры в этот период приводит к образованию рыхлой массы.

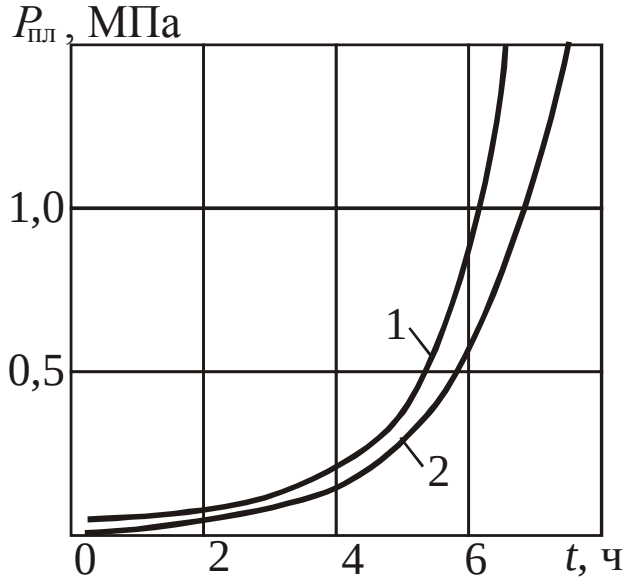

Рис. 17. Зависимости пластической прочности $P_{пл}$, от времени t для цементных растворов:
1 – для состава Ц:В = 1:0,5;
2 – для состава Ц:В 1:1

Начало схватывания раствора из портландцемента, определяемое с помощью прибора Вика, соответствует по кривой пластичности 0,1–0,15 МПа. Это значение находится выше места перегиба и указывает на первую потерю пластичности. Конец схватывания по кривой пластической прочности соответствует приблизительно 0,5 МПа, что указывает на возрастание скорости твердения в первый период.

Для других видов цемента пределы начала и конца схваты-

вания на кривой пластичности могут иметь другие значения.

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

3.1. Расчет ожидаемых расходов растворов и материалов на их приготовление

В целях исключения кольматации трещин вблизи скважин следует применять концентрации растворов в соответствии с удельным водопоглощением породного массива по табл. 2.

Таблица 2

Выбор концентрации тампонажного раствора

Удельное водопоглощение породного массива, л/мин·м·м вод. ст.	Начальная концентрация тампонажного раствора, Ц:В
от 0,01 до 0,5	1:4
от 0,5 до 1,0	1:3
от 1,0 до 2,0	1:2
от 2,0 до 4,0	1:1
более 4,0	1:0,8–1:0,5

Объем трещин и пустот, подлежащих тампонажу, определяют по формуле

$$W_{\text{п}} = \frac{\pi \text{Д}_{\text{вн}}^2 H m_t}{4}, \qquad (5)$$

где $W_{\text{п}}$ – объем трещин и пустот, м^3; $\text{Д}_{\text{вн}}$ – внешний диаметр цилиндра подлежащих тампонированию горных пород, м; H – мощность тампонируемых пород, м; m_t – скважность (трещинная пустотность, коэффициент трещиноватости) породного массива.

Для упрощения расчетов принимают, что заполнение трещин осуществляется раствором каждой из принятых концентраций в равных долях. Тогда объем пустот, заполненных раствором одной концентрации составит

$$W = \frac{W_{\text{п}}}{n}, \qquad (6)$$

где n – количество принятых для тампонажа концентраций растворов.

Объем раствора одной концентрации определяют

$$Q = \frac{W}{a}, \qquad (7)$$

где a – выход тампонажного камня принятой концентрации раствора с учетом отфильтровывания под действием давления нагнетания (принимается по табл. 3).

Ожидаемый расход тампонажных материалов определяют суммированием расходов по отдельным концентрациям растворов.

Варианты выполнения расчета расхода материалов и растворов для различных видов выработок приведены в табл. 4.

Контрольные вопросы

1. Общие требования к цементам и тампонажным растворам.
2. Добавки к тампонажным растворам, их назначение.
3. Что такое "проникающая способность тампонажных растворов"? Ее роль в тампонаже горных пород.
4. Водоотдача тампонажных растворов и факторы, влияющие на ее изменение.
5. Влияние реологических свойств тампонажных растворов на характер заполнения трещин.
6. Факторы, влияющие на сроки схватывания тампонажных растворов и прочность тампонажного камня.
7. Что такое "удельное водопоглощение" и как оно определяется?
8. Факторы, влияющие на расход растворов при тампонаже породных массивов.
9. Как определяется расход материалов на тампонаж породных массивов.

Таблица 3

Свойства тампонажных растворов, приготовленных из портландцемента М400

Состав раствора Ц:В	Расход материалов на 1 м^3 раствора			Удельный вес раствора, т/м^3	Выход тампонажного камня		Сроки схватывания, ч – мин		Предел прочности , кг/см^2	
	Цемент, кг	Вода, л	$CaCl_2$, кг		без учета отфильт-ровывания	с учетом отфильтро-вывания	начало	конец	без учета отфильт-ровывания	с учетом отфильтро-вывания
1:4	232	920	7,0	1,14	0,21	0,09	6–20	10–55	23	–
1:3	301	903	9,0	1,21	0,26	0,12	–	–	25	70
1:2	428	857	12,8	1,27	0,38	0,18	5–30	9–00	28	73
1:1	750	750	22,5	1,51	0,65	0,42	4–00	8–20	45	108
1:0,5	1200	600	36,0	1,82	0,95	0,68	3–40	6–20	95	190

Таблица 4

Варианты расчета материалов и растворов

Вид выработки	Диаметр в свету или площадь поперечного сечения, $м^2$		Вид тампонажа	Цель тампонажа	Длина участка, м	Трещинова-тость, %		Тип крепи		Примечание (количество вариантов
Вертикальный ствол	6,0	8,0	предварительный	водоподавление	120,0	+	+	+	–	4
				упрочнение	120,0	+	+	+	–	4
Горизонтальная выработка	10,0	16,0	предварительный	водоподавление	20,0	+	+	+	+	8
				упрочнение	120,0	+	+	+	+	8

Литература

1. Максимов, А. П. Тампонаж горных пород / А. П. Максимов, В. В. Евтушенко. – М. : Недра, 1978. – 350 с.

2. Хямяляйнен, В. А. Формирование цементационных завес вокруг капитальных горных выработок / В. А. Хямяляйнен, Ю. В. Бурков, П. С. Сыркин. – М. : Недра, 1994. – 400 с.

3. Бурков, Ю. В. Направления совершенствования технологии инъекционного упрочнения пород вокруг выработок / Ю. В. Бурков, В. А. Хямяляйнен, П. С. Сыркин. – Шахтное строительство, 1989. – № 4. – С. 17–20.

4. Альбом технологических схем предварительного тампонирования водоносных горных пород при сооружении вертикальных стволов шахт / Е. Г. Дуда, Г. И. Комаров, В. А. Хямяляйнен и др. – Кемерово: Кузниишахтострой, 1979. – 78 с.

5. Технологические схемы упрочнения массивов горных пород при проведении капитальных горных выработок в зонах геологических нарушений шахт / Е. Г. Дуда, Ю. В. Бурков, В. А. Хямяляйнен и др. – Кемерово: Кузниишахтострой, 1980. – 68 с.