

□ Авторы статьи:

Копытов  
Александр Иванович,  
докт. техн. наук, проф. каф.  
строительства подземных  
сооружений и шахт КузГТУ,  
тел.(+7-384-2)39-63-76.

Еременко  
Андрей Андреевич,  
докт. техн. наук, профессор, зав.  
лаб. физико-технических геотехно-  
логий Института горного дела  
Сибирского отделения РАН

Першин  
Владимир Викторович,  
докт. техн. наук, проф., зав.  
каф. строительства подземных  
сооружений и шахт КузГТУ,  
тел.(+7-384-2)39-63-77.

УДК 622.257.1

А. В. Исаенко, А. В. Угляница

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОМПРЕССИОННЫХ СВОЙСТВ АВТОКЛАВНЫХ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТОПЛИВНЫХ ШЛАКОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ ИХ АВТОКЛАВНОЙ ОБРАБОТКИ

В КузГТУ выполнены лабораторные исследования зависимости компрессионных свойств закладочных автоклавных материалов для вертикальных горных выработок на основе топливных шлаков от параметров закладочной смеси [1].

Однако известно, что на физико-механические свойства автоклавных материалов оказывают влияние продолжительности: предавтоклавной выдержки, подъема давления водяного пара, выдержки при максимальном давлении водяного пара и спуска давления водяного пара.

Продолжительность выдержки закладочной смеси перед автоклавной обработкой. Влияние продолжительности предавтоклавной выдержки слабо изучено, но известно, что продолжительность увеличения продолжительности предавтоклавной выдержки с 2 до 12 часов может приводить к увеличению прочности до 20 % [2]. При проведении исследований принимали продолжительность предавтоклавной выдержки от 2 до 10 часов с шагом 2 часа. Ограничение максимальной продолжительности выдержки закладочной смеси до 10 часов связано с технологическими особенностями послойного создания искусственного автоклавного массива в вертикальной горной выработке, когда к созданию последующего слоя приступают только после завершения твердения предыдущего. Поэтому любое увеличение каждого технологического этапа приведет к увеличению продолжительности и стоимости закладки.

Продолжительности (скорость) подъема давления водяного пара до максимального значения. Продолжительность подъема давления водяного пара принимали в интервале от 0,75 до 4,5 часов с шагом 1,5 часа. Это связано с тем, что пропаривание закладочного материала производится через инжекторы, расположенные внутри этого материала. Увеличение расстояния между инжекторами, и соответственно снижение их стоимости, приведет к увеличению продолжительности подъема давления водяного пара. Так как для закладки вертикальных горных выработок используются материалы с низким комплексом эксплуатационных свойств, то

любое даже незначительное их понижение может сделать эти материалы непригодными для закладки. Следовательно, необходимо провести комплекс исследований по изучению влияния продолжительности подъема давления водяного пара на компрессионные свойства закладочного материала. Минимальная продолжительность подъема давления связана с необходимостью разогрева массива паром с ограниченной температурой (так как давление пара не должно превышать 0,9 МПа).

Продолжительность выдержки образцов при максимальном давлении (изотермической выдержки) определяется требованиями, предъявляемыми к качеству изделия в зависимости от величины давления водяного пара. Продолжительность этого этапа должна быть тем короче, чем выше давление, в ряде случаев он может отсутствовать (пиковый режим). В работе диапазон изменения принимали от 0 до 8 часов с шагом 2 часа,

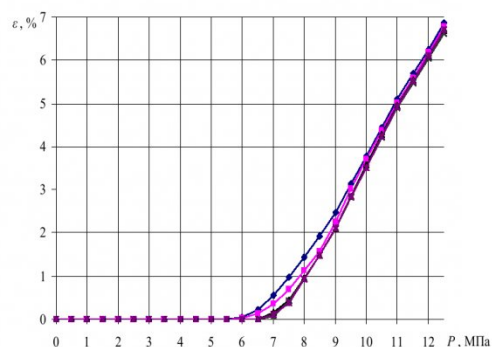


Рис. 1. Зависимость компрессии  $\epsilon$  от нагрузки  $P$  и продолжительности предавтоклавной выдержки при  $K_{оси} = 0,6$   
 ◆ продолжительность предавтоклавной выдержки 2 часа;  
 ■ продолжительность предавтоклавной выдержки 4 часа;  
 ▲ продолжительность предавтоклавной выдержки 6 часов;  
 ✕ продолжительность предавтоклавной выдержки 8 часов;  
 \* продолжительность предавтоклавной выдержки 10 часов)



поскольку дальнейшее увеличение нерационально и может привести лишь к дополнительным затратам.

Продолжительность (скорость) спуска давления с максимального значения до атмосферного. При резком падении давления водяного пара условия для протекания химических реакций менее благоприятны, чем при медленном снижении, к тому же, на этом этапе изделие имеет более высокую температуру, чем окружающая среда, поэтому в порах, заполненных конденсатом, происходит бурное парообразование, что может привести к значительному снижению компрессионных свойств. Продолжительность спуска давления водяного пара принимаем в интервале от 0,45 до 5 часов. Минимальная продолжительность спуска давления водяного пара связана с естественной продолжительностью процесса передачи тепла, а максимальная продолжительность с необходимостью получения закладочного массива с требуемыми свойствами при минимальных материальных и трудовых затратах.

Существенное влияние на физико-механические свойства автоклавных материалов так же оказывают параметры смеси, которые при исследовании принимали следующими: тип извести (негашеная кальциевая известь первого сорта); степень дисперсности составляющих вяжущего (фракция «-0,16»); водовяжущее отношение ( $BBO = 0,5$ ). Один из важных параметров смеси – коэффициент основности принимали исходя их предварительных исследований  $K_{осн} = 0,7$  и изменяли, в дальнейшем, для выявления зависимостей.

При проведении лабораторных испытаний образцы изготавливали в лабораторном автоклаве АЛ, предназначенном для проведения физико-химических обработок различных веществ и материалов нейтральными, кислыми и щелочными растворами при повышенной температуре и под давлением.

Обработку вели по заданному температурному графику. Подъем и спуск температуры регулировали с помощью реостата. Давление контролировали с помощью манометра, установленного на автоклаве.

Для определения относительной деформации испытание автоклавного материала производили методом компрессионного сжатия в соответствии с ГОСТ 12248–96 [3]. Эту характеристику определяли по результатам испытаний образцов в компрессионном приборе (одометре), исключающем возможность бокового расширения образца при его нагружении вертикальной нагрузкой.

Предварительные испытания показали, что средняя плотность шлако-известковых автоклавных материалов не превышает  $1250 \text{ кг/м}^3$ . При глубине стволов до 1000 м максимальное давление для определения компрессионных свойств автоклавных материалов 12,5 МПа, такой негативный вариант возможен при отсутствии сцепления закладочного

массива с крепью ствола.

В соответствии с ГОСТ 12248–96 [3] нагружение производили ступенями. Величину ступени принимали 0,2 МПа. Каждую ступень нагружения прикладывали до условной стабилизации деформации образца, за критерий которой принимали скорость деформации образца, не превышающую 0,01 мм за последние 10 мин наблюдений. Деформацию образца измеряли индикатором часового типа.

С целью определения необходимого минимального числа испытаний одинаковых образцов, а также для дальнейшего планирования экспериментальных исследований были выполнены испытания десяти однотипных образцов [4]. Эти испытания показали, что необходимое количество одинаковых образцов для точности полученного результата, равной 10 % составляет  $n = 6,78 \pm 2,87$ . В дальнейшем в каждой серии экспериментов ограничивались десятью образцами [4].

Первоначальную продолжительность каждого этапа автоклавной обработки образцов принимали следующими: предавтоклавная выдержка – 4 часа; подъема давления водяного пара – 0,75 часа; выдержка образцов при максимальном давлении водяного пара – 6 часов; спуска давления водяного пара до атмосферного – 5 часов. Для выявления степени влияния каждого параметра на компрессионные свойства закладочных материалов изменяли значения этого параметра по указанным ниже алгоритмам.

Если образцы не сжимались, то значение коэффициента основности снижали с шагом 0,1, если сжимались – увеличивали с шагом 0,1 (при этом коэффициент основности увеличивали до значения 1,1, так как использование смесей с большим содержанием извести не целесообразно). После получения безусадочного материала или определения минимального значения коэффициента основности, при котором образцы не сжимались изменяли исследуемый параметр автоклавной обработки.

Первоначально определяли степень влияния предавтоклавной выдержки на компрессионные свойства, для этого изготавливали образцы с продолжительностью предавтоклавной выдержки 2 часа и увеличивали до 10 часов с шагом 2 часа.

Для определения степени влияния продолжительности подъема давления водяного пара на компрессионные свойства автоклавного материала изготавливали образцы с продолжительностью подъема водяного пара – 0,75 часа, затем увеличивали до 1,5 часа и далее с шагом 1,5 часа до 4,5 часов.

Степень влияния продолжительности выдержки смеси в автоклаве при максимальном давлении на компрессионные свойства автоклавного материала первоначально определяли на образцах, выдержанных при максимальном давлении водяного пара в течение 8 часов. После этого уменьшали продолжительность автоклавной обработки при максимальном давлении водяного пара до 2

часов с шагом 2 часа.

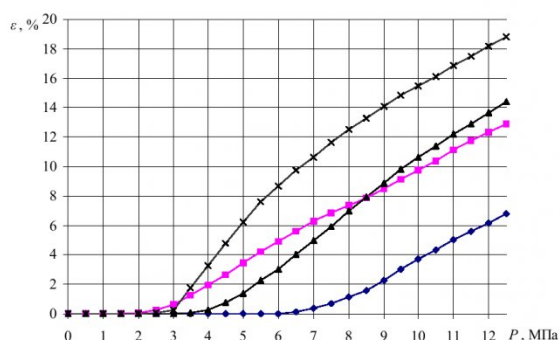


Рис. 2. Зависимость компрессии  $\epsilon$  от нагрузки  $P$  и продолжительности подъема давления при  $K_{осн} = 0,6$ :  
 — продолжительность 0,75 часа;  
 — продолжительность 1,50 часа;  
 — продолжительность 3,00 часа;  
 — продолжительность 4,50 часа)

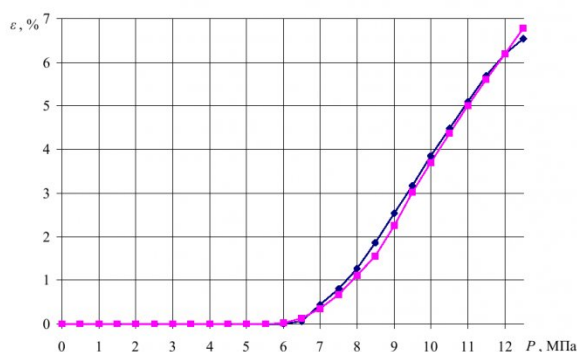


Рис. 3. Зависимость компрессии  $\epsilon$  от нагрузки  $P$  и продолжительности выдержки при максимальном давлении при  $K_{осн} = 0,6$   
 — продолжительность выдержки при максимальном давлении 8 часов;  
 — продолжительность выдержки при максимальном давлении 6 часов)

Продолжительность снижения давления водяного пара при исследовании степени влияния продолжительности снижения давления водяного пара на компрессионные свойства автоклавного материала принимали 5 часов, затем значение указанного параметра снижали с шагом 1 час.

При исследовании влияния продолжительности предавтоклавной выдержки на компрессионные свойства автоклавного материала, образцы с указанными выше параметрами под давлением 12,5 МПа не сжимались. Фрагмент результатов испытаний представлен в табл. 1. Графическая иллюстрация результатов исследования представлена на рис. 1.

Таблица 1. Компрессия образцов, испытанных при давлении 12,5 МПа

$K_{осн}$	Компрессия, % при продолжительности предавтоклавной выдержки в часах				
	2	4	6	8	10
0,6	6,88	6,78	6,68	6,62	6,71
0,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

При исследовании влияния продолжительности подъема давления водяного пара на компрессионные свойства автоклавного материала, образцы с указанными выше параметрами под давлением 12,5 МПа не сжимались. Фрагмент результатов испытаний представлен в табл. 2. Графическая иллюстрация результатов исследования представлена на рис. 2.

Таблица 2. Компрессия образцов, испытанных при давлении 12,5 МПа

$K_{осн}$	Компрессия, % при продолжительности подъема давления в часах			
	0,75	1,50	3,00	4,50
0,6	6,78	12,91	14,41	18,80
0,7	0,00	0,00	0,00	0,00

При исследовании влияния продолжительности выдержки смеси в автоклаве при максимальном давлении водяного пара на компрессионные свойства автоклавного материала, образцы с указанными выше параметрами под давлением 12,5 МПа не сжимались. Фрагмент результатов испытаний представлен в табл. 3. Графическая иллюстрация результатов исследования представлена

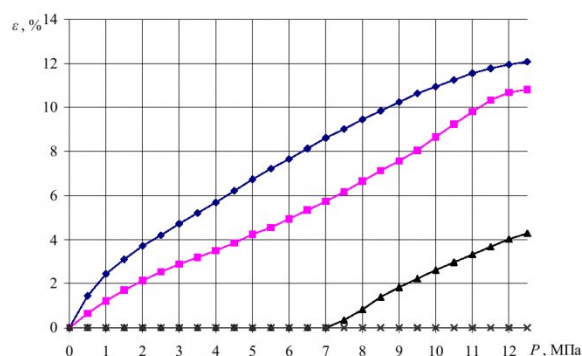


Рис. 4. Зависимость компрессии  $\epsilon$  от нагрузки  $P$  и коэффициента основности  $K_{осн}$  при продолжительности выдержки при максимальном давлении 4 часа:

— коэффициент основности  $K_{осн} = 0,7$ ;  
 — коэффициент основности  $K_{осн} = 0,8$ ;  
 — коэффициент основности  $K_{осн} = 0,9$ ;  
 — коэффициент основности  $K_{осн} = 1,0$

Таблица 3. Компрессия образцов, испытанных при давлении 12,5 МПа

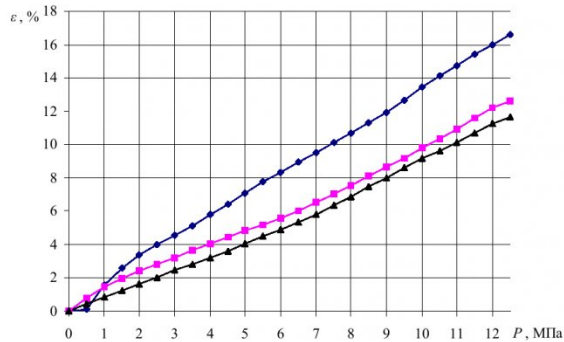
$K_{осн}$	Компрессия, % при продолжительности выдержки при максимальном давлении в часах			
	8	6	4	2
0,6	6,53	6,78	—	—
0,7	0,00	0,00	12,06	—
0,8	—	—	10,80	—
0,9	—	—	4,28	16,61
1,0	—	—	0,00	12,61
1,1	—	—	—	11,65



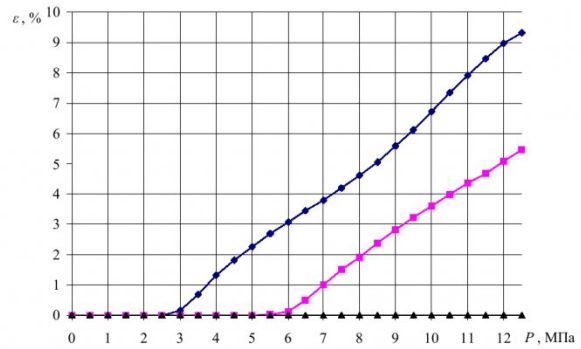
Таблица 4. Компрессия образцов, испытанных при давлении 12,5 МПа

$K_{осн}$	Компрессия, % при продолжительности снижения давления в часах			
	5	4	3	2
0,6	6,78	–	–	–
0,7	0,00	9,31	–	–
0,8	–	5,45	–	–
0,9	–	0,00	6,11	–
1,0	–	–	5,60	–
1,1	–	–	4,90	6,20

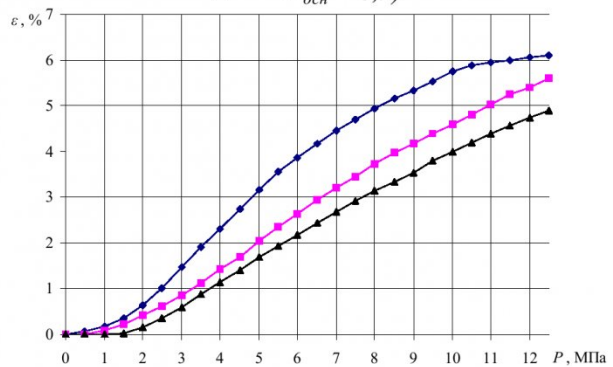
При исследовании влияния продолжительности снижения давления водяного пара в автоклаве на компрессионные свойства автоклавного материала, образцы с указанными выше параметрами под давлением 12,5 МПа не сжимались. Фрагмент результатов испытаний представлен в табл. 4. Графическая иллюстрация результатов исследования представлена на рис. 6–7.

Рис. 5. Зависимость компрессии  $\varepsilon$  от нагрузки  $P$  и коэффициента основности  $K_{осн}$  при продолжительности выдержки при максимальном давлении 2 часа:

—  $K_{осн} = 0,9$ ;  
—  $K_{осн} = 1,0$ ;  
—  $K_{осн} = 1,1$

Рис. 6. Зависимость компрессии  $\varepsilon$  от нагрузки  $P$  и коэффициента основности  $K_{осн}$  при продолжительности спада давления 4 часа

—  $K_{осн} = 0,7$ ; —  $K_{осн} = 0,8$ ;  
—  $K_{осн} = 0,9$

Рис. 7. Зависимость компрессии  $\varepsilon$  от нагрузки  $P$  и коэффициента основности  $K_{осн}$  при продолжительности спада давления 3 часа

—  $K_{осн} = 0,9$ ;  
—  $K_{осн} = 1,0$ ;  
—  $K_{осн} = 1,1$

Результаты проведенных исследований позволят определить рациональные параметры закладочной смеси для получения беззасадочного массива и разработать на их основе технологии закладки вертикальных горных выработок автоклавными вяжущими на основе отходов топливно-энергетических предприятий и извести.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исаенко, А. В. Исследование зависимости компрессионных свойств автоклавных закладочных материалов на основе топливных шлаков от параметров закладочной смеси / А. В. Исаенко, А. В. Угляница // Вестн. Кузбасского гос. тех. ун-ва, 2011. № 1. С. 37–43.
- Боженев, П. И. Технология автоклавных материалов : Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Производство строительных изделий и конструкций». – Л. : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1978. – 368 с.
- ГОСТ 12248–96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Взамен ГОСТ 12248–78, ГОСТ 17245–79, ГОСТ 23908–79, ГОСТ 24586–90, ГОСТ 25585–83, ГОСТ 26518–85 ; введ. 1991–01–01. – М. : Стройиздат, 1996. – 64 с.
- Ашмарин, И. П. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов / И. П. Ашмарин, И. Н. Васильев, В. А. Амбросов. – Л. : ЛГУ, 1975. – 76 с.

□ Авторы статьи:

Исаенко  
Алексей Владимирович,  
канд.техн.наук,доц. каф. строительного  
производства и экспертизы  
недвижимости КузГТУ,  
тел.(+7-384-2)39-63-52

Угляница  
Андрей Владимирович,  
докт.техн.нау,проф.,декан ф-та  
надземного и подземного  
строительства КузГТУ,  
тел.(+7-384-2)39-69-52.