

УДК 622.257.1

А. В. Исаенко, А. В. Угляница

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПРЕССИОННЫХ СВОЙСТВ ЗАКЛАДОЧНЫХ АВТОКЛАВНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В связи с реструктуризацией угольной промышленности в России было закрыто 188 угольных шахт, в том числе в Кузбассе закрыто 42 шахты и ликвидировано 157 вертикальных стволов. При этом требования нормативных документов [1], обязывающих производить закладку ликвидируемых вертикальных выработок безударным и водоупорным материалом, не соблюдались – все стволы были либо просто перекрыты изолирующей перемышкой в устьевой части, либо засыпаны горелой породой или глиной.

Такой подход привел к значительному нарушению экологии Кузбасса и даже к гибели людей.

Причиной несоблюдения требований нормативных документов при закладке стволов послужило отсутствие недорогого и эффективного способа закладки вертикальных выработок безударным и водоупорным материалом.

Выполненный в КузГТУ анализ известных способов закладки выработанного пространства показал, что все они разработаны для закладки горизонтальных и наклонных горных выработок, обладают значительной трудоемкостью и стоимостью, вследствие использования дорогостоящих закладочных материалов и технологических приемов, и для закладки вертикальных выработок не пригодны.

Настоящее исследование выполнялось с целью изучения компрессионных свойств автоклавного материала на основе дешевого вяжущего из золо-шлаковой смеси (ЗШС) топливных предприятий Кузбасса и извести и возможности его применения для закладки вертикальных горных выработок.

Известно, что на физико-механические свойства автоклавных материалов оказывают влияние: коэффициент основности (соотношение, учитывающее содержание различных химических элементов, участвующих в образовании новых соединений); тип извести (гашеная известь, негашеная известь, сорт извести); степень дисперсности составляющих вяжущего; водовязущее отношение (ВВО).

Тип используемой извести. В настоящее время кальциевая известь является основным сырьем для производства автоклавных материалов. Процессам гашения извести в производстве силикатных изделий придается важное значение. В результате исследований и производственного опыта установлено, что чем больше в извести свободной CaO, тем энергичнее идет процесс синтеза новообразований, к тому же химически связанная вода значительно снижает механические свойства материала.

Предварительные исследования показали, что использование кальциевой извести второго и третьего сортов не обеспечивает необходимых компрессионных свойств автоклавного материала, к тому же компрессионные свойства образцов с одинаковыми параметрами изменялись в значительных пределах. Для проведения экспериментальных исследований использовали негашеную кальциевую известь первого сорта с суммарным содержанием условной CaO более 90 % и производную ее гашения.

Степень дисперсности составляющих вяжущего. Для обеспечения реакции на поверхности зерен большое значение имеет дисперсность компонентов вяжущего, так как чем меньше размер зерен, тем быстрее заканчивается формирование цементирующей связки. Во всех работах, посвященных изучению влияния тонкости помола компонентов автоклавных вяжущих, показано, что уменьшение размера зерен приводит к улучшению механических свойств автоклавных материалов. В экспериментах использовали молотую золу и известь двух стандартных фракций «– 0,16» и «– 0,08».

Водовязущее отношение. Значение водовязущего отношение может изменяться в значительных пределах, зависящих от требуемой подвижности раствора или бетонной смеси. При низком значении, увеличивается трудоемкость перемешивания компонентов, при высоком значении, резко снижаются механические свойства материала, поэтому необходимо подбирать оптимальное значение которое обеспечит необходимую подвижность смеси при минимальных затратах. Для проведения исследований принимали водовязущее отношение, равным 0,4–0,8.

Существенное влияние на физико-механические свойства автоклавных материалов так же оказывают параметры его автоклавной обработки, которые при исследовании принимали следующими: выдержка образцов перед автоклавной обработкой – 4 часа; продолжительность подъема давления водяного пара – 0,75 часа; выдержка образцов при максимальном давлении – 6 часов; продолжительность спуска давления до атмосферного – 5 часов. Максимальное давление водяного пара при автоклавной обработке принимали равным 0,9 МПа, поскольку при меньшем давлении автоклавный синтез практически не происходит, а создание более высокого давления в вертикальной горной выработке затруднительно. Указанные параметры автоклавной обработки

смеси являются рациональными и наиболее часто рекомендуемыми.

Анализ химического состава ЗШС электростанций Кузбасса показал, что он может существенно отличаться в зависимости от места их получения. Соответственно, при составлении рецептуры смеси нельзя оперировать абсолютными весовыми или объемными компонентами смеси. В этом случае целесообразно использовать коэффициент основности, который характеризует способность смеси связываться в моносиликат кальция и рассчитывается по формуле [2]

$$K_{\text{осн}} = \frac{\left( \begin{array}{c} \text{CaO} + 0,93 \text{MgO} \\ + 0,6 \text{R}_2\text{O} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} 0,55 \text{Al}_2\text{O}_3 + \\ 0,35 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 0,7 \text{SO}_3 \end{array} \right)}{0,93 \text{SiO}_2}$$

где  $\text{CaO} + 0,93 \text{MgO} + 0,6 \text{R}_2\text{O}$  – общее (валовое) содержание «условной» CaO, %;

$0,55 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,35 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 0,7 \text{SO}_3$  – количество CaO, связываемой соответствующими окислами и не участвующей в образовании силикатов, %;

$0,93 \text{SiO}_2$  – количество CaO для связывания  $\text{SiO}_2$  в моносиликат кальция, %.

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.

С целью определения необходимого минимального числа испытаний одинаковых образцов, а также для дальнейшего планирования экспериментальных исследований были выполнены испытания десяти однотипных образцов [3].

Для испытаний использовали молотую ЗШС Кемеровской ТЭЦ. Диаметр образцов принимали 71 мм, а высоту – 20 мм. Химический состав используемой негашеной извести первого сорта CaO – 94,00 %, MgO – 1,99 %,  $\text{SiO}_2$  – 1,00 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 1,05 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 1,07 %,  $\text{SO}_3$  – 0,5 %. Для испытаний использовали водопроводную воду. Все компоненты смеси взвешивали на электронных весах с точностью измерения 0,01 г. Количество извести

определяли исходя из необходимого коэффициента основности ( $K_{\text{осн}}$ ), рассчитываемого по формуле [2]. Для приготовления образцов сухую золу и известь перемешивали до однородного состояния, после чего в смесь добавляли воду. Полученную смесь перемешивали, заполняли ею направляющее кольцо одометра, помещали его в автоклав и производили автоклавную обработку. Затем на гидравлическом прессе производили испытания компрессии полученного охлажденного до комнатной температуры автоклавного материала. При этом помещали в прибор штамп и индикатор часового типа и записывали его первоначальные показания; устанавливали прибор на гидравлический пресс.

Предварительные испытания показали, что средняя плотность автоклавных материалов на основе ЗШС 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.

Предварительные 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].

Согласно рекомендациям [2] коэффициент основности для прочных автоклавных материалов необходимо принимать равным 0,8–1,2. Закладочный материал для вертикальных горных выработок не должен обладать высокими прочностными свойствами, поскольку в этом случае будет иметь место компрессионное сжатие, к тому же нагрузка от вышележащего материала будет незначительной. Исходя из этого, первоначально принимали смесь с коэффициентом основности равным 0,8. Если образцы сжимались увеличивали содержание извести в смеси с шагом коэффициента основности равным 0,1 до получения безусадочного материала, если не сжимались – уменьшали шагом 0,1 до тех пор пока образцы не давали усадку при каких либо нагрузках.

Как известно, при использовании гашеной извести вместо негашеной, физико-механические свойства автоклавных вяжущих значительно снижаются. Исходя из этого, первоначально для исследований принимали смесь с коэффициентом основности равным 1,2. Если образцы сжимались, увеличивали содержание извести в смеси с шагом

коэффициента основности, равным 0,1, до получения безусадочного материала, если не сжимались – уменьшали шагом 0,1 до тех пор пока образцы не давали усадку при каких либо нагрузках.

Согласно рекомендациям [2] водовязущее отношение для автоклавных материалов необходимо принимать равным 0,4–0,8. Поскольку при проведении испытаний по определению влияния коэффициента основности на компрессионные свойства автоклавного материала из ЗШС и извести были испытаны образцы с минимальным значением водовязущего отношения, то в дальнейших испытаниях первоначально изготавливали образцы с водовязущим отношением 0,4 и минимальным коэффициентом основности, при котором не сжимались образцы, испытанные при определении влияния коэффициента основности на компрессионные свойства автоклавного материала. Если образцы не сжимались, то значение коэффициента основности снижали с шагом 0,1 до тех пор, пока образцы начинали сжиматься, если сжимались – увеличивали с шагом 0,1 до получения безусадочного материала. В дальнейшем, увеличивали водовязущее отношение с шагом 0,1 до 0,8, и, изменяя коэффициент основности с шагом 0,1, определяли степень влияния водовязущего отношения на компрессионные свойства автоклавного материала.

Для приготовления вышеуказанных образцов использовали молотую отвальную ЗШС Кемеровской ТЭЦ фракции «–0,16», негашеную (гашеную) кальциевую известь первого сорта фракции «–0,16» и воду.

Как известно, более тонкий помол вяжущего может значительно улучшить физико-механические свойства материала. Согласно [2] зерна менее 0,16 мм следует рассматривать как составляющие вяжущего, но при очень тонком измельчении частицы вяжущего слипаются между собой и наблюдается обратный эффект. Для определения степени дисперсности вяжущих обычно принимают сито с размером ячеек 0,08 мм. При проведении экспериментов использовали негашеную известь фракции «–0,08». Первоначально изготавливали образцы с негашеной известью фракции «–0,08» и водовязущим отношением 0,5 (так как при таком ВВО тесто легко изготавливается и избыточная вода не оказывает влияния на механические свойства материала) и минимальным коэффициентом основности, при котором не сжимались образцы, испытанные при определении влияния коэффициента основности на компрессионные свойства автоклавного материала. Если образцы не сжимались, то значение коэффициента основности снижали с шагом 0,1 до получения материала, который сжимался, если сжимались – увеличивали с шагом 0,1 до получения безусадочного материала. Для приготовления образцов использовали молотую отвальную ЗШС Кемеровской ТЭЦ фракции «–0,16».

Параметры автоклавной обработки принимали следующими: выдержка образцов перед автоклав-

ной обработкой – 4 часа; продолжительность подъема давления водяного пара – 0,75 часа; выдержка образцов при максимальном давлении – 6 часов; продолжительность спуска давления до атмосферного – 5 часов. Указанные параметры смеси и ее автоклавной обработки являются рациональными и наиболее часто рекомендуемыми.

При проведении экспериментов по определению влияния тонкости помола компонентов вяжущего на его компрессионные свойства использовали негашеную известь и молотую ЗШС фракции «–0,08». Первоначально изготавливали образцы из негашеной извести и молотой ЗШС фракции «–0,08», водовязущим отношением 0,5 и минимальным коэффициентом основности, при котором не сжимались образцы, испытанные при определении влияния тонкости помола негашеной извести на компрессионные свойства автоклавного материала. Если образцы не сжимались, то значение коэффициента основности снижали с шагом 0,1 до получения материала, который сжимался, если сжимались – увеличивали с шагом 0,1 до получения безусадочного материала.

При исследовании влияния коэффициента основности 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

Коэффициент основности	Компрессия, %
0,8	0,00
0,7	0,00
0,6	6,78
0,5	10,47

При исследовании влияния типа извести на компрессионные свойства автоклавного материала образцы с указанными выше параметрами под давлением 12,5 МПа сжимались. В дальнейших испытаниях значение коэффициента основности увеличивали с шагом 0,1. В табл. 2 представлены результаты экспериментальных исследований. Как следует из данных приведенных в табл. 2 образцы не сжимались только при значении коэффициента основности равном 1,3. Графическая иллюстрация результатов исследования представлена на рис. 2.

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

Коэффициент основности	Компрессия, %
1,2	2,76

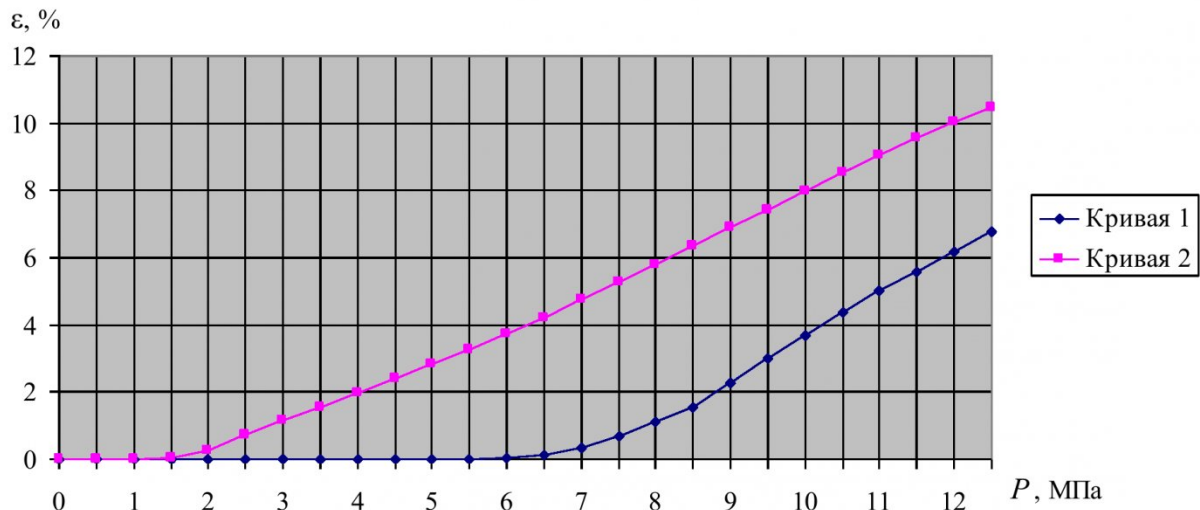


Рис. 1. Зависимость компрессии  $\varepsilon$  от нагрузки  $P$  и коэффициента основности  $K_{осн}$  (с применением негашеной извести):

кривая 1 – коэффициент основности  $K_{осн} = 0,6$ ; кривая 2 – коэффициент основности  $K_{осн} = 0,5$

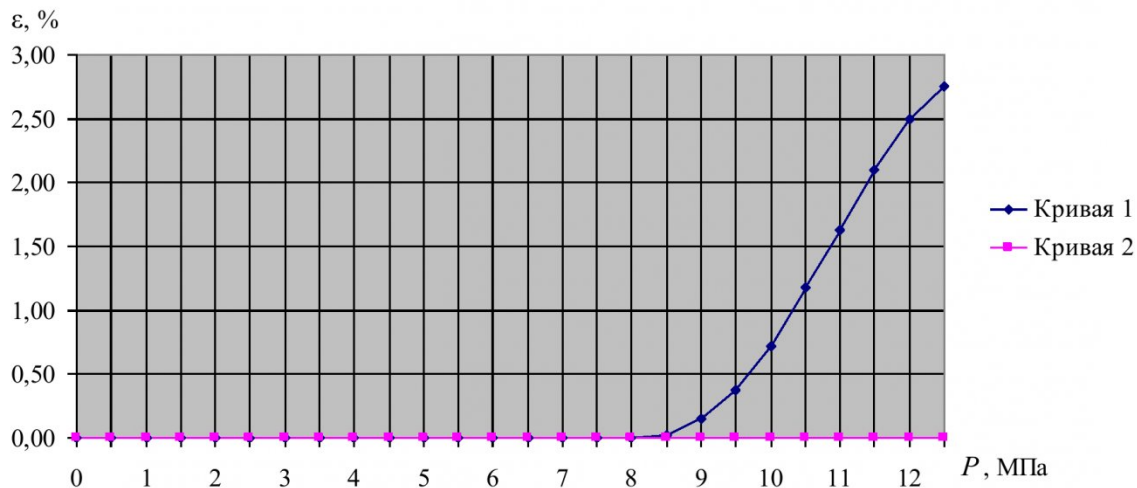


Рис. 2. Зависимость компрессии  $\varepsilon$  от нагрузки  $P$  и коэффициента основности  $K_{осн}$  (с применением гашеной извести):

кривая 1 – коэффициент основности  $K_{осн} = 1,2$ ; кривая 2 – коэффициент основности  $K_{осн} = 1,3$

1,3	0,00
-----	------

0,7	0,8	0,00
0,8	0,8	4,50
0,8	0,9	0,00

При исследовании влияния водовяжущего отношения на компрессионные свойства автоклавного материала образцы с указанными выше параметрами под давлением 12,5 МПа не сжимались. В табл. 3 представлены результаты испытаний. Графическая иллюстрация результатов исследования представлена на рис. 3.

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

ВВО	$K_{осн}$	Компрессия, %
0,4	0,7	0,00
0,4	0,6	5,38
0,5	0,7	0,00
0,5	0,6	6,02
0,6	0,7	0,00
0,6	0,6	8,01
0,7	0,7	10,00

При исследовании влияния тонкости помола негашеной извести на компрессионные свойства автоклавного материала образцы с указанными выше параметрами под давлением 12,5 МПа не сжимались. В табл. 4 представлены результаты испытаний. Графическая иллюстрация результатов исследования представлена на рис. 4.

Таблица 6. Компрессия образцов испытанных при давлении 12,5 МПа

$K_{осн}$	Компрессия, %
0,7	0,00
0,6	0,00
0,5	0,00
0,4	8,42

При исследовании влияния тонкости помола



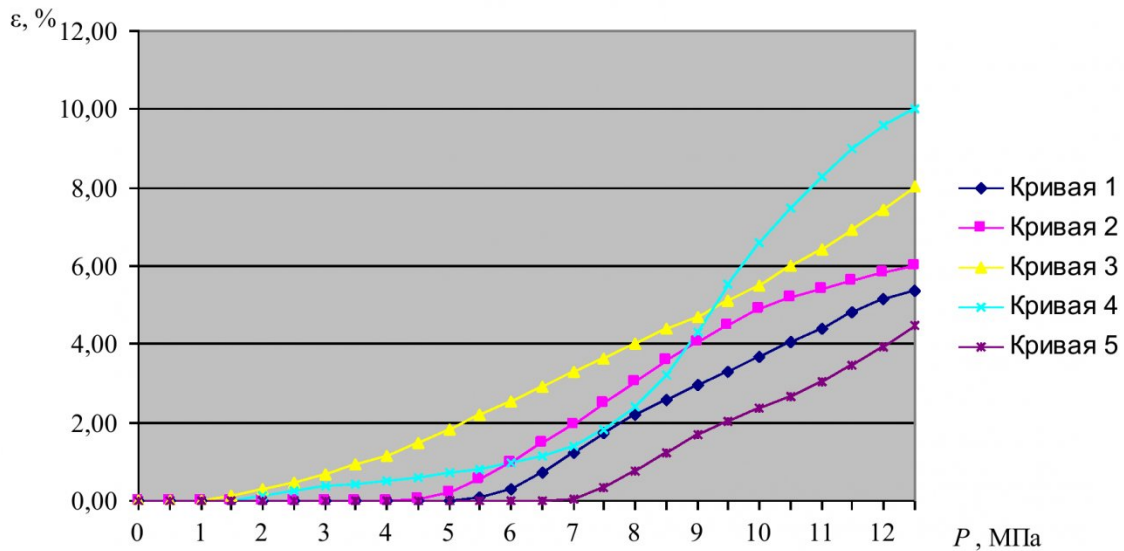


Рис. 3. Зависимость компрессии  $\varepsilon$  от нагрузки  $P$ , коэффициента основности  $K_{осн}$  (с применением негашеной извести) водовяжущего отношения (ВВО): кривая 1 – водовяжущее отношение ВВО = 0,5,  $K_{осн} = 0,6$ ; кривая 2 – ВВО = 0,6  $K_{осн} = 0,6$ ; кривая 3 – ВВО = 0,7,  $K_{осн} = 0,7$ ; кривая 4 – ВВО = 0,8,  $K_{осн} = 0,8$

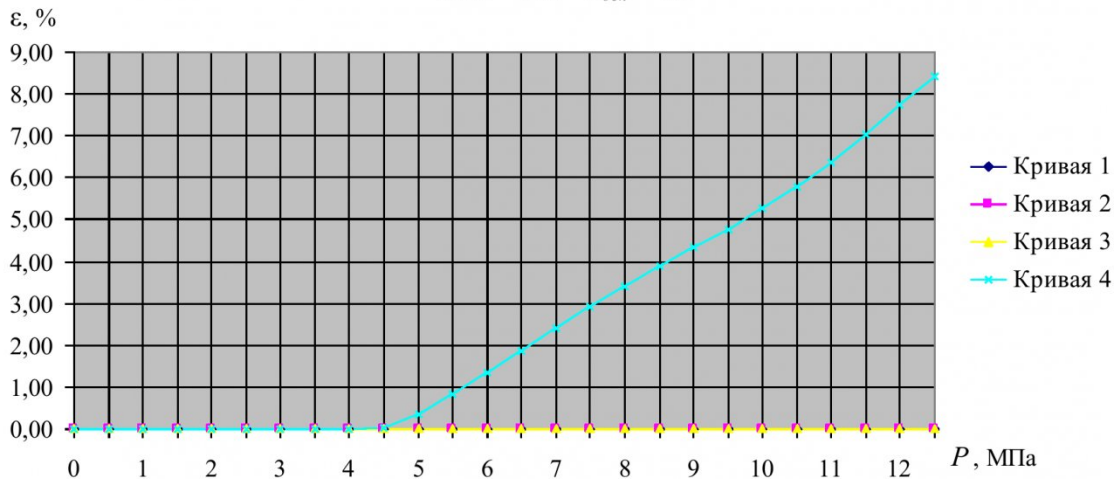


Рис. 4. Зависимость компрессии  $\varepsilon$  от нагрузки  $P$  и коэффициента основности  $K_{осн}$ : кривая 1 – ВВО = 0,4,  $K_{осн} = 0,6$ ; кривая 2 – ВВО = 0,5,  $K_{осн} = 0,6$ ; кривая 3 – ВВО = 0,6  $K_{осн} = 0,6$ ; кривая 4 – ВВО = 0,7  $K_{осн} = 0,7$ ; кривая 5 – ВВО = 0,8,  $K_{осн} = 0,8$

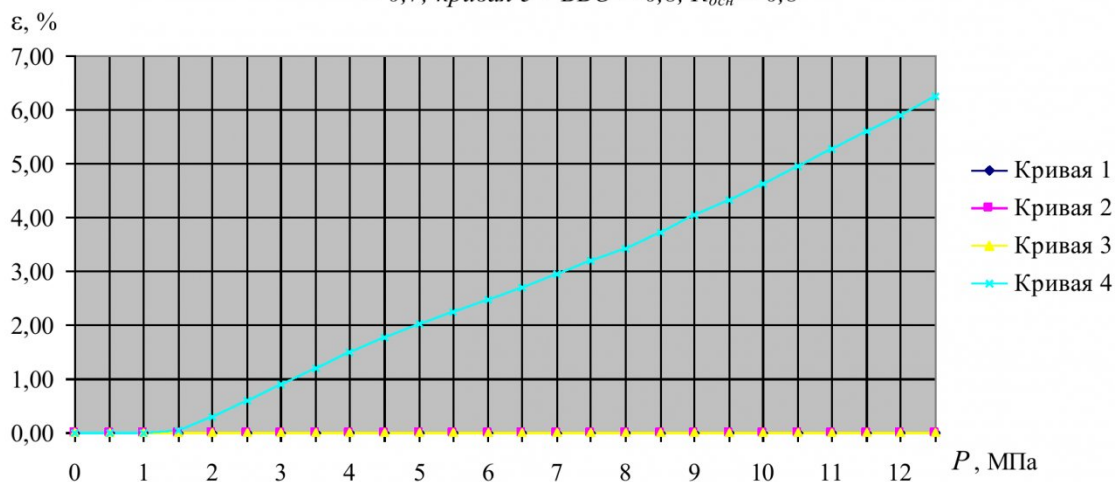


Рис. 5. Зависимость компрессии  $\varepsilon$  от нагрузки  $P$  и коэффициента основности  $K_{осн}$ : кривая 1 –  $K_{осн} = 0,5$ ; кривая 2  $K_{осн} = 0,4$ ; кривая 3  $K_{осн} = 0,3$ ; кривая 4 –  $K_{осн} = 0,2$

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

$K_{осн}$	Компрессия, %
0,5	0,00
0,4	0,00
0,3	0,00
0,2	6,26

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

1. Инструкция о порядке ведения работ по ликвидации и консервации опасных производственных объектов, связанных с пользованием недрами. РД 07-291-99 / Федеральный горный и промышленный надзор России. – М. : ГУП "НТЦ "Промышленная безопасность", 2002. – 17 с.

2. *Боженков 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.

3. 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.

4. *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  
А. В.,

Угляница  
А. В