

## АННОТАЦИЯ

на статью Тимохина А.Л., Хусниярова М.Х., Магилата В.А  
«Влияние соотношения заполнителей на свойства жаропрочного  
керамзито-вермикулитового бетона»

В статье приведены результаты исследования изменения основных механических и теплотехнических свойств жаропрочных керамзито-вермикулитовых бетонов в зависимости от соотношения заполнителей. Результаты исследований показывают, что увеличение массового соотношения керамзит-вермикулит более чем в 2,5 повышает прочностные свойства бетонов в 1,5-1,7 раза, водопоглощение снижается практически вдвое и достигает значения 0,6-0,8 %.

Проанализировав результаты проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что наилучшим сочетанием свойств обладает жаростойкий бетон с массовым соотношением керамзит-вермикулит равным 2

УДК 66.041

### **ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО КЕРАМЗИТО-ВЕРМИКУЛИТОВОГО БЕТОНА**

Тимохин А.Л., Хуснияров М.Х., Магилат В.А

Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
БФ ЗАО «Тепломонтаж»

Трубчатые печи относятся к основному оборудованию установок нефтепереработки и нефтехимии и предназначены для нагрева технологической среды и проведения реакционных процессов. В настоящее

время на установках нефтепереработки функционируют большое количество трубчатых печей различной конструкции.

Несмотря на разнообразие конструкций, трубчатые печи предприятий нефтепереработки и нефтехимии состоят из следующих основных деталей и узлов: металлического каркаса, огнеупорной футеровки, трубчатого змеевика, оборудования для сжигания топлива, дымовой трубы, гарнитуры печи (трубных подвесок, решеток, кронштейнов и подвесок для огнеупорных кирпичей, предохранительных дверок, лазов, гляделок, шибера и др.).

Основные требования, предъявляемые к футеровке нагревательной печи, определяется функциями, выполняемыми футеровкой. Футеровка должна обеспечивать изоляцию зоны передачи тепла нагреваемой среде от воздействия окружающей среды. В связи с этим футеровка должна обладать невысокой теплопроводностью и механической прочностью при высоких температурах. Кроме этого материалы отдельных элементов футеровки должны иметь небольшой удельный вес. Например, футеровка потолочных экранов нагревательных элементов печей должна обладать малым удельным весом и невысокой теплопроводностью. Футеровки стен могут быть выполнены из более тяжелых материалов, но должны выдерживать собственный вес при различных температурах.

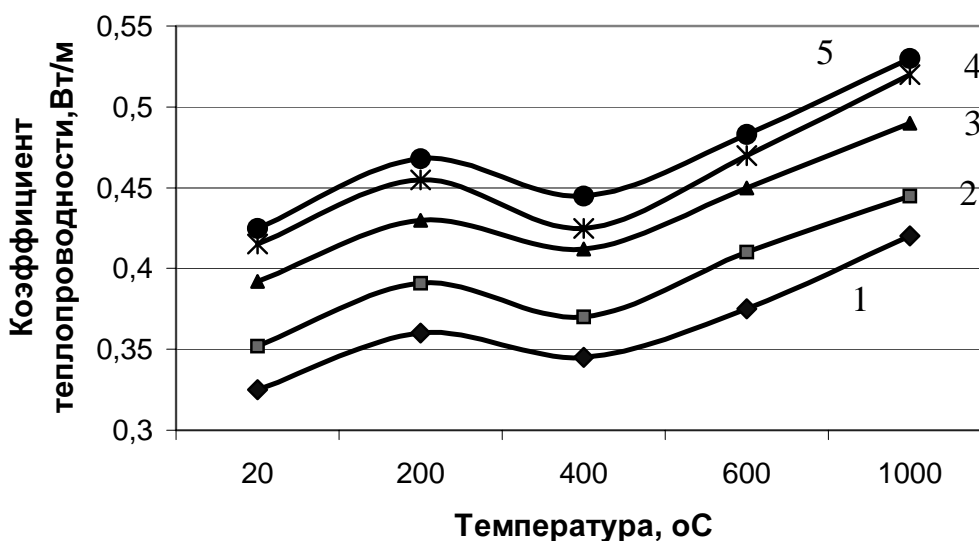
Известно, что свойства, как обычных строительных бетонов, так и огнеупорных определяются свойствами наполнителей и их соотношением. В качестве заполнителей для жаропрочных бетонов в настоящее время широко используется вспученный вермикулит и керамзитовый гравий, которые отличаются низкой теплопроводностью, жаростойкостью и малым удельным весом. Керамзитовый гравий изготавливается из глинистых сланцев и легкоплавких глин вспучиванием во вращающихся печах. Вспученный вермикулит представляет собой термообработанный гидротированный алюмосиликат магния и калия биотинитовой слюды. Он состоит из

кристаллов, которые в процессе термообработки расщепляются по плоскостям спайности, увеличиваясь в объеме в 15-20 раз. Вспученный вермикулит, обладает уникальными сочетаниями свойств: малой объемной массой (125-150 кг/м<sup>3</sup>), низкой теплопроводностью не более 0,15 Вт/(м\*К) при 1000°С, огнеупорностью до 1350 °С. Как показывает опыт использования вермикулита в изготовлении футеровок, добавление даже небольшого его количества ведет к повышению теплотехнических свойств, что может существенно уменьшить удельный вес жаропрочных бетонов и существенно снизить затраты на их изготовление. Но в тоже время отсутствуют четкие рекомендации о составах бетонов и их основных прочностных и теплотехнических свойствах, которые позволили бы проектировать элементы футеровок нагревательных печей с заданными механическими и теплотехническими свойствами.

Для исследования влияния массового соотношения заполнителей керамзит-вермикулита  $C_{к/в}$  на коэффициент теплопроводности и на прочностные характеристики бетонных изделий при нормальных условиях и при повышенных температурах проведена серия экспериментов.

Для этого были изготовлены образцы жаропрочного бетона в виде кубов с длиной ребра 100 мм. Перед испытанием образцы просушивались до постоянной массы при температуре  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ , после чего проводились испытания.. При чем масса считается постоянной, если результат каждого последующего взвешивания, через один час сушки отличается от предыдущего не более чем на 0,1. Определялся коэффициент теплопроводности и предел прочности при сжатии при комнатной температуре по ГОСТ 4071 и в нагретом состоянии. Поскольку назначением исследуемого вида бетона является футеровка печей нефтепереработки и нефтехимии, а температура в них обычно не превышает  $1000^{\circ}\text{C}$ , были проведены эксперименты при повышенных температурах, а именно для 200, 400, 600 и  $1000^{\circ}\text{C}$ . Изменения коэффициента теплопроводности при различных

температурах футеровки для бетонов с соотношением заполнителя  $C_{к/в} = 1; 2,5; 3,2; 4,5; 6$ ; приведены на рисунке 1. Коэффициент теплопроводности с повышением температуры повышается, при чем зависимость носит практически линейный характер. При температуре  $400^{\circ}\text{C}$  наблюдается некоторое отклонение от линейной зависимости.



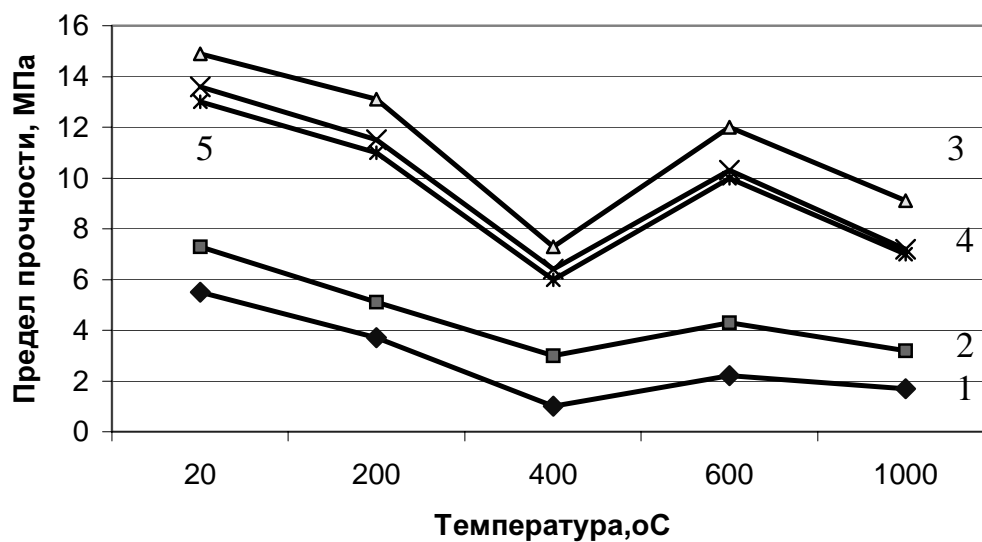
1 –  $C_{к/в} = 1$ ; 2 -  $C_{к/в} = 2,5$ ; 3 -  $C_{к/в} = 3,2$ ; 4 -  $C_{к/в} = 4,5$ ; 5 -  $C_{к/в} = 6$ ;

Рисунок 1 - Изменение коэффициента теплопроводности бетона от величины температуры при различных соотношениях керамзита и вермикулита.

При этом следует отметить повышение значения коэффициент теплопроводности бетона с увеличением соотношения  $C_{к/в}$ , что определяется увеличением количества керамзитового гравия в бетоне.

Результаты исследований прочностных свойств жаропрочного бетона в зависимости от массового количества наполнителя приведены на рисунке 2. Как показывают результаты экспериментов, прочность керамзит-вермикулитовых бетона существенно зависит от массового соотношения керамзитового и вермикулитового заполнителей. Увеличение массового соотношения керамзит-вермикулит более чем в 2,5 повышает прочностные свойства бетонов в 1,5-1,7 раза. При изменении этого

соотношения от 2,5 до 6 наблюдается стабилизация прочностных свойств, то есть дальнейшее увеличение количества керамзита не приводит к существенному возрастанию прочности бетона.



1 –  $C_{к/в} = 1$ ; 2 -  $C_{к/в} = 2,5$ ; 3 -  $C_{к/в} = 3,2$ ; 4 -  $C_{к/в} = 4,5$ ; 5 -  $C_{к/в} = 6$ ;

Рисунок 2 - Изменение предела прочности бетона от величины температуры при различных соотношениях керамзита и вермикулита.

Как видно из рисунка 2 влияние температуры на прочность бетонных изделий носит неравномерный характер. При чем, как было обнаружено, прочность бетона при температуре 400 °C имеет тенденцию к временному снижению значений. Далее при температуре 600 °C происходит некоторое повышение прочностных свойств бетонных изделий, а затем при температуре 1000°C снижение прочности до значения, близкого к прочности при 400 °C.

Вероятно, этот факт связан с изменением температурной пористости бетона, что влияет на значение предела прочности, коэффициента теплопроводности, а также влияет на коэффициент линейного термического расширения.

С целью обоснование изменения коэффициента теплопроводности и предела прочности в зависимости от соотношения заполнителей были исследованы шлифы, изготовленные из испытываемых образцов в форме кубов. Размеры шлифов и соотношения заполнителей оставались такими же, что при ранее проведенных исследованиях. Как показал анализ шлифов, при массовых соотношениях заполнителей керамзит-вермикулит равных 1 и 1,5, в сечениях видны вытянутые сгруппированные скопления тонкодисперсных вермикулитовых включений, беспорядочно ориентированные по сечению образца. При чем, при увеличении массового соотношения керамзит-вермикулит (т.е. при уменьшении в бетоне доли вермикулита) доля площади вермикулитовых образований в общей площади сечения образца уменьшается в 2,5-3 раза.

С ростом этого соотношения от 1,5 до 2 и выше сгруппированных тонкодисперсных включений частиц вспученного вермикулита в сечении образца не наблюдается.

Соотнося эти результаты с результатами прочностных испытаний, изображенными на рисунке 2 можно заметить, что при увеличении массового соотношения керамзит-вермикулит от 1,5 до 2 прочность бетонных образцов увеличивается с 7 до 15 МПа, при прочих равных условиях.

Все эти факты указывают на то, что при массовом соотношении заполнителей керамзит-вермикулит близкой к 2 происходит группирование мелкодисперсных вермикулитовых включений, которые в силу отсутствия адгезии к цементному камню являются концентраторами напряжений. Эти концентраторы напряжений ослабляют сечение образца, что соответственно приводит к снижению прочности. При уменьшении количества вермикулита наблюдается равномерное распределение частиц вермикулита в объеме бетона, что приводит к повышению прочностных свойств, но в тоже время следует отметить и увеличение значения коэффициента теплопроводности.

Явление образования в сечении образцов сгруппированных скоплений вермикулитовых включений может быть объяснено физической природой вяжущего. Процесс твердения цемента представляет собой образование кристаллогидрата цементного камня, в процессе контакта с содой.

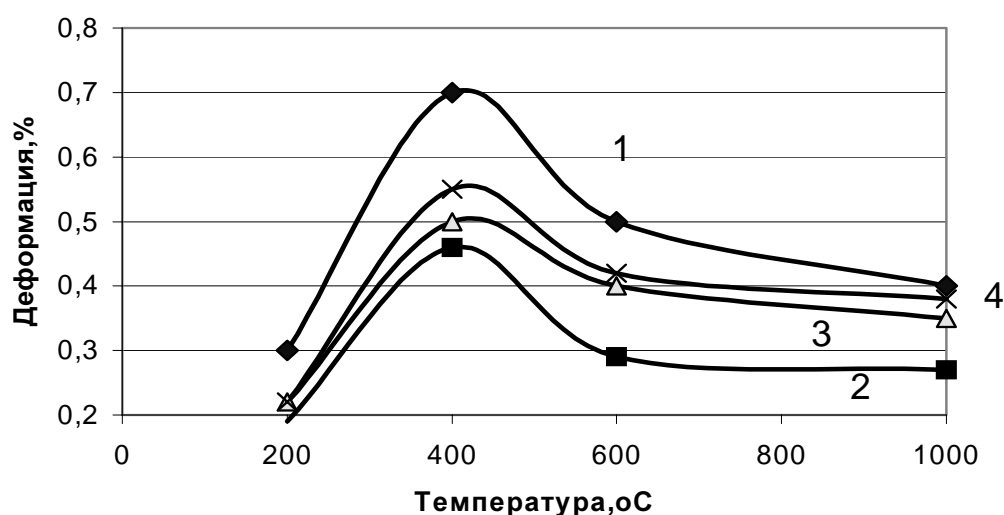
В данном случае вспученный вермикулит, около 20% веса которого имеет дисперсность частиц близкую к дисперсности частиц цементного камня, в процессе образования кристаллогидрата поглощается дисперсной фазой. Это происходит до полного насыщения структуры кристаллогидрата частицами вермикулита, которое ограничено кристаллическими связями соединения.

При дальнейшем увеличении их количества происходит вытеснение лишних частиц в дисперсную среду по границам зерен кристаллов, что и приводит к образованию сгруппированных включений имеющих место в сечении исследованных образцов.

Равномерность распределения по сечению вермикулитовых включений, крупность зерен которых далека от крупности зерен цемента объясняется невозможностью диффузии их в дисперсную фазу из-за крупности зерен, а также большим гидравлическим сопротивлением.

Соотношение заполнителей в жаропрочном бетоне естественно влияет не только на прочностные и теплотехнические свойства бетонов, но и на другие не менее важные свойства, которые определяют долговечность и работоспособность футеровок. Одним из важнейших показателей футеровок нагревательных печей является коэффициент линейного расширения и водопоглощение. Возможность прогнозирования величины линейного термического расширения позволяет сконструировать футеровку таким образом, чтобы исключить разрушения футеровки при нагреве или охлаждении печи. Показатель водопоглощения позволит при необходимости нанести защитные покрытия на футеровку и предотвратить разрушение ее при насыщении влагой. В связи с этим проведена серия экспериментов по

исследованию величины линейного термического расширения и водопоглощения при различных соотношениях заполнителей в различных температурных условиях эксплуатации. Это связано с тем, что термическое расширение бетона играет существенную роль в обеспечении прочности монолитной и крупнопанельной футеровки нагревательной печи, поскольку она эксплуатируется в жестко ограниченном металлоконструкцией пространстве. Исходя из того, что основным показателем характеризующим термическое расширение является относительное линейное термическое расширение, были проведены эксперименты с изменением массового соотношения заполнителей керамзит-вермикулит, которое варьировалось аналогично прочностным и теплотехническим испытаниям в интервале от 1 до 6. Эксперименты проводились в интервале температур от 200 до 1000 °С. В результате чего было установлено, что минимальное относительное термическое расширения наблюдается в интервале массовых соотношений заполнителей менее 2 (рисунок 3). При увеличении этого соотношения до 1 деформации возрастают с 0,45 до 0,7%, а при увеличении плавно возрастают.



1 -  $C_{к/в} = 1$ ; 2 -  $C_{к/в} = 2$ ; 3 -  $C_{к/в} = 3$ ; 4 -  $C_{к/в} = 4$ ;

Рисунок 3 - Зависимость линейного термического расширения бетона от массового соотношения заполнителей при повышенных температурах.



Этот факт указывает на нежелательность уменьшения соотношения заполнителей менее чем на 2, так как его влияние на деформации оказываются весьма существенными.

Необходимость в исследовании водопоглощения возникает из-за высокой гидроскопичности керамзитового гравия и особенно вспученного вермикулита которая нередко является причиной разрушения бетонных элементов конструкций футеровок при пуске печей, после остановки на ремонт, а также в процессе аварийной остановки печи после контакта с мятым водяным паром систем паропожаротушения.

Кроме того, было обнаружено, что значение линейного термического расширения достигает своего максимума при температуре 400 °С, затем при температуре 600 °С наблюдается некоторое уменьшение значения этой величины с дальнейшей её стабилизацией.

Устойчивый к температуре характер влияния массового соотношения заполнителей на линейное термическое расширение объясняется изменением температурной пористости бетона, как было отмечено ранее.

Необходимость в исследовании водопоглощения возникает из-за высокой гидроскопичности керамзитового гравия и особенно вспученного вермикулита которая нередко является причиной разрушения бетонных элементов конструкций футеровок при пуске печей, после остановки на ремонт, а также в процессе аварийной остановки печи после контакта с мятым водяным паром систем паропожаротушения.

Для этого были проделаны эксперименты на образцах с массовым соотношением заполнителей от 1 до 6, что позволило выявить характер влияния этого фактора на параметр водопоглощения (рисунок 4).

Результаты эксперимента указывают на то, что при увеличении массового соотношения заполнителей керамзит-вермикулит от 1 до 2 водопоглощение снижается практически вдвое и достигает значения 0,6-0,8 %.

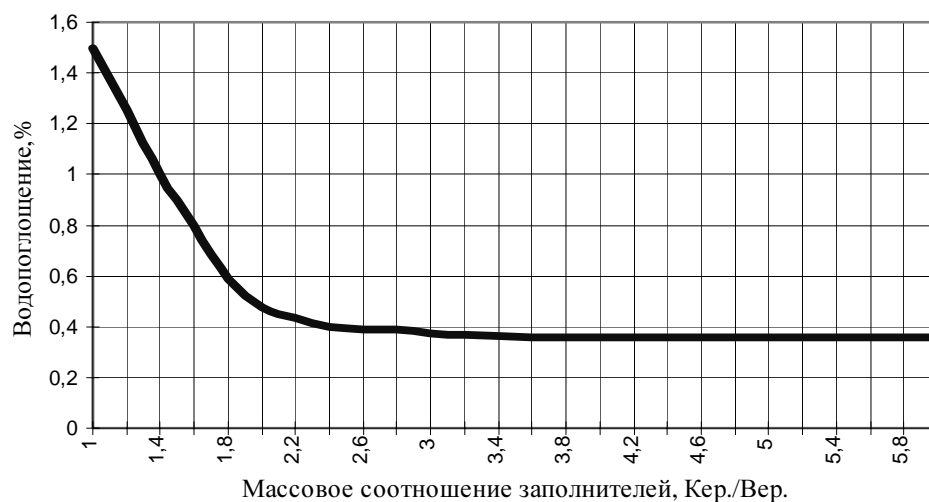


Рисунок 4 - Зависимость водопоглощения бетона от массового соотношения заполнителей.

Из литературных источников известно, что водопоглощение бетона в пределах 1 % ведет к снижению прочности изделий не более чем на 20 %, что допустимо, т.к. коэффициент запаса прочности материала футеровки лежит в пределах 1,2-1,5 [36]. При дальнейшем увеличении массового соотношения заполнителей водопоглощение снижается не столь существенно, это связано со значительным уменьшением общей пористости бетонных изделий.

Известным фактом является, что наилучшим сочетанием свойств жаростойкого бетона следует считать максимальную прочность при минимальных коэффициенте теплопроводности, линейном термическом расширении и водопоглощении.

Проанализировав результаты проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что наилучшим сочетанием свойств обладает жаростойкий бетон с массовым соотношением керамзит-вермикулит равным 2

и именно это соотношение может быть использовано при изготовлении керамзит-вермикулитовых элементов футерок нагревательных печей..