

## ПРОЧНОСТЬ И СРЕДНЯЯ ПЛОТНОСТЬ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО БЕТОНА НА КЕРАМЗИТОВОМ ГРАВИИ

Мишутин А.В., *д.т.н., проф.*, Богуцкий В.Л. *инж.*,  
Кривяков С.А., *к.т.н., доц.*,

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

Для железобетонных плавучих сооружений использование керамзитобетона позволяет снизить вес судна и тем самым повысить его грузоподъемность, а также значительно улучшить комфортность пребывания людей в помещениях железобетонного судна [1,2]. В керамзитобетоне выгодно сочетаются большая прочность при малой средней плотности, что обуславливает высокую его конструктивную эффективность и долговечность при низкой теплопроводности.

В современных экономических условиях легкие бетоны является весьма перспективным материалом для конструкций целого ряда сооружений, таких как плавучие дома, отели и рестораны, а также для башен плавучих железобетонных доков [2,3], в которых находится технологическое оборудование и работает доковая команда.

Исследование свойств модифицированных судостроительных керамзитобетонов проводилось с использованием методов планирования эксперимента. Проводился 5-ти факторный эксперимент по 27-ми точечному оптимальному плану [4]. Варьировались следующие факторы состава:

$X_1$  – количество сульфатостойкого портландцемента,  $500 \pm 100$  кг/м<sup>3</sup>;

$X_2$  – концентрация гидрофобизатора ГКЖ-94м при обработке керамзитового гравия,  $0.8 \pm 0.8\%$ ;

$X_3$  – количество кольматирующей добавки Пенетрон А,  $1 \pm 1\%$ ;

$X_4$  – количество суперпластификатора С-3,  $0.7 \pm 0.2\%$ ;

$X_5$  – количество полипропиленовой фибры Ваузон,  $0.6 \pm 0.6$  кг/м<sup>3</sup>.

Гидрофобизация гравия проводилась методом окунания в эмульсию добавки ГКЖ-94м соответствующей концентрации [5,6]. Применяется керамзитовый гравий крупностью от 2.5 до 10 мм с насыпной плотностью  $550$  кг/м<sup>3</sup>. Все исследованные смеси имели равную подвижность  $OK=2 \pm 0.5$  см, что достигалось подбором количества воды затворения. Анализ влияния состава керамзитобетона на В/Ц показал, что увеличение количества портландцемента и добавки С-3 снижает В/Ц отноше-

ние в смесях равной подвижности, а введение добавки Пенетрон А практически не оказывает влияния на В/Ц. Применение фибры незначительно повышает В/Ц ввиду образования каркаса полипропиленовых волокон. Гидрофобизация пористого заполнителя снижает В/Ц смеси за счет уменьшения водопоглощения гравия [7].

Исследовались прочность при сжатии модифицированных судостроительных керамзитобетонов в водонасыщенном состоянии, а также при равновесной влажности (в возрасте 28-ми суток). Проведенный по соответствующим экспериментально-статистическим (ЭС) моделям анализ влияния варьируемых факторов на прочность в водонасыщенном состоянии позволяет сказать, что данная величина изменяется в пределах от 25 до 44 МПа. Увеличение количества портландцемента пропорционально повышает прочность. Наибольший уровень  $R_{b,w}$  показывают составы, в которые введено «среднее» количество суперпластификатора С-3, от 0.7 до 0.8%. Гидрофобизация пористого гравия повышает прочность материала в водонасыщенном состоянии. Для керамзитобетонов с количеством цемента 400..450 кг/м<sup>3</sup> за счет обработки заполнителя эмульсией при концентрации ГКЖ-94м 0.6-0.8% уровень  $R_{b,w}$  повышается в среднем. на 3..4 МПа, т.е. на 10..12%. Для бетонов с количеством цемента более 500 кг/м<sup>3</sup> эффективнее применение эмульсии ГКЖ-94м с концентрацией 0.4-0.5%. Повышение в эмульсии концентрации добавки более чем на 0.8% вызывает уже некоторое снижение прочности керамзитобетона ввиду увеличения гидрофобного слоя на керамзитовом гравии, в связи с чем ухудшается сцепление заполнителя с растворной матрицей. Количество кольматирующей добавки Пенетрон А и фибры несущественно влияет на величину прочности при сжатии.

Общее влияние варьируемых факторов на прочность при сжатии в условиях равновесной влажности аналогично их влиянию на прочность в водонасыщенном состоянии при несколько более высоком среднем уровне прочности керамзитобетона – от 26 до 47 МПа. Однако положительный эффект гидрофобизации проявляется слабее и при более низких концентрациях ГКЖ-94м в эмульсии, а увеличение концентрации ближе к максимальному уровню напротив, сказывается ощутимее.

Поскольку основной целью применения легких бетонов в судостроении является снижение веса железобетонных конструкций в рамках проведенных исследований изучалась средняя плотность модифицированных керамзитобетонов в различных условиях эксплуатации, т.е. при различной влажности. Значения средней плотности и влажности определялись на образцах возраста 90 суток, т.к. в данном возрасте структура цементного композита уже являются относительно стабильной по

сравнению с 28-ми суточным возрастом и образцы в данном возрасте в большей мере соответствуют материалам в реальных условиях эксплуатации плавучих сооружений. Для достижения сухого состояния образцы высушивались до постоянной массы при температуре  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , под равновесной понимается влажность после хранения при влажности 100% и температуре  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , водонасыщенными считаются образцы после длительного свободного водонасыщения в воде до постоянной массы, но не менее 14 суток.

ЭС-модель, отображающая влияние факторов состава на среднюю плотность судостроительных керамзитобетонов в сухом состоянии, т.е. без учета влаги, содержащейся в порах и в гравии, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \rho_d (\text{кг/м}^3) = & 1664.1 + 40.6x_1 - 5.7x_1^2 - 6.4x_1x_2 + 0.8x_1x_3 + 2.1x_1x_4 \pm 0x_1x_5 \\ & - 3.8x_2 - 4.4x_2^2 \quad \pm 0x_2x_3 \quad \pm 0x_2x_4 \quad + 0.8x_2x_5 \\ & + 2.1x_3 \quad \pm 0x_3^2 \quad \quad \quad + 0.8x_3x_4 - 1.4x_3x_5 \\ & + 4.1x_4 - 7.4x_4^2 \quad \quad \quad \quad \quad + 1.5x_4x_5 \\ & - 5.1x_5 \quad + 2.6x_5^5 \end{aligned} \quad (1)$$

Анализ ЭС-модели (1) показал, что в наименьшей степени на величину средней плотности в сухом состоянии влияет количество Пене-трона А. Построенная по данной ЭС-модели диаграмма типа «квадраты на квадрате», отображающая влияние количества портландцемента, фибры, добавки С-3 и концентрации гидрофобизатора ГКЖ-94м на среднюю плотность судостроительного керамзитобетона в сухом состоянии показана на рис.1.

Анализ диаграммы позволяет отметить, что наибольшее влияние на плотность оказывает количество портландцемента – керамзитобетоны с количеством вяжущего  $600 \text{ кг/м}^3$  имеют на  $80..90 \text{ кг/м}^3$  большую плотность по сравнению с составами, в которых введено  $400 \text{ кг}$  цемента на  $\text{м}^3$ . Применение дисперсного армирования незначительно, на величину до  $10 \text{ кг/м}^3$ , снижают среднюю плотность керамзитобетонов за счет влияния на структуру трехмерной сетки волокон и некоторого повышения В/Ц смеси при введении фибры.

Добавка С-3 также влияет на среднюю плотность композита, при этом наиболее плотными являются составы с количеством пластификатора около 0.8%. При использовании дисперсного армирования количество количество пластификатора, обеспечивающее максимальную плотность, приближается к 0.9%.

Концентрация гидрофобизатора при обработке керамзитового гра-вия нелинейно влияет на плотность судостроительного бетона. При

этом максимальная плотность достигается для бетонов с количеством цемента  $400 \text{ кг/м}^3$  при использовании эмульсии с концентрацией ГКЖ-94м 1.0-1.3%, для бетонов с количеством цемента  $500 \text{ кг/м}^3$  при использовании 0.4-0.6% эмульсии, а для составов с количеством цемента  $600 \text{ кг/м}^3$  при использовании 0.3-0.4% эмульсии. Подобное влияние гидрофобизатора на плотность можно объяснить, с одной стороны, снижением В/Ц смеси при использовании данного технологического приема, с другой стороны, воздухововлекающим и газообразующим эффектом добавки ГКЖ-94м. Подтверждением данной двойного эффекта является то, что в большей мере добавка снижала В/Ц смесей с минимальным количеством цемента, соответственно для данных бетонов она и оказывает максимальное уплотняющее действие.

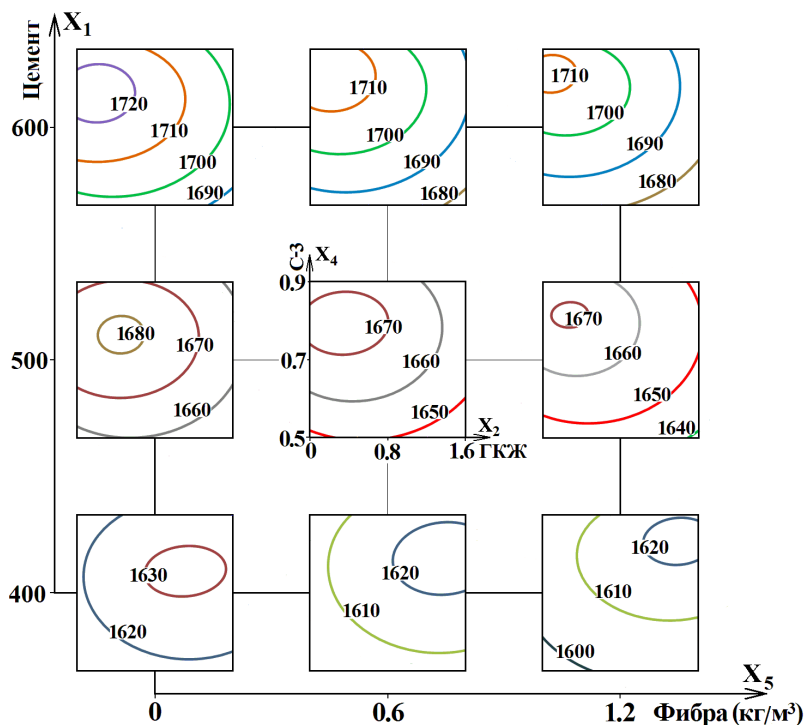


Рис. 1. Влияние количества портландцемента, фибры, С-3 и концентрации добавки ГКЖ-94м на среднюю плотность судостроительного керамзитобетона в сухом состоянии

Анализ средней плотности судостроительных керамзитобетонов в условиях равновесной влажности, а также во влажных условиях, позволил определить значения массовой влажности исследованных составов (ДСТУ Б В.2.7-170:2008). На рис.2 показаны настроенные по соответствующим ЭС-моделям диаграммы в виде кубов, отображающие влияние количества портландцемента, Пенетрона А и концентрации добавки ГКЖ-94м на влажность керамзитобетона условиях равновесной влажности, а также в водонасыщенном состоянии. При построении диаграмм количество фибры и С-3 принималось на среднем уровне ( $x_4=x_5=0$ ).

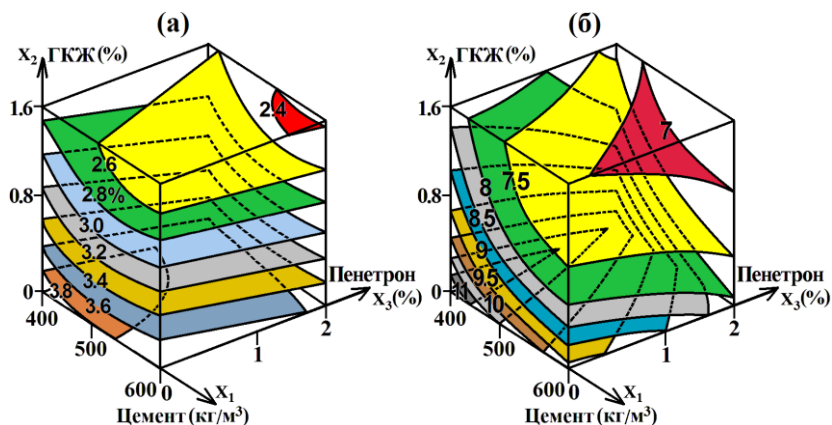


Рис.2. Влияние количества портландцемента, Пенетрона А и концентрации добавки ГКЖ-94м на влажность керамзитобетона а) условиях равновесной влажности, б) в водонасыщенном состоянии

Как видно из диаграмм, при введении Пенетрона А влажность керамзитобетона в типичных условиях эксплуатации снижается, причем в водонасыщенном состоянии влияние кольматрующей добавки проявляется существеннее. Однако общее влияние Пенетрона на влажность можно признать незначительным, поскольку основная цель его применения состоит в повышении водонепроницаемости за счет кольматации капилляров и пор. На пористый заполнитель Пенетрон А оказывает слабое влияние, соответственно низким является влияние данного модификатора на влажность, в особенности на воздухе.

Изменение количества цемента, естественно, влияет на общую пористость керамзитобетона и размер пор, соответственно по мере увеличения количества вяжущего влажность материала снижается. В

условиях равновесной влажности влияние количества цемента несущественно, а при эксплуатации в воде проявляется ощутимо – составы с 600 кг цемента на м<sup>3</sup> имеют на 1.5-2% меньшую влажность по сравнению с составами с количеством цемента 400 кг/м<sup>3</sup>.

Наиболее существенное влияние на влажность керамзитобетона оказывает гидрофобная обработка гравия. При концентрации добавки ГКЖ-94м в эмульсии 0.8% влажность образцов в воздушных условиях снижалась на 0.7-0.9% по сравнению с бетонами на необработанном гравии, а во водонасыщенных условиях на 1.8-2.1%. По мере дальнейшего повышения концентрации гидрофобизатора в эмульсии, используемой при обработке пористого заполнителя, влажность керамзитобетона продолжала снижаться, хотя уже менее интенсивно. При концентрации ГКЖ-94м 1.6% влажность керамзитобетона на модифицированном заполнителе ниже влажности контрольных составов на 1-1.2% и 3-3.5% для воздушных и водонасыщенных условий соответственно.

Подобное влияние объясняется препятствованием проникновению влаги в пористый керамзитовый гравий за счет его гидрофобной обработки. При этом достаточно ощутимый эффект достигается уже при концентрации ГКЖ-94м 0.8%. Подтверждением данного факта может служить то, что как установлено в рамках данного исследования за счет гидрофобизации легкого заполнителя существенно, не менее чем на марку, повышается водонепроницаемость керамзитобетона.

### ***Выводы***

Таким образом, за счет гидрофобной обработки поверхности пористого керамзитового гравия можно существенно снизить влажность легкого бетона для конструкций плавучих сооружений. При этом наиболее эффективно снижается влажность бетонов, эксплуатируемых в водной среде, т.е. для типовых условий эксплуатации обводненных с одной стороны конструкций плавсооружений. Подобное снижение влажности позволяет говорить о повышении комфортности пребывания людей на железобетонном судне, а также об улучшении условий работы технологического оборудования. Гидрофобная обработка гравия при использовании эмульсии оптимальной концентрации также позволяет повысить водонепроницаемость керамзитобетона при сохранении его прочностных свойств.

Сочетание использования технологического приема гидрофобизации легкого заполнителя с применением современных модификаторов – суперпластификатора и кольматирующей добавки Пенетон А, а также с дисперсным армированием позволяет получить судостроительный

керамзитобетон с высоким уровнем прочности (до 45 МПа), водонепроницаемости (W6..W10) и морозостойкости (F500..600), что обеспечивает повышение долговечности материала. Разработанные керамзитобетоны соответствуют требованиям Морского регистра и могут быть использованы для постройки стояночных судов, эксплуатируемых в различных климатических условиях. При этом за счет замены тяжелого судостроительного бетона, имеющего среднюю плотность в зависимости от состава и влажности в пределах 2200-2400 кг/м<sup>3</sup> на легкий с плотность в аналогичных условиях от 1650 до 1850 кг/м<sup>3</sup>, возможно повышение грузоподъемности судна, в частности плавучего дока.

### Summary

**Studied the strength and density of the shipbuilding clay lightweight concrete. It is shown that by treating the porous gravel waterproofing additive reduced moisture content. Expanded clay lightweight concrete obtained with high strength and water resistance.**

### *Литература*

1. Применение высокопрочного судостроительного керамзитобетона в железобетонном судостроении. Инструкция. – Л.: Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения, 1969. – 40 с.
2. Мишутин А.В. Повышение долговечности бетонов морских железобетонных плавучих и стационарных сооружений / А.В. Мишутин, Н.В. Мишутин. – Одесса: Эвен, 2011. – 292 с.
3. Слуцкий Н.Г. Строительство железобетонных плавучих сооружений в Украине / Н.Г. Слуцкий, В.Ф. Маломан, А.С. Рашковский // Рыбное хозяйство Украины. Спец. выпуск «Морские технологии: проблемы и решения - 2004». № 7. – Керчь, 2004. – С. 23–26.
4. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительнотехнологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К.: Вища школа, 1989. – 327 с.
5. Выровой В.Н. Изучение стойкости керамзитобетона в условиях попеременного увлажнения и высушивания. / Выровой Валерий Николаевич – Дис. канд. техн. наук: 05.23.05. - Одесса, 1973. – 127 с.
6. А. с. № 863556. СССР, Кл. С 04 В 31 / 40. Способ обработки легкого заполнителя / А.А. Кучеренко, В.Н. Выровой, И.В. Шкрабик. — №2737967/29-33; заявл. 19.03.79; опубл. 15.09.81, Бюл. № 34.
7. Богуцкий В.Л. Прочностные свойства модифицированных судостроительных керамзитобетонов / В.Л. Богуцкий // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 51. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2013. – С. 35-40.