

**ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМЗИТОБЕТОНА ПЛОТНОЙ СТРУКТУРЫ, В ТОМ ЧИСЛЕ ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ ВЫСОКОПОДВИЖНЫХ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

**TECHNOLOGICAL AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF EXPANDED-CLAY CONCRETE OF COMPACT STRUCTURE MADE OF HIGHLY WORKABLE CONCRETE MIX.**

Блещик Н.П. доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник РУП «Институт БелНИИС»

Протьюко Н.С. кандидат технических наук, заведующая лабораторией РУП «Институт БелНИИС»

**АННОТАЦИЯ**

Приведены результаты анализа известных математических моделей, предложенных для определения технологических и физико-механических свойств легкого бетона плотной структуры; результаты экспериментальных исследований свойств керамзитобетона; экспериментально-теоретические зависимости, характеризующие критерии составов нерасслаиваемых бетонных смесей, обеспечивающих получение керамзитобетона однородной структуры.

**ABSTRACT**

The results of analysis of well-known mathematic models for determination technological and physical-mechanical properties of lightweight concrete of compact structure are shown. The results of experimental researches of expanded-clay lightweight concrete properties, experimental and theoretical dependence characterizing composition criteria of non-disintegration concrete, which provide manufacture of expanded-clay lightweight concrete of homogeneous structure, are represented.

**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из направлений повышения эффективности строительства зданий и сооружений является производство изделий и возведение монолитных конструкций из легких конструкционных бетонов, обеспечивающих дальнейшее снижение их материалоемкости и трудоемкости [1...4]. В развитие теории и технологии легкого бетона значительный вклад вносили отечественные и зарубежные исследователи, в том числе: И.Н.Ахвердов [5], Б.Г. Скрамтаев [6], А.И.Ваганов [7], В.Г.Довжик [8] и др. Анализ результатов исследований, пособий по расчету конструкций, рекомендаций по проектированию и подбору составов легких бетонов [2,3,4,9] показал, что большинство исследований и разработанных рекомендаций предусматривают подбор составов легких бетонов из жестких и малоподвижных бетонных смесей марок по удобоукладываемости до П2. Разработанные математические модели для оценки плотности, прочности, модуля упругости и других свойств относятся, в основном, к немодифицированным добавками-пластификаторами бетонным смесям и не могут быть использованы для прогнозирования свойств высокоподвижных бетонных смесей на легких заполнителях.

При выполнении экспериментально – теоретических исследований по заказу Министерства строительства и архитектуры РБ было установлено, что высокоподвижные легкобетонные смеси, модифицированные эффективными пластификаторами нового поколения, склонны к расслоению, основной причиной которого является высокая текучесть растворной матрицы и превышение допустимых значений характеристик водоцементного отношения цементного теста в растворе.

В этой связи было уделено особое внимание выявлению причин расслоения высокоподвижных легкобетонных смесей и разработке методики подбора составов легких бетонов с однородной структурой и заданными показателями качества. При этом, в отличие от тяжелого бетона, необходимо учитывать влияние характеристик пористого заполнителя на плотность и физико-механические свойства легкого бетона.

Эта сложная задача, решалась на основе структурного подхода, развиваемого в отделе технологии бетона и растворов РУП «Институт БелНИИС». При этом использовались структурные характеристики, полученные при разработке методики проектирования состава самоуплотняющегося тяжелого бетона с соответствующей коррекцией, учитывающей влияние свойств пористого заполнителя, в том числе его прочности, плотности в цементном тесте и изменяющегося во времени водопоглощения.

Выполненный широкий комплекс экспериментально-теоретических исследований позволил разработать методики расчета критериальных значений структурных характеристик, определяющих условия получения однородной нерасслаиваемой структуры легкого бетона, изготавливаемого из высокоподвижных бетонных смесей, модифицированных химическими и минеральными добавками.

В процессе исследований установлено также влияние характеристик крупных и мелких керамзитовых заполнителей различных предприятий республики на прочность и морозостойкость керамзитобетона, в том числе модифицированного химическими и минеральными добавками.

## 1. ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ КЕРАМЗИТОБЕТОНА ПЛОТНОЙ СТРУКТУРЫ

Керамзитобетоны плотной структуры от тяжелых бетонов отличает наличие в зернах заполнителя пор разной величины и в связи с этим следующее влияние на свойства легкого бетона.

1. Низкая прочность заполнителей, определяемая по ГОСТ 9758-86 при сдавливании в цилиндре, оказывает существенное влияние на прочность бетона. Так, например, керамзитовый гравий ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль» имеет марку по дробимости не выше П75 (прочность бетона на нем не выше В15-В20), керамзитовый гравий ЗАО «Лидский керамзитовый завод» - марку П150 (прочность бетона на нем не выше В30), керамзит щебнеподобный Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК» - марку П200 и более высокую, чем у лидского керамзита плотность (прочность бетона на нем можно получать В40 и выше);

2. Высокое водопоглощение пористых заполнителей в бетоне (до 5-8 % и более), оказывает существенное влияние на подвижность и сроки сохранения подвижности бетонной смеси, сцепление цементного камня с заполнителем, толщину и прочность цементного камня в контактной зоне, а соответственно и прочность бетона. По данным [10] толщина контактной зоны в бетонах с пористым заполнителем колеблется от 30 до 60 мкм, в тяжелых бетонах она составляет 25 -50 мкм. В соответствии с этим, отношение призмочной прочности к кубиковой по данным И.А. Иванова может быть принято равным 0,9 [4], вместо в среднем 0,77 для тяжелого бетона;

3. Условия производства керамзита, оказывают влияние на насыпную плотность заполнителей, их водопоглощение в бетоне, и как следствие на плотность в цементном тесте, характеристику, аналогичную истинной плотности материалов плотной структуры. Так, например, в зависимости от завода изготовителя плотность в цементном тесте керамзитового заполнителя фракции 5-10мм может составлять при производстве керамзитового гравия на ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль» - 600...700 кг/м<sup>3</sup>, керамзитового гравия на ЗАО «Лидский керамзитовый завод» - 1000...1100 кг/м<sup>3</sup>, керамзита щебнеподобного на Петриковском керамзитовом заводе ОАО «Гомельский ДСК» - 1000...1280 кг/м<sup>3</sup>;

4. По сравнению с тяжелым бетоном на природном песке и гранитном щебне, плотность которого в среднем выше 2300 кг/м<sup>3</sup>, плотность легкого бетона в зависимости от насыпной плотности применяемых пористых заполнителей и их дозировки (только крупный легкий заполнитель или крупный и мелкий легкие заполнители) может составлять в состоянии естественной влажности в среднем от 1000 до 1800 кг/м<sup>3</sup>;

5. Стабильность достигаемых характеристик легкого бетона зависит от однородности или стабильности свойств выпускаемых керамзитовых заполнителей. Требования по однородности действующими стандартами к керамзитовым заполнителям пока не предъявляются. Однако при применении керамзита в бетонах всегда необходимо не только определить его средние качественные показатели, но и выяснить однородность характеристик, оказывающих влияние на реологические свойства бетонной смеси и прочностные свойства бетона. Однородность свойств керамзитовых заполнителей обусловлена технологией их производства, которая может оказывать влияние на свойства заполнителей (неодинаковой вспучиваемостью гранул при обжиге, классификация в соответствии с полученными насыпной плотностью и прочностью).

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗВЕСТНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ПРЕДЛОЖЕННЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМЗИТОБЕТОНА

Технологические и физико-механические свойства легкого бетона зависят от многих факторов, среди которых наиболее существенное значение имеют: прочность, пористость, удельная поверхность, плотность в цементном тесте, водопоглощение пористых заполнителей; содержание, активность и водопотребность цемента; водоцементное отношение; содержание и пластифицирующая способность химических добавок; вид и дисперсность минеральных добавок.

Для разработки методики подбора составов легкого бетона необходимо иметь расчетные зависимости, учитывающие влияние указанных факторов на его технологические и физико-механические свойства. Разработке таких зависимостей посвящены труды многих ученых, в том числе И.А.Иванова [4], Ю.М.Баженова [11], Г.А.Бужевич [12], А.И.Ваганова [7] и др.

### 2.1 Объемная масса легкого бетона

Объемная масса легкого бетона - одно из основных свойств. Для расчета ее приближенного значения М.З.Симонов [1] предложил следующую формулу:

$$\rho_{об} = 1,15Ц + \left(800 - \frac{Ц}{\gamma_{уд}}\right) \gamma_{кз}, \quad (2.1)$$

где  $\rho_{об}$  - объемная масса бетона (плотность) в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>;

$Ц$  - содержание цемента, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_{уд}$  - плотность цемента, г/см<sup>3</sup>;

$\gamma_{кз}$  - объемная масса заполнителя в куске (средняя крупного и мелкого заполнителей), кг/м<sup>3</sup>.

При выводе формулы принималось, что средний объем заполнителя в бетоне плотной структуры составляет 800 л/м<sup>3</sup>. Это условие не всегда соблюдается, особенно в бетонах, модифицированных химическими добавками-пластификаторами.

В [2, 9, 11 и др.] предлагается упрощенная формула для определения  $\rho_{об}$  в сухом состоянии, которая может быть использована для приближенных расчетов:

$$\rho_{об} = 1,15Ц + К + П, \quad (2.2)$$

где  $Ц$ ,  $К$ ,  $П$  - соответственно содержание цемента, крупного и мелкого заполнителей, кг/м<sup>3</sup>.

### 2.2 Прочность бетона

Как известно, прочность бетона на сжатие существенно зависит от активности и содержания цемента, водоцементного отношения, прочности, водопоглощения и содержания крупного заполнителя. В [3] отмечается, что влияние перечисленных факторов на прочность бетона «не поддается достоверной расчетной оценке, и необходимый расход

цемента может с достаточной точностью быть определен только опытным путем с помощью пробных замесов для каждой данной смеси заполнителей с определенным гранулометрическим составом». Не отрицая приведенного утверждения, следует отметить, что для назначения составов пробных замесов необходимо иметь приближенные расчетные зависимости прочности и плотности бетона, а также показателей удобоукладываемости бетонной смеси.

Ряд расчетных зависимостей прочности легкого бетона приводится в [4]. Наиболее простая зависимость представлена в виде:

$$R_{\sigma} = AR_{\text{ц}} \left( \frac{H}{B} - B \right), \quad (2.3)$$

где  $R_{\sigma}$  – предел прочности бетона на сжатие, кгс/см<sup>2</sup>;

$R_{\text{ц}}$  – активность цемента, кгс/см<sup>2</sup>;

$A$  и  $B$  – коэффициенты, зависящие от прочности и пористости крупного заполнителя, степени уплотнения бетонной смеси, условий твердения бетона. Значения коэффициентов  $A$  и  $B$  устанавливаются опытным путем для каждого вида бетона.

Как указывает автор [4] приведенная формула является «приближенной, поскольку зависимость прочности бетона от  $C/V$  в действительности не линейна».

Ряд математических моделей прочности легкого бетона получены, исходя из взаимосвязи прочности и деформативности растворной части и пористого заполнителя. Например, Б.Г.Скрамтаев [6] предложил следующую формулу, полагая, что разрушение бетона начинается с растворной части:

$$R_{\sigma} = R_{\text{раств}} \left[ 1 + \left( \frac{E_{\text{з}}}{E_{\text{раств}}} - 1 \right) \varphi \right], \quad (2.4)$$

Для случая первоначального разрушения крупного заполнителя С.Е.Фрайфельд предложил формулу в следующем виде [4]:

$$R_{\sigma} = R_{\text{з}} \left[ 1 + \left( \frac{E_{\text{раств}}}{E_{\text{з}}} - 1 \right) (1 - \varphi) \right], \quad (2.5)$$

В приведенных формулах (2.4) и (2.5) приняты следующие обозначения:

$R_{\text{раств}}$  – прочность раствора на сжатие, кгс/см<sup>2</sup>;

$R_{\text{з}}$  – то же, крупного заполнителя, кгс/см<sup>2</sup>;

$E_{\text{з}}, E_{\text{раств}}$  – модули деформаций крупного заполнителя и раствора;

$\varphi$  – объемная концентрация крупного заполнителя в бетоне.

Предложенные формулы (2.4) и (2.5) исходят из линейной зависимости прочности бетона от прочности растворной части (формула (2.4)) или от прочности крупного заполнителя (формула (2.5)). Однако, А.И.Ваганов при исследовании свойств керамзитобетона [7] показал, что зависимость прочности легкого бетона от прочности растворной части не линейна. Он также установил, что пористому заполнителю с определенной прочностью можно получить бетон с соответствующей определенной прочностью на сжатие.

В.Г. Довжик [8] предложил для определения прочности керамзитобетона формулу в виде:

$$R_{\sigma} = aR_{\text{к}} \left( 1 + \ln \frac{R_{\text{р}}}{R_{\text{к}}} \right), \quad (2.6)$$

где  $a=2...3$  определяется опытным путем в зависимости от свойств керамзита;

$R_{\text{р}}, R_{\text{к}}$  – соответственно прочность раствора и керамзита.

А.Н. Давидюк [13] на основании обобщения результатов исследований А.И. Ваганова [7] получил зависимость прочности бетона в виде:

$$R_{\sigma} = (1,32R_{\text{з}} + 3,65) \ln R_{\text{р}} - 2,26R_{\text{з}} - 3,54, \quad (2.7)$$

которая в большей степени коррелируется с опытными данными.

Представленные выше аналитические зависимости прочности легкого бетона плотной структуры практически не пригодны для использования при определении предвари-

тельных составов бетона для изготовления опытных образцов. Они содержат коэффициенты, определяемые экспериментально, и неизвестные заранее свойства растворной части (прочности на сжатие и модуля деформаций).

В английском переводе [3] отмечается, что зависимость прочности легкого бетона от водоцементного отношения подобна аналогичной зависимости для тяжелого бетона. В то же время эта зависимость в количественном отношении изменяется при замене одного вида пористого заполнителя другим, имеющим отличные характеристики прочности, пористости и деформативности. Представленные в работе графики прочности на сжатие тяжелого и легкого бетона на различных пористых заполнителях от эффективного водовяжущего отношения (без учета воды, поглощенной заполнителем) могут быть использованы при получении функциональных зависимостей между прочностью тяжелого и легкого бетона.

### 2.3 Удобоукладываемость бетонной смеси

Марка по удобоукладываемости высокоподвижной бетонной смеси должна находиться в пределах ПЗ...П5. Для самоуплотняемых бетонных смесей эти показатели должны составлять РК-2... РК-6 (расплыв конуса 35...70 см). Показатели удобоукладываемости бетонных смесей обеспечиваются расчетным соотношением массы крупного и мелкого заполнителей, соответствующего цементного теста, его водоцементным отношением, количеством и видом пластифицирующих добавок.

Анализ литературных источников, в том числе [1-13], показал, что в них отсутствуют данные, которые могли быть использованы для оценки удобоукладываемости легкобетонных высокоподвижных и самоуплотняемых бетонных смесей.

До настоящего времени для легких бетонов с высокоподвижными и самоуплотняемыми бетонными смесями не были предложены структурные характеристики, с помощью которых можно было бы оценивать его технологические и физико-механические свойства. Применительно к тяжелому бетону в отделе технологии бетона и растворов РУП «Институт БелНИИС» разработан комплекс структурных характеристик, используемых для оценки свойств и проектирования состава. Разработанные методики для определения структурных характеристик и подбора состава бетона прошли широкую апробацию при изготовлении сборных изделий и возведении монолитных конструкций. В методиках предлагается использовать для оценки и прогнозирования технологических и физико-механических свойств бетонной смеси и бетонов следующие структурные характеристики:

$m_{т.1}$  — объемная концентрация теста, обеспечивающая раздвижку зерен заполнителя;

$m_{т.2}$  — объемная концентрация теста, находящегося в межзерновом пространстве заполнителя;

$m_{в.им}$  — объемная концентрация воды, иммобилизованной заполнителем, включая пленочную и капиллярную воду;

$S_{уд.з}$  — удельная поверхность заполнителей,  $m^2/kg$ ;

$W$  — эффективное водовяжущее отношение бетона;

$W_t$  — эффективное водовяжущее отношение теста;

$X_t$  — характеристика относительного водосодержания теста;

$K_{н.г}$ ,  $K_{н.г.пл}$  — коэффициенты нормальной плотности теста соответственно из вяжущего и пластифицированного (модифицированного) химическими добавками и тонкодисперсными минеральными наполнителями;

$K_{пл}$  — коэффициент пластификации теста.

Указанные структурные характеристики совместно с минералогическим составом и дисперсностью вяжущего полностью отражают физико-химическое воздействие различных факторов на технологические свойства высокоподвижных смесей и физико-механические свойства бетона.

### 3. УСЛОВИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ НЕРАССЛАИВАЕМОСТЬ КЕРАМЗИТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

Высокоподвижные легкобетонные смеси при определенных условиях склонны к расслоению, которое выражается во всплывании зерен пористого заполнителя. При этом структура бетона становится неоднородной, снижаются значения его прочности.

Эти явления обусловлены повышенными пластическими свойствами растворной части бетона, модифицированной эффективными поликарбоксилатными химическими добавками-пластификаторами.

Одним из критериев нерасслаиваемости бетонных смесей является предельное относительное водосодержание цементного теста  $X_{T,max} = (B/\Pi)/K_{нг}$ . При  $X_T < X_{T,max}$  цементное тесто характеризуется наличием свободной (физически несвязанной с зернами цемента) воды и, вследствие этого, значительной термодинамической неустойчивостью, сопровождаемой водоотделением.

Следовательно, в качестве первого критерия нерасслаиваемости бетонных смесей следует принять условие:

$$X_T < X_{T,max} \quad (3.1)$$

Исследования свойств самоуплотняющегося бетона, выполненные в рамках темы [14], показали, что пластические и реологические свойства цементного теста существенно зависят от вида и содержания химических модификаторов. Установлено также, что предложенная И.Н.Ахвердовым характеристика относительного водосодержания цементного теста  $X_{T,max} = (B/\Pi)/K_{нг}$  не может быть универсальной для модифицированного и немодифицированного цементного теста и для различных видов пластификаторов. Её критериальные значения должны устанавливаться для конкретных видов химических модификаторов бетона.

Предельные значения характеристики  $X_{T,max}$  характеризуют предельное относительное содержание цементного теста, т.е. условие начала водоотделения. Для немодифицированного цементного теста И.Н.Ахвердов предложил принимать значение  $X_{T,max} = 1,65$ . По уточненным данным [15] её значение следует определять по формуле:

$$X_{T,max} = 2,4 \cdot 2,6 \cdot K_{нг} \quad (3.2)$$

Для цементного теста, модифицированного химическими добавками, значение характеристики  $X_{T,max}$  должно устанавливаться по результатам экспериментальных исследований. Для цементного теста модифицированного поликарбоксилатными пластификаторами-гиперпластификаторами в [14] предложена следующая зависимость:

$$X_{T,max} = 0,654 \cdot 17 \cdot K_{нг,пл}^2 \quad (3.3)$$

При совместном использовании пластификаторов и модификаторов вязкости должны быть установлены соответствующие предельные значения  $X_{T,max}$ .

Кроме критерия, обеспечивающего термодинамическую устойчивость цементного теста, следует принять критерий, обеспечивающий получение плотной структуры бетона, которая достигается назначением объема цементного теста, достаточного для заполнения межзернового пространства заполнителя и раздвижки его зерен на определенную величину. При этом общая объемная концентрация цементного теста должна определяться по формуле:

$$m_T = m_{T,1} + m_{T,2} \quad (3.4)$$

Минимальное значение  $m_{T,1}$  должно определяться минимальным значением толщины цементного теста  $\delta_T$ , обволакиваемого зерна заполнителя, и его удельной поверх-

ностью. Минимальное значение  $\delta_T$  в работах И.Н.Ахвердова принимается равной  $\delta_T = 13 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . При этом значение  $m_{T.1.min}$  может определяться по формуле:

$$m_{T1.min} = 13 \cdot 10^{-6} \cdot S_{уд.з} \cdot G_p \quad (3.5)$$

Исследованиями по теме [14] установлено, что для тяжелого бетона значение  $m_{T1.min}$  должно быть равным 0,025. Следовательно, в качестве второго критерия получения нерасслаиваемых бетонных смесей плотной структуры может быть принято условие:

$$m_{T.1.min} \geq 0,025 \quad (3.6)$$

Третье условие нерасслаиваемых легбетонных смесей должно обеспечить отсутствие возможности всплывания зерен крупного заполнителя, которое наблюдается после приготовления и укладки бетонных смесей. Всплывание зерен крупного заполнителя обусловливается разницей плотности зерен пористого заполнителя и плотности теста из вяжущего в бетонной смеси. В соответствии с законом Архимеда выталкивающая сила жидкости равна весу жидкости, вытесняемой погружаемым телом. Для зерен крупного заполнителя бетонной смеси эта сила равна:

$$F_{выт.} = 9,8 \cdot \frac{\pi d_{кр.з}^3}{6}, \text{ Н} \quad (3.7)$$

где  $d_{кр.з}$  - средний диаметр крупного заполнителя в м;

$\rho_T$  - плотность цементного теста бетонной смеси,  $\text{кг/м}^3$ .

Удерживающая сила  $f_{уд}$  равна сумме веса зерна средним диаметром и силы трения поверхности зерна в тесте бетонной смеси, т.е.:

$$f_{уд} = K_\tau \cdot d_{кр.з}^2 \cdot \tau_{0.T} + 9,8 \cdot \frac{\pi d_{кр.з}^3}{6}, \quad (3.8)$$

где  $K_\tau$  - коэффициент, характеризующий относительную часть поверхности зерна пористого заполнителя, на которой возникает трение при выталкивании зерна из раствора;

$\tau_{0.T}$  - предельное напряжение сдвига цементного теста, Па;

$\rho_{кр.и.т}$  - плотность зерен крупного заполнителя в цементном тесте,  $\text{кг/м}^3$ .

Условие, исключающее возможность всплывания зерен крупного заполнителя представляется в виде:

$$f_{уд} > f_{выт.},$$

которое с учетом (3.7) и (3.8) после преобразования представлено в виде:

$$\frac{6K_\tau \tau_{0.T}}{d_{кр.з}^3} + \rho_{кр.и.т} > \rho_T \quad (3.9)$$

Значение коэффициента  $K_\tau$  должно определяться на основе экспериментальных данных. В результате экспериментальных исследований, представленных ниже, значение  $K_\tau$  принято равным 0,6.

Реологическая характеристика  $\tau_{0.T}$  должна определяться на сдвиговых приборах для каждого теста, модифицированного различными добавками.

В результате математической обработки экспериментальных данных по измерению значений  $\tau_{0.T}$  для бездобавочного цементного теста и модифицированного гиперпластификатором, получены следующие зависимости для расчёта  $\tau_{0.T}$  по характеристике относительного содержания теста  $X_T$ :

для бездобавочного цементного теста

$$\tau_{0.T} = K_1 \cdot (X_{Tmax} - X_T)^{2.73}; \quad (3.10)$$

для теста, модифицированного гиперпластификатором

$$\tau_{0.T} = K_1 \cdot (X_{Tmax} - X_T), \quad (3.11)$$

где  $K_1 = 720 \text{ Па}$ ;  $K_2 = 187 \text{ Па}$ .

Однородность структуры высокоподвижных легкобетонных смесей может быть обеспеченной при условии удовлетворения всех трёх условий.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ КЕРАМЗИТОБЕТОНА

Для проверки полученных экспериментально – теоретических зависимостей и получения значений констант, входящих в зависимости, выполнен большой комплекс экспериментальных исследований. В экспериментальных исследованиях и в обработке полученных данных приняли участие Ю.С. Иванова и Д.В.Корыстин. В статье представлены отдельные результаты.

##### 4.1 Характеристика материалов, использованных для проведения исследований

###### 4.1.1 Характеристики свойств используемых цементов

Эксперименты проводили с использованием портландцемента без минеральных добавок ПЦ 500-Д0 по ГОСТ 10178-85, производства ОАО «Красносельскстройматериалы».

###### 4.1.2 Характеристики свойств заполнителей

Для проведения исследований использованы:

- керамзит щебнеподобный фр 5-10мм, выпускаемый по СТБ 1217-2000 Петриковским керамзитовым заводом ОАО «Гомельский ДСК»;
- керамзитовый гравий фр 5-10мм, выпускаемый по СТБ 1217-2000 ЗАО «Лидский керамзитовый завод».

Характеристика свойств керамзитовых заполнителей приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики керамзитовых заполнителей, использованных для проведения исследований

Наименование предприятия, фракция	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Средняя плотность в цементном тесте, кг/м <sup>3</sup>	Марка по прочности (прочность, МПа)	Водопоглощение в бетоне, %
Петриковский керамзитовый завод ОАО «Гомельский ДСК» фр 5-10 мм	630	1135	П150 (3,6)	5,0
ЗАО «Лидский керамзитовый завод» фр 5-10 мм	627	1044	П150 (3,5)	4,8

Примечание. Насыпная плотность, средняя плотность в цементном тесте, фактическая прочность при сдавливании в цилиндре определены по ГОСТ 9758-86, водопоглощение в бетоне по СТБ 1545 – 2005 (п. 7.3.6).

###### 4.1.3 Характеристика мелкого заполнителя

Для проведения исследований использован природный песок крупный по ГОСТ 8736-93, характеристика которого приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Характеристики песка

Фракция	Частные остатки, %	Полные остатки, %	Мк	S <sub>уд.отд. фр.</sub> , см <sup>2</sup> /г	S <sub>уд.</sub> , м <sup>2</sup> /кг	W <sub>п</sub>
2,5	10,59	10,59	2,82	9,4	7,6	0,0084
1,25	14,32	24,91		20,2		
0,63	35,79	60,70		37		
0,315	27,31	88,01		72		
0,14	9,88	97,89		141		
<0,14	2,11	100		1200		

Примечание Удельная поверхность (S<sub>уд.</sub>) и водопоглощение порами (W<sub>п</sub>) определены по методике, изложенной в [16], с уточнением S<sub>уд.</sub> для фракции песка <0,14 по данным [17]

#### 4.1.4 Характеристики свойств химических добавок

Для проведения исследований использовали следующие химические добавки:

- пластификатор I группы «Стахемент 2000-М Ж30», выпускаемый по ТУ ВУ 800013176-545-2007 ООО «Стахема-М»;
- пластификатор I группы «FRAME GIPER S- TBs» для товарного бетона со стабилизатором, выпускаемый по ТУ ВУ 190669631.003-2011 ООО «Фрэймхаустрэйд».

#### 4.2 Методика оценки однородности керамзитобетонной смеси

Методика оценки однородности подвижной бетонной смеси (расслаиваемости бетонной смеси), разработана в связи с тем, что приведенная в СТБ 1545-2005 методика по оценке расслаиваемости для легких бетонов имеет ограниченное применение, и, по-видимому, может использоваться только для заполнителей с высокой плотностью в цементном тесте (например, для оценки расслаиваемости аглопоритобетона).

При разработке методики учитывалось, что бетонные смеси, модифицированные химическими добавками-пластификаторами, изготовленные с применением легких заполнителей, особенно крупных, склонны к расслоению, которое выражается всплытием заполнителя и оседанием теста из вяжущего.

Однородность бетонной смеси на легких крупных заполнителях оценивалась по следующим признакам:

- всплытие заполнителя на верхней грани кубов;
- равномерность распределения керамзита по высоте образцов (оценивается визуально при распалубке образцов и их разрушении).

Оценку однородности уложенной в формы бетонной смеси на легких крупных заполнителях выполняли в следующей последовательности:

- изготавливали образцы из бетонной смеси проверяемого состава по ГОСТ 10180-90 с уплотнением в зависимости от подвижности бетонной смеси;
- визуально оценивали качество поверхности сразу после заглаживания и через 10-15 минут. Определяли, наблюдается ли всплытие керамзитового заполнителя. На рисунке 4.1 приведены варианты поверхности с всплытием легкого заполнителя и без всплытия;

а)



б)



Рисунок 4.1 – Качество поверхности бетонных образцов, характеризующее:

а) всплытие заполнителя, б) отсутствие расслоения бетонной смеси с легким заполнителем

• через 15-20 часов после изготовления образцов формы распалубливали и осуществляли осмотр плоскостей и граней кубов. Определяли, имеют ли поверхности боковых граней участки, не заполненные цементным тестом. Раскалывали один куб в направлении, перпендикулярном слоям укладки бетонной смеси и оценивали равномерность распределения легкого заполнителя по всему объему бетона. На рисунках 4.2 – 4.4 показаны возможные варианты структуры бетона.



Рисунок 4.2 – Оценка равномерности распределения легкого заполнителя по объему бетона: расслоения нет, заполнитель не всплывает, поверхность хорошая



Рисунок 4.3 – Оценка равномерности распределения легкого заполнителя по объему бетона: заполнитель всплывает на поверхности, но расслоения бетонной смеси не наблюдается



Рисунок 4.4 – Оценка равномерности распределения легкого заполнителя по объему бетона: заполнитель всплывает на поверхности, дефекты ребер и граней, расслоение бетонной смеси

При описании результатов экспериментальных исследований была принята оценка склонности к расслоению бетонной смеси по трехбальной системе: 1 - однородная структура, отсутствует всплытие заполнителя (см. рис. 4.2); 2 - всплытие заполнителя на поверхности приблизительно  $\frac{1}{4}$  от диаметра зерна заполнителя, структура бетона однородная (см. рис. 4.3); 3 - всплытие заполнителя, неоднородная структура бетона (см. рис. 4.4).

До выполнения экспериментальной оценки склонности к расслоению бетонной смеси по разработанной методике, должен быть выполнен расчет объемной концентрации цементного теста, идущего на раздвижку зерен заполнителя ( $m_{т1}$ ) и должно выполняться условие, при котором в составе бетона  $m_{т1} \geq 0,025$ . При этом условии содержание цементного теста в бетонной смеси, достаточное для заполнения межзернового пространства заполнителей и экспериментально можно оценить влияние характеристик цементного теста на расслоение бетонной смеси.

#### 4.3 Методика определения предельного напряжения сдвига цементного теста.

Для проведения исследований использовался программируемый реометр DV-III Ultra компании Brookfield, США, который позволяет проводить измерение напряжения сдвига и вязкости при заданных скоростях сдвига. На рисунке 4.5 показан основной вид прибора, на котором проводят измерение.



Рисунок 4.5 - Программируемый реометр DV-III Ultra компании Brookfield, США  
 Определение напряжения сдвига осуществляется в следующей последовательности:

1. Приготавливают цементное теста с заданным относительным водосодержанием ( $X_T$ ), в том числе модифицированное химической добавкой. Время перемешивания цементного теста 5 минут.

2. Измерение напряжения сдвига осуществляют в соответствии с руководством № M/98-211-B0104 Brookfield Engineering Laboratories, Inc.

2.1. Измеряют величину вязкости с помощью программируемого реометра DV-III Ultra в зависимости от параметра скорость/время.

2.2. По полученным значениям осуществляют расчет величины напряжения сдвига по формуле Ньютона:

$$\tau = \eta \cdot \frac{\Delta U}{\Delta X}, \quad (4.1)$$

где  $\eta$  – вязкость (с П);

$\Delta U$  – градиент скорости (об/сек);

$\Delta X$  – градиент расстояния (м);

3 По полученным данным строят график зависимости  $\tau = f(U)$  и определяют по графику значение  $\tau_0$ .

#### 4.4 Результаты исследований предельного напряжения сдвига цементного теста

Разработанная методика использовалась для определения предельного напряжения сдвига цементного теста с различными водоцементными отношениями и значениями  $X_T$ , модифицированного и немодифицированного химическими добавками. Полученные графики зависимостей напряжений сдвига цементного теста приведены на рисунках 4.6 – 4.8.

Результаты определения предельного напряжения сдвига представлены в таблице 4.3. Из приведенных данных следует, что значение предельного напряжения сдвига цементного теста зависит от характеристики его относительного водосодержания  $X_T$ . С увеличением значений  $X_T$   $\tau_0$  существенно уменьшается. График зависимости  $\tau_0 = \varphi(X_T)$  при использовании различных добавок представлен на рисунке 4.9.

Таблица 4.3 – Результаты определения предельного напряжения сдвига цементных композиций в зависимости от их водосодержания и применяемых пластифицирующих добавок

Добавка - пластификатор		Водосодержание цементного теста ( $x_T$ )	Предельное напряжение сдвига ( $\tau_0$ ), Па
Наименование	Дозировка, % от массы цемента		
Без добавки		1,2	77,13
		1,25	69,14
		1,3	34,08
«Стахемент 2000-М Ж30»	0,9 по раствору товарной концентрации	1,2	20,05
		1,25	3,3
		1,3	1,97
«FRAME GIPER S-TBs»	0,9 по раствору товарной концентрации	1,2	21,77
		1,25	13,59
		1,3	2,51

На основании обобщения и математической обработки экспериментальных данных получены экспериментальные зависимости (3.10) и (3.11), представленные в разделе 3.

#### 4.5 Исследование влияния водосодержания цементного теста, химических модификаторов на структурные характеристики и расслаиваемость композиций на керамзитовом крупном заполнителе

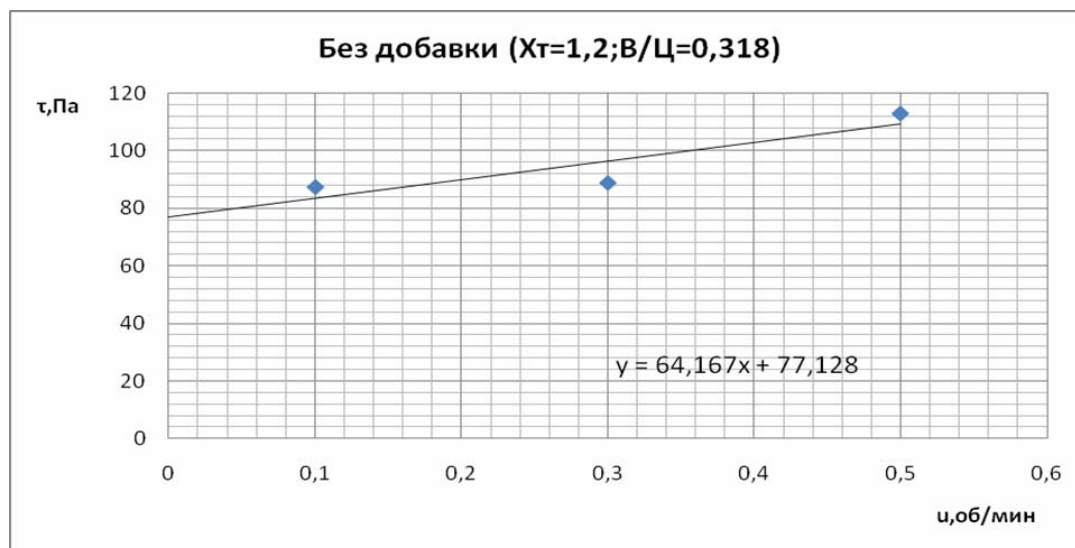
Исследования проводили с использованием модифицированного химическими добавками цементного теста и керамзита Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК» фр. 5-10мм с плотностью в цементном тесте  $1135 \text{ кг/м}^3$  (см. табл. 4.1).

При проведении эксперимента смешивали керамзит и модифицированное химическими добавками цементное тесто с водосодержанием ( $X_T$ ) от близкого к единице до предельного и оценивали визуально расслаиваемость керамзитобетонной смеси по 4.2 в следующей последовательности:

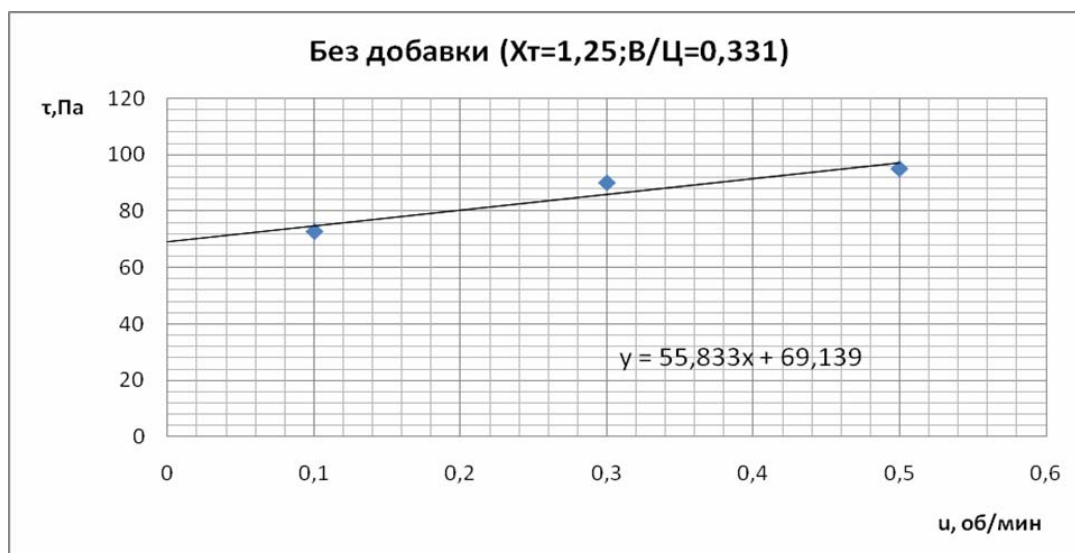
- Взвешивали 1,5кг цемента или цемента с минеральной добавкой и готовили цементное тесто или тесто из вяжущего (смеси цемента и минеральной добавки) без химических добавок или с добавками пластификаторами с относительным водосодержанием приблизительно 1,0; 1,2; 1,4. Оценивали консистенцию приготовленного цементного теста.

- Смешивали приготовленное тесто с 600г керамзита. Для этого в предварительно взвешенный сосуд с керамзитовым заполнителем постепенно добавляли цементное тесто до получения нормальной бетонной смеси (весь заполнитель находится в тесте). После этого сосуд повторно взвешивали и определяли количество цементного теста, добавленного в керамзитовый заполнитель.

а)



б)



в)

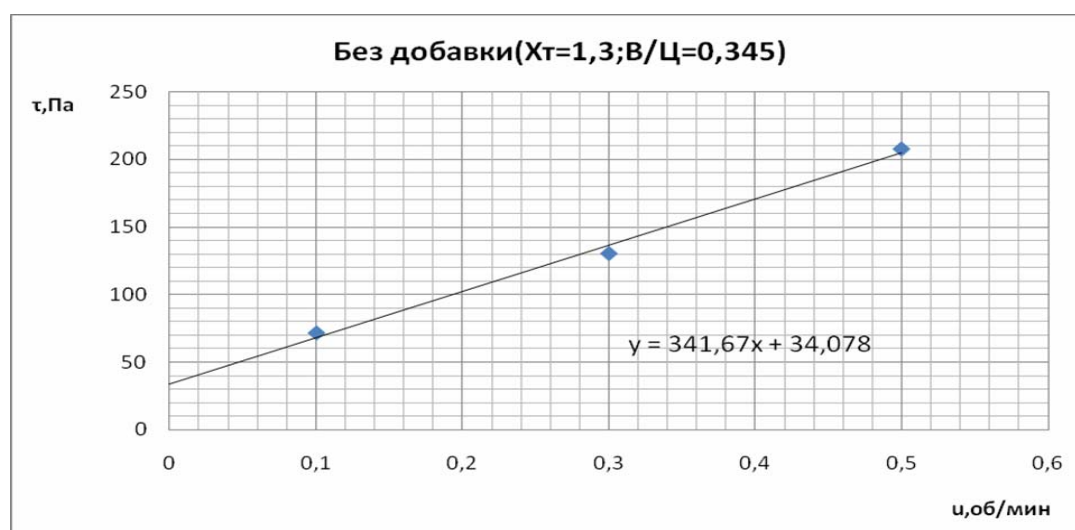
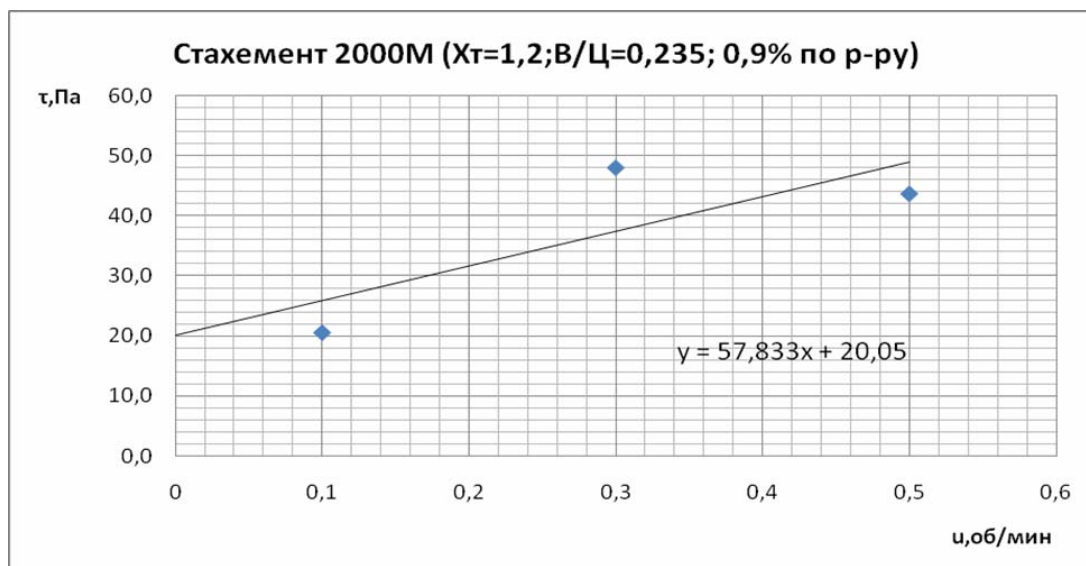
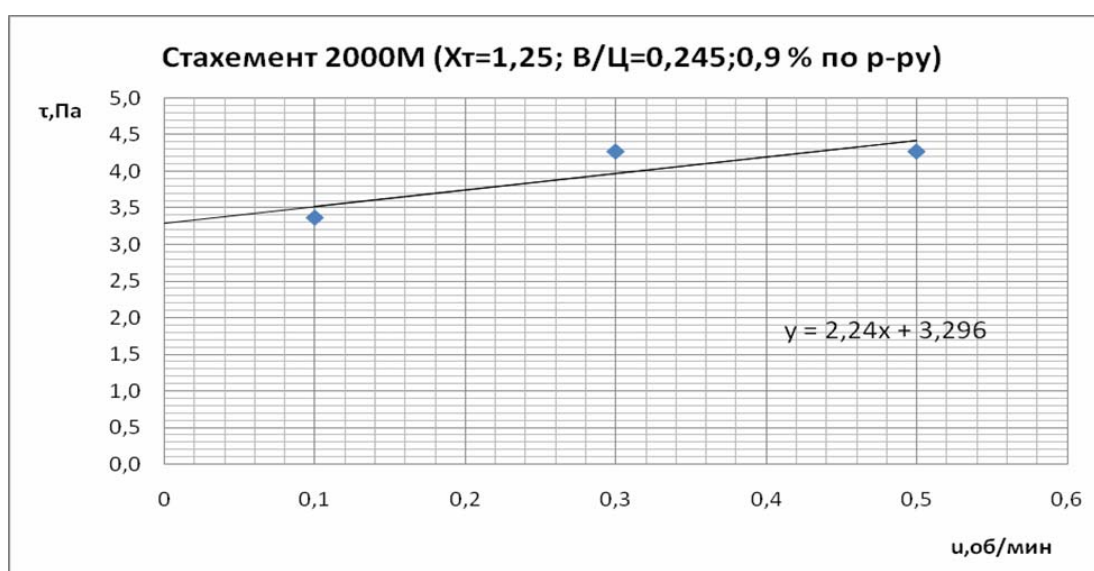


Рисунок 4.6 – Графики зависимости  $\tau = f(\omega)$  цементного теста без добавок-пластификаторов при  $x_T$  равном а) 1,2, б) 1,25, в) 1,3

а)



б)



в)

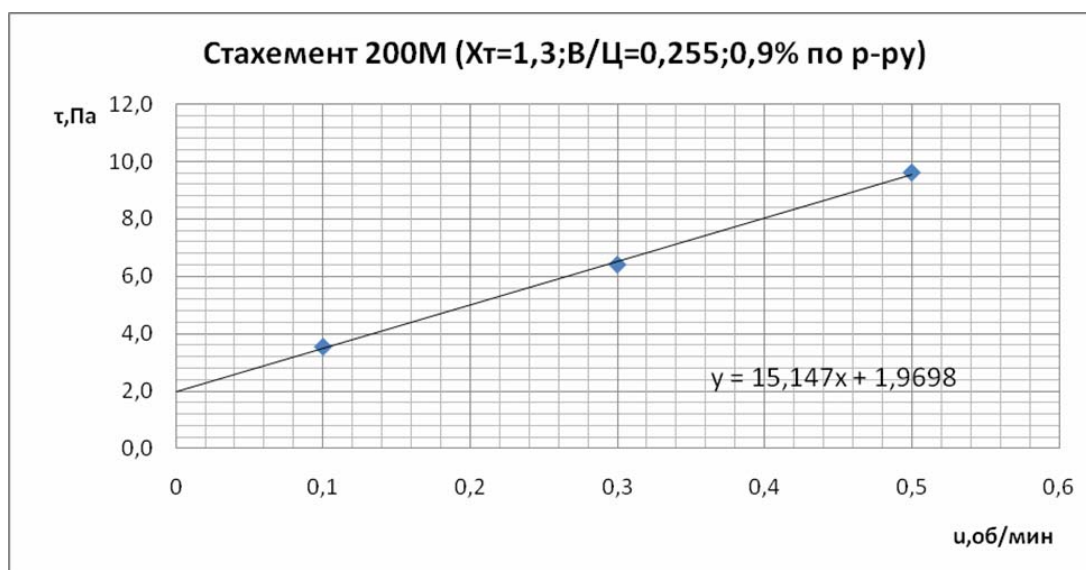
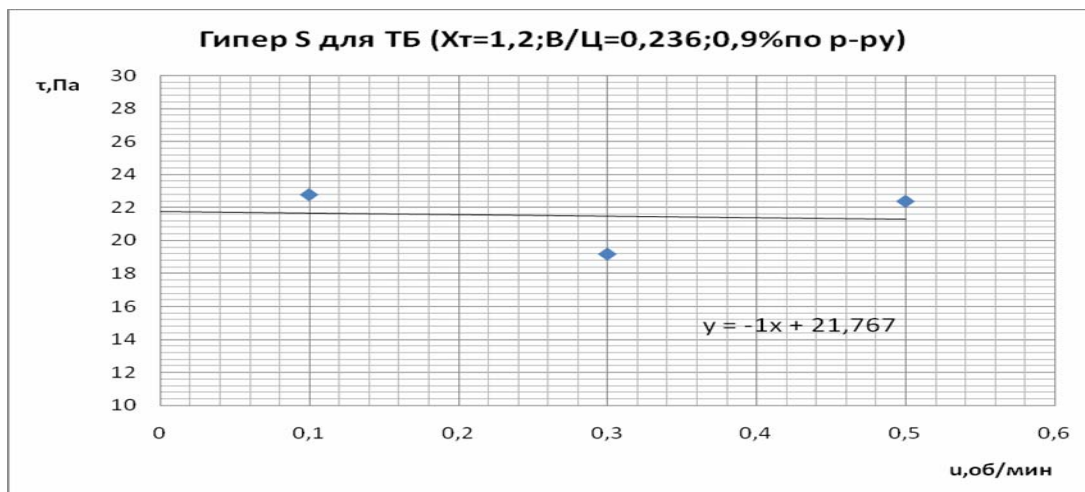
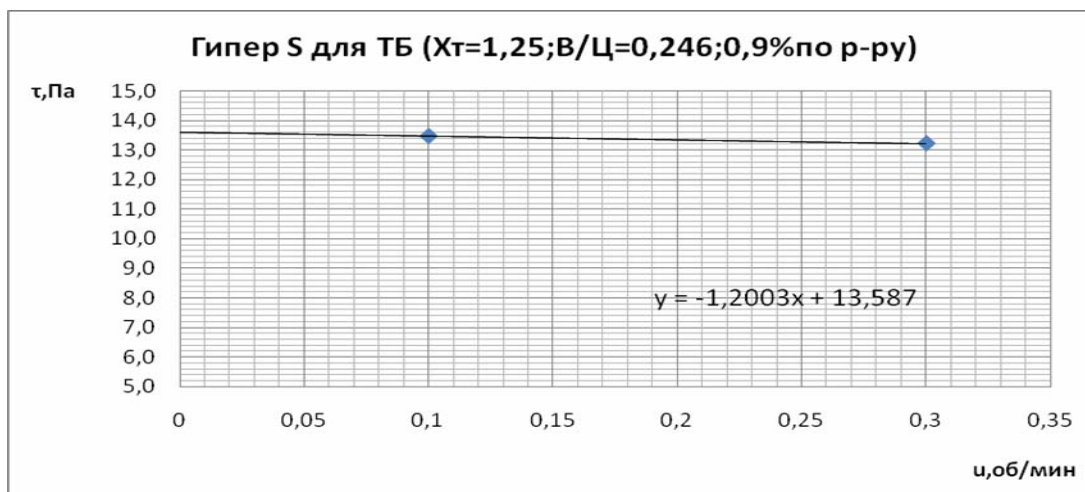


Рисунок 4.7 – Графики зависимости  $\tau = f(U)$  цементного теста с добавкой «Стахемент 2000-М Ж30» при  $x_T$  равном а) 1,2, б) 1,25, в) 1,3

а)



б)



в)

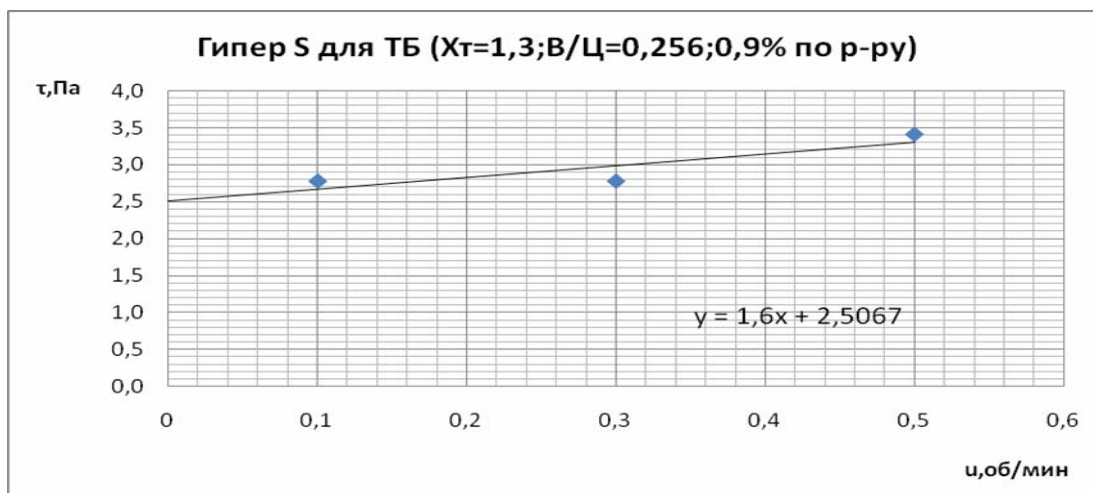


Рисунок 4.8– Графики зависимости  $\tau = f(u)$  цементного теста с добавкой «FRAME GIPER S- TBs» для товарного бетона со стабилизатором при  $x_T$  равном а) 1,2, б) 1,25, в) 1,3

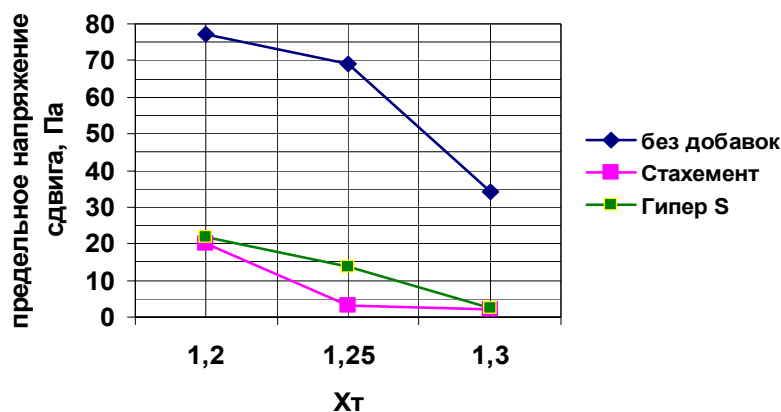


Рисунок 4.9 – Изменение предельного напряжения сдвига цементных композиций в зависимости от их водосодержания и применяемых пластифицирующих добавок

- Определяли плотность приготовленной бетонной смеси по ГОСТ 12730.1-78.
- В течение 15 минут после перемешивания смесь укладывали в формы размером 70 x 70 x 70 мм по ГОСТ 10180-90 и оценивали расслаиваемость по признакам, приведенным в 4.2.
- Через 15-20 часов после изготовления образцов их распалубливали, оценивали поверхность боковых граней кубиков, уточняли плотность бетона. Один кубик раскалываем в направлении, перпендикулярном слоям укладки бетонной смеси, для определения наличия расслоения.
- Пересчитывали состав с учетом фактической плотности бетона и рассчитывали структурные характеристики, определяющие технологические свойства смесей с керамзитовым заполнителем.

Для уточнения водопоглощения керамзитового заполнителя в бетоне проводили эксперименты по СТБ 1545-2005 (п. 7.3.6). Результаты исследований приведены на рисунке 4.10.

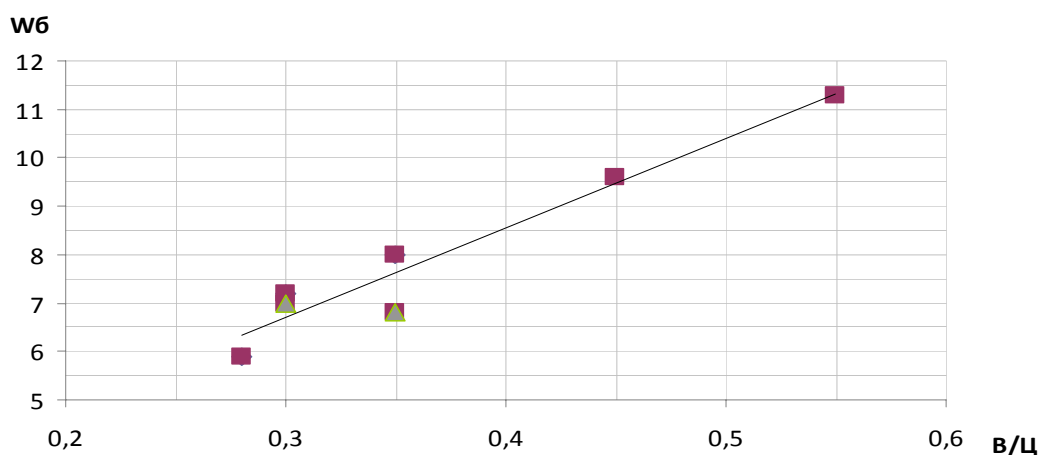


Рисунок 4.10 – Зависимость водопоглощения в бетоне керамзита щебнеподобного с  $\rho_{ц.т.}=1135 \text{ кг/м}^3$  от водоцементного отношения бетона

Полученная зависимость описана следующей формулой:

$$W_b = 18,45(V/C) + 1,17 \quad (4.2)$$

В таблице 4.4 приведены результаты экспериментальных исследований факторов, оказывающих влияние на однородность смеси с керамзитовым крупным заполнителем. Структурные характеристики рассчитаны для бетонной смеси через 15 минут после смешивания компонентов.

Как следует из данных, приведенных в таблице 4.4, удовлетворительное качество и однородность бетонных смесей, оцениваемых показателями 1 и 2, обеспечено соблюдением всех трех условий:

- 1  $m_T > 0,025$ ,
- 2  $x_T < x_{T,max}$ ,
- 3  $f_{уд} > \rho_T$ .

Для бездобавочного цементного теста ( $K_{нр}=0,265$ )  $x_{T,max}$  рассчитывается по зависимости (3.2)  $x_{T,max}=1,71$ .

В составах 0.3 и 0.4 значение  $x_T$  практически равно  $x_{T,max}$  и соответственно  $T_{о.т} \approx 0$  и  $f_{уд} \ll f_{выт}$ . Эти составы характеризуются весьма низким качеством.

Для смесей с добавкой «Стахемент 2000-М Ж30» и «FRAME GIPER S- TBs»  $x_{T,max}$ , определяемое по (3.3), составляет 1.3. Фактическое значение  $x_T$  в составах 1.2, 2.2 и 2.7 превышает  $x_{T,max}$  и соответственно отмечено неудовлетворительное качество бетонов. Для этих составов не соблюдается также и третье условие.

В составе 1.1 при соблюдении первого и второго условий не обеспечивается третье условие, гарантирующее стабильное состояние керамзитовых зерен. Соответственно отмечено их всплывание и низкое качество керамзитовых смесей.

В составах, где соблюдаются одновременно все три условия отмечено удовлетворительное качество бетонных смесей.

#### **4.6 Исследования влияния объемной концентрации цементного теста на однородность бетонной смеси**

Исследования проводили на керамзитовом крупном заполнителе фр.5-10мм, имеющем одинаковые марки по насыпной прочности и плотности, но отличающегося плотностью в цементном тесте (см. табл. 4.1).

При проведении эксперимента использовали цемент ПЦ500-Д0 производства ОАО «Красносельскстройматериалы», песок тяжелый (см. табл. 4.2), пластифицирующие добавки I группы: «Стахемент 2000-М Ж30» и «FRAME GIPER S- TBs».

При подборе составов бетона принимали постоянным содержание песка в смеси заполнителей ( $r=0,55$ ), истинное водоцементное отношение ( $B/C_{ист}=0,34$ ), принимали три величины объемной концентрации цементного теста, идущего на раздвижку зерен заполнителя ( $m_{т.1}=0,03; 0,06; 0,09$ ), которые были пересчитаны по фактической плотности бетонной смеси.

Исследования проводили по следующим этапам:

- на первом этапе (составы №1-№6) определяли характеристики бетонной смеси и бетона при использовании модификатора - «Стахемент 2000-М Ж30», составы №1-№3 изготавливали на керамзите щебнеподобном, составы №4-№6 – на керамзитовом гравии;
- на втором этапе (составы №2.1-№2.6) определяли характеристики бетонной смеси и бетона при использовании модификатора - «FRAME GIPER S- TBs», составы №2.1-№2.3 изготавливали на керамзите щебнеподобном, составы №2.4-№2.6 – на керамзитовом гравии

В таблице 4.4 приведены составы бетона на керамзитовом крупном заполнителе, характеристики использованных материалов и результаты расчета однородности бетона и оценка структурных характеристик, определяющих технологические свойства бетонных смесей. В таблицу, кроме перечисленных составов бетона, вошли дополнительные составы бетона без добавки - пластификатора.

Результаты исследований однородности структуры бетона, проведенные на бетонных смесях с керамзитовым крупным заполнителем и представленные в таблице 4.4, подтверждают выводы, приведенные в разделе 3.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Представлены результаты комплекса экспериментально теоретических исследований цементных композиций с применением керамзита белорусских предприятий с различной средней плотностью в цементном тесте, а также высокоэффективных химических модификаторов бетона.

По результатам экспериментально-теоретических исследований разработаны математические модели оценки структуры бетонной смеси, которые использованы при формулировании критериальных условий, обеспечивающих получение однородных нерасслаиваемых высокоподвижных керамзитобетонных смесей. К ним относятся: предельное содержание цементного теста, идущего на раздвижку зерен крупного заполнителя  $m_{Т.1}$ , предельное значение относительного водосодержания цементного теста  $X_T$  и условие, гарантирующее отсутствие расслоения в бетонной смеси. Для определения всех трёх условий представлены соответствующие математические модели.

Полученные экспериментально-теоретические зависимости использованы при разработке методики оценки состава нерасслаиваемых высокоподвижных бетонных смесей.

Методика оценки составов апробирована при изготовлении керамзитобетонных смесей с различным содержанием вяжущего и керамзита, при наличии и отсутствии мелкого заполнителя и различных химических добавок, при широком диапазоне варьирования водоцементного отношения. Результаты экспериментальных исследований подтвердили надежность разработанной методики и возможность ее применения при подборе состава.

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Симонов, М.З. Основы технологии легких бетонов. - М.: Стройиздат, 1973.
2. Несветаев, Г.В. Бетоны. - Ростов-на-Дону: «Феликс», 2011.
3. Легкие бетоны: проектирование и технология (перевод с английского) - М.: Стройиздат, 1981.
4. Иванов, И.А. Технология легких бетонов на искусственных пористых заполнителях. - М.: Стройиздат, 1974.
5. Ахвердов, И.Н. Высокопрочный бетон. – М.: Госстройиздат, 1961.
6. Скрамтаев, Б.Г. Легкие бетоны/ Б.Г. Скрамтаев, М.П. Элизон. - М.: Промстройиздат, 1956.
7. Ваганов, А.И. Керамзитобетон. - М.: Госстройиздат, 1976.
8. Довжик, В.Г. Технология высокопрочного керамзитобетона/ В.Г.Довжик, В.А.Дорф, В.П.Петров. - М.: Стройиздат, 1954.
9. Бойко, В.Е. Расчет и подбор составов легких бетонов. – Киев.: Будівельник, 1974.
10. Дворкин, Л.И., Дворкин, О.Л. Основы бетоноведения. - СПб.: ООО «Строй Бетон», 2006.
11. Баженов, Ю.М. Способы определения состава бетона различных видов. – М.: Стройиздат, 1975.
12. Бужевич, Г.А. Керамзитожелезобетон. – М.: Стройиздат, 1963.
13. Давидюк, А.Н. Легкие конструкционно-теплоизоляционные бетоны на стекловидных пористых заполнителях. - М.: Красная звезда, 2008.
14. Провести исследования реологических, физико-механических и технологических свойства самоуплотняющихся бетонов, обеспечивающие увеличение производительности труда при укладке бетонной смеси и снижение удельных затрат энергии и стоимости отделочных работ, разработать и внедрить комплект нормативно-технической документации: отчет о НИР (заключ.) /РУП «Институт БелНИИС»: рук. темы Н.П.Блещик. – Минск, 2005. - № ГР 20053268.
15. Блещик, Н.П. Основы реологии и технологии пресс-вакуум-бетона: автореф. дисс. ...докт.техн.наук. - Мн., 1986.
16. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона. – М., Стройиздат, 1981.- 464 с.
17. Москвин, В.М., Тринкер, Б.Д. Об оценке качества песка и подборе состава бетона / Применение мелких песков в бетоне и методы подбора состава бетона. - М.: Госстройиздат, 1961. - С.19-22.

Таблица 4.4- Результаты экспериментальных исследований факторов, оказывающих влияние на однородность смеси с керамзитовым крупным заполнителем

Шифр состава	Ц, кг	К, кг	Добавка	В	Кнг	Хт. t=15	мт.1 t=15	$\rho_p$	$\tau_0$	fуд	fуд - $\rho_p$	Оценка однородности смеси
0.1	1014,6	432,5	-	309,5	0,265	1,060	0,378	2090,8	169	9396	7305	Тесто очень густое, перемешивается трудно. При формировании поверхность заглаживается хорошо, заполнитель не виден. <b>1</b>
0.2	682,9	538,0	-	307,4	0,265	1,433	0,190	1913,4	41	3121	1208	Тесто жидкое. Бетонная смесь подвижная (П1). При формировании поверхность заглаживается нормально, заполнитель не всплывает. Поверхность боковых граней кубов гладкая. На разломе признаков расслоения нет. <b>1</b>
0.3	522,4	528,4	-	287,3	0,265	1,655	0,115	1823,7	0	1137	-687	Тесто очень жидкое, водоотделение расслоение самого теста. При формировании поверхность плохо заглаживается, заполнитель всплывает. Поверхность боковых граней кубов гладкая, расслоения нет. <b>3</b>
0.4	556,4	515,6	-	306	0,265	1,686	0,152	1820,6	0	1137	-684	Тесто очень жидкое, водоотделение расслоение самого теста. При формировании поверхность плохо заглаживается, заполнитель всплывает. Поверхность боковых граней кубов гладкая, расслоения нет. <b>3</b>
0.5	608,9	471,9	-	334,9	0,197	2,260	0,216	1829,2	0	1137	-692	Тесто очень жидкое, водоотделение расслоение самого теста. При формировании поверхность плохо заглаживается, заполнитель всплывает. Поверхность боковых граней кубов гладкая. На разломе видно, что есть расслоение. <b>3</b>
1.1	723,7	519,3	Стахе- мент 2000-М Ж30 0,9	217,1	0,196	1,251	0,131	2129,1	10	1612	-517	Тесто жидкое, водоотделение, воздух. П5. При формировании поверхность заглаживается плохо. В верхней части куба оголен керамзит. На разломе и по боковым граням расслоения. <b>3</b>
1.2	660,2	401,3		230,1	0,196	1,471	0,191	2042,9	0	1137	-906	Тесто жидкое, водоотделение, воздух. П5. При формировании поверхность заглаживается плохо. В верхней части куба оголен керамзит. На разломе и по боковым граням расслоения. <b>3</b>

Продолжение таблицы 4.4

Шифр состава	Ц, кг	К, кг	Добавка	B	Кнг	Xт. t=15	мт.1 t=15	$\rho_p$	$\tau_0$	fуд	fуд - $\rho_p$	Оценка однородности смеси
2.1	1018,3	405,1	FRAME GIPERS-TBs 1,0	254,5	0,196	1,148	0,339	2200,5	29	2554	353	Тесто густое, текучая, при вибрации разжижается. При формовании поверхность плохо заглаживается, заполнитель всплывает. <b>2</b>
2.2	837,6	580,2		256,3	0,196	1,281	0,165	2131,5	4	1340	-792	Тесто очень жидкое, водоотделение, расслоение самого теста. При формовании поверхность плохо заглаживается, заполнитель всплывает. Поверхность боковых граней кубов гладкая. На разломе видно, что есть расслоение. <b>3</b>
2.3	942,1	544,6	FRAME GIPERS-TB 0,8	263,5	0,2	1,200	0,234	2163,0	24	2325	161	Тесто вязкое, незначительное водоотделение. Бетонная смесь подвижная (П2-П3), растекается. При формовании поверхность заглаживается нормально, заполнитель практически не всплывает. Поверхность боковых граней кубов гладкая. На разломе признаков расслоения нет. <b>1</b>
2.4	722,8	572,9		216,8	0,2	1,214	0,099	2133,5	22	2195	62	Тесто жидкое, незначительное водоотделение, воздух. Бетонная смесь П-2-П3. При формовании поверхность заглаживается плохо. Поверхность боковых граней кубов гладкая. На разломе видно, что есть незначительное расслоения. <b>2</b>
2.5	709,5	605,5		212,9	0,2	1,198	0,071	2138,0	25	2344	206	Тесто жидкое, водоотделение, воздух. Бетонная смесь П3. При формовании поверхность заглаживается плохо. Поверхность боковых граней кубов гладкая. На разломе признаков расслоения нет. <b>2</b>
2.6	783,6	611,3		235,1	0,2	1,218	0,112	2139,9	21	2160	20	Тесто жидкое, водоотделение, воздух. Бетонная смесь П3. При формовании поверхность заглаживается плохо. Поверхность боковых граней кубов гладкая. На разломе признаков расслоения нет. <b>2</b>
2.7	682,5	492,1	FRAME GIPERS-TB 0,7	238,7	0,21	1,375	0,153	2045,5	5	1366	-680	Тесто жидкое, водоотделение, воздух. Бетонная смесь П5. При формовании поверхность заглаживается плохо. Поверхность боковых граней кубов гладкая. На разломе видно, что есть расслоения. <b>3</b>

Таблица 4.5 - Составы бетона на керамзитовом крупном заполнителе и результаты расчета однородности бетона при оценке структурных характеристик, определяющих технологические свойства бетонных смесей

Шифр состава	Ц, кг	К, кг	Добавка	П, кг	В, л	$\rho_{ц.т.}$	Хт. t=15	mt.1 t=15	$\rho_p$	$\tau_0$	fуд	fуд - $\rho_p$	Оценка однородности смеси
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
б/д 1	485,9	457	-	558	230,9	1135	1,280	0,091	1934,1	71	4611	2677	Поверхность боковых граней хорошая, нет расслоения <b>1</b>
б/д 2	479,2	451	-	550	267,6	1135	1,455	0,112	1874,3	17	1971	97	Поверхность боковых граней хорошая, нет расслоения <b>1</b>
№1	395,8	495,9	Стахемент 2000-М Ж30, 0,9%	605,6	161,9	1135	1,128	-0,04	2092,2	33	2736	644	На поверхности боковых граней видно, что <u>не хватает цем.теста</u> , верхняя грань нормальная, немного виден керамзит
№2	444,1	482,7		558,9	178,6	1135	1,162	0,000	2099,6	26	2429	330	На поверхности боковых граней видно, что <u>не хватает цем.теста</u> , верхняя грань - виден керамзит
№3	492,8	463,5		566	194,5	1135	1,194	0,040	2103,6	20	2132	28	Верхняя грань - виден керамзит, в верхней части оголен заполнитель-наличие расслоения <u>мало цем. теста</u>
№4	358,8	487,9		597,9	147,8	1044	1,158	0,001	2063,0	27	2369	306	Поверхность боковых граней нормальная, на верхней грани немного виден керамзит <b>1-2</b>
№5	405,2	472,7		578,8	162,7	1044	1,185	0,034	2075,7	22	2122	46	Поверхность боковых граней нормальная, на верхней грани виден керамзит <b>2</b>
№6	448,5	541,4		551,7	176,5	1044	1,193	0,042	2089,7	21	2052	-38	Верхняя грань - виден керамзит, в верхней части оголен заполнитель-наличие расслоения <b>3</b>

Продолжение табл. 4.5

Шифр состава	Ц, кг	К, кг	Добавка	П, кг	В	$\rho_{ц.т.}$	Хт. t=15	мт.1 t=15	$\rho_p$	$\tau_0$	фуд	фуд - $\rho_p$	Оценка однородности смеси
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
№2.1	402,3	504,0	FRA-ME GIPER S- TBs 1,0	615,5	164,4	1135	1,129	-0,04	2092,9	34	2795	702	<u>Не хватает цем. теста</u>
№2.2	452,3	491,6		599,8	181,7	1135	1,162	0,000	2100,3	28	2490	389	<u>Не хватает цем. теста</u>
№2.3	502,6	473		577	198,1	1135	1,194	0,041	2104,3	22	2196	91	Небольшое водоотделение 2
№2.4	361,9	492,1		603,1	149	1044	1,159	0,001	2062,3	28	2422	360	<u>Не хватает цем. теста</u>
№2.5	407,3	475,2		581,9	163,5	1044	1,186	0,035	2074,1	23	2175	101	<u>Не хватает цем. теста</u>
№2.6	461,9	464,9		568,2	181,6	1044	1,214	0,072	2084,4	18	1918	-166	Небольшое водоотд., расслоение 3

Источник: [www.belniis.by](http://www.belniis.by)