

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БРЕСТСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
научно-педагогических кадров технических учебных заведений**

**ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ, СТРОИТЕЛЬСТВА  
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

**Сборник статей II Межвузовской Научно-технической Конференции**

**Часть 1**

**Брест 1998**

УДК 666.942:620.162

**Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений/ Сборник статей II Межвузовской Научно-технической Конференции. Под ред. Н.П.Блещика, В.В.Тура.– Брест: БПИ, 1998, в 2-х частях. Ч. 1. Стр. 247., с ил.**

В сборнике содержатся материалы II-го Межвузовского научно-методического семинара «Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений» (г.Брест, 21-22 апреля 1998 г).

Рассмотрен широкий круг вопросов в области технологии бетона, эффективных стеновых, изоляционных и отделочных материалов, фундаментостроения и дорожного строительства.

Сборник предназначен для инженерно-технических работников научно-исследовательских, проектных, строительных организаций, а также студентов, аспирантов и преподавателей ВУЗов.

*Рецензент:* академик БТА, д.т.н., профессор Т.М.Пецольт

## СОДЕРЖАНИЕ

Бабицкий В.В. Прогнозирование прочности бетона . . . . .	6
Батяновский Э.И. Эксплуатационные свойства бетона сухого формования . . . . .	9
Бейлина М.И., Титов М.Ю. Бетоны с компенсированной усадкой для полов промзданий . . . . .	13
Блещик Н.П. Коваль И.В. Физико-механические свойства бетона литьевого формования . . . . .	17
Блещик Н.П., Гучко Е.П., Мазуренок Г.В. Физико-механические свойства стеклофибробетона . . . . .	23
Блещик Н.П., Лазаренко О.В. Предпосылки к ускоренному определению морозостойкости бетона структурно-механическим методом . . . . .	30
Блещик Н.П., Рыскин М.Н. К вопросу о моделировании структуры и прочности цементного камня . . . . .	36
Блещик Н.П., Рыскин М.Н. Структурно-механическая модель и прочность цементного камня на сжатие . . . . .	44
Босаков В.С., Пойта П.С., Тарасевич А.Н. Расчёт плит на упругом основании с нагрузками в срединной плоскости . . . . .	51
Галузо Г.С., Артихович О.В. Исследование технологических параметров получения теплоизоляционного пеногипса на новых видах пенообразователей . . . . .	56
Данько Г.Я., Галузо О.Г., Чудук И.В. Технологические особенности изготовления теплоизоляционного пенополистиролгазогипса и его эксплуатационные свойства . . . . .	59
Довнар Н.И., Довнар В.Ф. Получение газобетонов без газообразующих добавок . . . . .	63
Дрозд А.А., Полейко Н.Л., Новик Г.Ф. Исследование возможности изготовления силикатоплимерного бетона на сырьевых материалах, производимых в Республике Беларусь . . . . .	67
Зайцев А.А. Глазурованные фосфатные материалы . . . . .	72
Зайцев А.А. Исследование глазурования материалов с цементной основой . . . . .	76
Зеленский А.М. Определение вертикальных смещений при реконструкции инженерных сооружений . . . . .	79

Никитин В.И. Оценка усадочных и температурных напряжений в пенопласте многослойных панелей . . . . .	167
Оленина Т.Г., Тамкович А.И. Утепление стеновых ограждений жилых и общественных зданий с применением монолитного пенополиуретана . . . . .	172
Осос Р.Ф., Полейко Н.Л. Коррозионное состояние арматуры в ячеистом бетоне . . . . .	176
Панченко А.И., Несветаев Г.В. Критерии оценки расширяющихся вяжущих и бетонов на их основе . . . . .	179
Пироговский К.Н. Влияние динамического фактора на фильтрационные и компрессионные свойства намывных грунтов . . . . .	190
Повидайко В.Г., Скачкова Г.Б. Теплоизоляционные газифофогипсовые плиты . . . . .	194
Полейко Н.Л., Осос Р.Ф. К вопросу об оборудовании для испытания бетона на морозостойкость . . . . .	198
Рак Н.А. Облегченные строповочные петли для подъема бетонных и железобетонных изделий . . . . .	200
Романюк В.Н., Ковалев Я.Н. Адаптация технологии производства асфальтобетонной смеси к новым энергетическим условиям . . . . .	205
Сеськов В.Е., Савинов А.Н. Упрочнение грунтов во времени под воздействием нагрузки от зданий и сооружений . . . . .	209
Синякина Н.В. Выбор схемы оптимальных измерений высоты сооружения . . . . .	215
Ступень Н.С., Шевченко Б.С. Зависимость прочности и водостойкости магнезиального цемента от способов уплотнения формовочных смесей . . . . .	219
Сушкевич А.С., Тулунов И.И. Технология неавтоклавного пенобетона . . . . .	224
Тур В.В. О едином методическом подходе при оценке собственных напряжений в бетоне на основе напрягающего цемента . . . . .	228
Тур В.В., Кондратчик А.А., Марчук В.А. Новая технология изготовления про-странственных конструкций . . . . .	233
Харитонович А.В., Проровский А.Г. Организация трансфера технологий в сфере строительства на примере деятельности центра трансфера технологий Брестского политехнического института . . . . .	238
Черноиван В.Н., Плосконосов В.Н., Ивасюк Ю.П. Исследование технологических параметров теплоизоляционной смеси на основе древесных отходов и минеральных вяжущих . . . . .	244

Золотухин Ю. Д., Редок В.Н., Родиц О.А., Осмоловская М.Г. Прочностные и деформативные характеристики стеновых панелей для жилых зданий . . . . .	83
Иванов В.А. Исследование исходных компонентов бумажного сотового заполнителя . . . . .	86
Кашевская Е.В. Достоинства технологий регенерации асфальтобетонных покрытий и их использования . . . . .	91
Ковалев Я.Н., Веренько В.А. Проблемы получения дорожных бетонов на основе вяжущего из термодинамически несовместимых компонентов	96
Ковалев Я.Н., Радьков Н.В. Получение складуемых эмульсионно-минеральных смесей на активизируемых битумных эмульсиях . . . . .	100
Коваль И.В. Особенности бетонирования монолитных конструкций литьевыми смесями модифицированными комплексными добавками . . .	103
Ковшар С.Н. Применение коэффициентов переноса влаги для оценки морозостойкости бетона . . . . .	107
Колесников Н.А. Напряженное состояние в железобетонном элементе с учетом ползучести бетона при повторной нагрузке . . . . .	111
Красулина Л.В., Потапова И.Л. Ячеистый бетон на основе фосфогипса .	116
Кудрявцев И.А., Антохов С.И. Принципы построения многофакторных моделей в задаче оценки физического износа фундаментов зданий и сооружений . . . . .	120
Лаптик Н.Н., Сысоева Л.В. Получение нейтрализованного фосфогипса-полуфабриката . . . . .	125
Леонович И.И., Богданович С.В. Проблемы строительства и эксплуатации дорожных цементобетонных покрытий . . . . .	130
Леонович С.Н. Исследование разрушения и трещиностойкости высокопрочного вибропрессованного бетона . . . . .	137
Леонович С.Н., Гузев Е.Н. Анализ результатов экспериментальных исследований параметров трещиностойкости бетона . . . . .	141
Марковский М.Ф., Шпак С.В., Бурсов Н.Г. Капитонов С.В. Современные технологии опалубочной техники при строительстве монолитных и сборно-монолитных каркасных зданий . . . . .	153
Никитенко М.И., Повколос К.Э., Попов О.В., Протасов Г.Н. Усиление фундаментов костела св. Петра и Павла в Шклове . . . . .	164

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

В.В.Бабицкий

Факультет дорожного строительства, БГПА

г.Минск, Беларусь

Предложена аналитическая зависимость, позволяющая прогнозировать прочность бетона на различных стадиях его твердения.

Ключевые слова: прогнозирование, прочность бетона.

Общее развитие технологии бетона, накопленный экспериментальный материал убеждают исследователей в реальности и своевременности разработки обобщенной математической модели изменения структуры и основных физико-механических характеристик бетона во времени. Это важно как на стадии производства, так и в процессе эксплуатации конструкций.

Нетрудно предположить, что грядущие дальнейшие ограничения в затратах энергоносителей на производство единицы продукции и повлечет за собой интенсивное внедрение низкотемпературных режимов тепловой обработки, а в ряде случаев вообще к отказу от нее. Соответственно, это вызывает острую необходимость в корректном прогнозе прочностных характеристик бетона, "дозревающего" не в сравнительно стационарных (тепловой агрегат), а в изменяющихся температурно-влажностных условиях.

То есть, должна быть создана приемлемая общепринятая математическая модель твердения бетона, учитывающая как внешние (в первую очередь температуру и влажность окружающей среды), так и внутренние (водоцементное отношение, расход и активность цемента и др.) влияющие факторы.

Можно задаться вопросом - обеспечивают ли широко используемые в настоящее время многочисленные аналитические зависимости возможность прогнозирования прочности бетона не в какой-то определенный срок (традиционно 28 суток), а во времени? На наш взгляд, на данный вопрос вряд ли можно ответить утвердительно, поскольку в них отсутствует элемент, изменяющийся в процессе твердения бетона. Круг основных влияющих факторов в таких формулах ограничен активностью цемента, водоцементным отношением бетонной смеси и теми либо иными постоянными коэффициентами. Нетрудно убедиться в том, что все перечисленные факторы от времени никоим образом не зависят.

Однако существуют и иные модели, не столь популяризируемые, которые связывают прочность бетона с изменяющейся структурой цементного камня,

отражаемой в первую очередь степенью гидратации цемента (работы Т.Пауэрса, А.Е.Шейкина, И.В.Вольфа, В.В.Бабкова др.). К сожалению, предлагаемые ими аналитические зависимости по ряду причин не были доведены до широкого практического использования. Вместе с тем, на наш взгляд, именно такого типа модели имеют реальное будущее. В них присутствует такой динамичный, поддающийся прогнозу параметр, как степень гидратации цемента, величина которого зависит как от внутренних, так и внешних факторов.

В развитие данной модели автор предлагает еще одну аналитическую зависимость для расчета прочности бетона

$$R_b = K_z K_{ц1} R_{ц} \{ K_{ц2} / (1 + [ \frac{V}{Ц} \frac{\rho_{ц}}{\rho_{ж}} ]^{\alpha} )^{\beta} \}^{\eta}, \text{ МПа}$$

где  $K_z$  - коэффициент, зависящий от свойств мелкого и крупного заполнителей;

$K_{ц1}$ ,  $K_{ц2}$  - коэффициенты, зависящие от вида, нормальной плотности и особенностей кинетики гидратации цемента;

$R_{ц}$  - активность цемента, МПа;

$(V/Ц)^{\beta}$  - водоцементное отношение бетонной смеси;

$\rho_{ц}$ ,  $\rho_{ж}$  - плотность цемента и воды соответственно, кг/м куб;

$\alpha$  - степень гидратации цемента, доли единицы;

$\eta$  - коэффициент, зависящий от объемной доли цементного камня в бетоне.

Все факторы, входящие в данное выражение, имеют ясный физический смысл и легко учитываются на стадии подбора состава бетона. При первом рассмотрении сложным представляется учет величины степени гидратации цемента. В большинстве ранее предложенных зависимостей эта величина бралась постоянной - например, равной 0,7 (или соответственно 16 % химически связанной воды). На самом деле степень гидратации - это наиболее универсальный динамичный влияющий фактор, зависящий от водоцементного отношения бетонной смеси, вида цемента, вида и количества введенных химических добавок, температуры среды, ее влажности и многих других параметров.

Для выявления кинетики гидратационных процессов анализировались литературные источники (достаточно многочисленные, однако практически

не систематизированные), а также были поставлены целенаправленные эксперименты.

Например, для портландцемента Волковысского завода получены следующие значения степени гидратации цемента (в % от полной) в зависимости от начального водосодержания цементного теста (температура твердения 20 град С).

Условия твердения	Степень гидратации цемента в возрасте 28 суток при водоцементном отношении теста						
	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50	0,60
Водные	52,0	62,5	70,5	74,0	75,0	75,5	76,0
Нормально-влажностные	49,5	58,0	65,0	68,5	69,0	69,5	70,0

Анализируя приведенные в таблице данные, нетрудно убедиться во взаимосвязи полноты гидратационных процессов цемента с водоцементным отношением теста. Так, до значения В/Ц, равного 0,35...0,40, степень гидратации цемента достаточно интенсивно нарастает с увеличением начального водосодержания цементного теста. При дальнейшем же увеличении В/Ц теста степень гидратации цемента практически не изменяется. Качественно эта зависимость коррелируется с полученной Т.Пауэрсом, но количественно несколько отлична от последней.

Аналогичные данные получены для иных цементов, причем с учетом таких факторов, как продолжительность и температурно-влажностные условия твердения, вид и количество химических добавок и др.

Накопленный материал, анализ литературных источников оказывают правильность такого пути. Рассчитанные по приведенной аналитической зависимости величины прочности бетона вполне приемлемы и сопоставимы с реальными.

Таким образом, предлагается аналитическая зависимость, логично описывающая изменение прочности бетона в связи с внутренними и внешними влияющими параметрами. Кроме того, выбор кинетики гидратационных процессов как первоосновы, позволяет прогнозировать не только прочность бетона, но также проницаемость, морозо- и коррозионную стойкость. Нами предпринята попытка реализовать открывающиеся возможности. В результате получена обобщающая модель кинетики твердения бетона, учитывающая достаточно ши-

рокий спектр как свойств самого бетона так и влияющих факторов. Модель дает вполне приемлемые практические результаты и положена в основу вычислительного комплекса "Технолог".

## ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНА СУХОГО ФОРМОВАНИЯ

Э.И.Батяновский

Факультет дорожного строительства, БГПА

Минск, Беларусь

Изложены результаты исследований эксплуатационных свойств цементного бетона сухого формования, показана связь долговечности с плотностью структуры материала, обоснована возможность обеспечения морозостойкости бетона на уровне "F1000".

Ключевые слова: Сухая бетонная смесь, бетон сухого формования, плотность, непроницаемость, долговечность.

Долговечность строительных изделий и конструкций из тяжелого цементного бетона обусловлена плотностью структуры цементного камня, ее непроницаемостью, которая зависит от размеров пор, их вида и количества (объема). Целенаправленное формирование структуры цементного камня, способной обеспечить повышенные эксплуатационные характеристики бетона, может быть реализовано при формировании вибрированием с пригрузом сухой бетонной смеси, ее влагонасыщении водой под давлением с повторным виброуплотнением после увлажнения [1].

В экспериментах, результаты которых представлены в таблицах 1,2 и 3, сравнивали два варианта формирования образцов бетона, отличавшихся наличием или отсутствием повторного вибровоздействия в течение 60с на бетон после водонасыщения сухой смеси под давлением в 0,3 МПа. Бетон характеризовался составом: цемент ~ 360 кг (ПЩ М400-Д15;  $R_{ц} \sim 36-38$  МПа;  $K_{ц} = 0,27$ ;  $\rho_{ц} \sim 3100$  кг/м<sup>3</sup>), щебень гранитный ~ 1250 кг (крупность 5-20мм; прочность по дробимости 80 МПа); песок природный крупнозернистый ~ 810 кг. Во всех случаях образцы бетона изготавливали при вибрировании со стандартными параметрами ( $A \sim 0,5$  мм;  $f \sim 50$  Гц) под пригрузом 0,025 МПа ; условия твердения до начала испытаний - нормально-влажные.

Методики экспериментов по определению стандартизированных характеристик бетона приняты в соответствии с действующими ГОСТ. Защитная способность бетона по отношению к стальной арматуре и коэффициент диффузии хлорид-иона определены по методикам, на базе источника [2], а водо- и коррозионная стойкость в сульфатной среде по данным [3]. Отличие в последнем случае состояло в ужесточении условий эксперимента: температура сушки образцов бетона равнялась 80-85°C и их без охлаждения помещали в жидкость для насыщения ( $t \sim 15-20^\circ\text{C}$ ), подвергая дополнительному деструктивному воздействию градиента температуры.

Таблица 1

## Сравнительные характеристики

N п/п	Характеристики бетона	Размер- ность	Способ уплотнения	
			разовое	повторное
1.	Водопоглощение по массе:			
	- ГОСТ	%	2,6	1,4
	- вакуум	%	3,8	1,8
2.	Водопоглощение по объе- му			
	-ГОСТ	%	6,4	3,5
	- вакуум	%	9,8	4,4
3.	Водонепроницаемость	МПа	0,4	2,0*
4.	Коэффициент диффузии хлорид-иона	см <sup>2</sup> /с	$2 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-10}$
5.	Плотность тока (i) при $\varphi=300\text{мВ}$ :			
	- при разовом насыщении "KCL"	мкА/см <sup>2</sup>	4,5	2,5
	- после 20 циклов "KCL"	мкА/см <sup>2</sup>	коррозия арматуры	7,5
6.	Скорость ультразвука	км/с	4,6	5,0÷5,15
7.	Морозостойкость(1-ый ме- тод)	цикл	400	1000

\* Образцы пропитались на 30-35 мм.

Анализ результатов экспериментов однозначно свидетельствует о глубоких изменениях в структуре цементного камня повторно вибрированного бетона. Детализируя означенный эффект следует отметить, что внешние проявления его незначительны. Так, уменьшение объема бетона не превышает 1% и сопровождается отжатием (при температуре бетона ниже 25°C) 2-4% воды, что спо-

сопутствует изменению (В/Ц) на  $0,01 \div 0,02$ . Вместе с тем, повторное вибровоздействие, обеспечивая ликвидацию направленной пористости (как результата фильтрации жидкости под давлением), одновременно интенсифицирует формирование коагуляционной структуры в системе "цемент-вода", способствуя упорядочению и увеличению числа и энергии связи между сольватированными зернами (флокулами) вяжущего. Отражением этого процесса является рост прочности свежееотформованного бетона с  $0,4-0,6$  МПа до  $1,5-2,0$  МПа после повторного виброуплотнения. При этом эффективность воздействия возрастает с увеличением продолжительности вибрирования (в эксперименте от 0 до 8 мин), обеспечивая рост прочности бетона через 24ч до 80-85%, а к 28 сут - на 25-55% и сохраняется во времени (в экспериментах не менее 3 лет). Последнее является следствием процесса активизации вяжущих свойств цемента на основе его дефлокуляции, что подтверждает контракция объема системы "цемент-вода", составляющая по расчету 4-6% в результате повторного вибровоздействия.

Таблица 2

## Исследования морозостойкости

Количество циклов замор. (-18°C) оттаив (вода)	Прочность бетона при сжатии, МПа:				Изменение $R_c$ , %, относительно:			
	основные образцы		нормально-влажн. тверд.		"R <sub>28</sub> "		эквивалентного возраста	
	разовое	повторное	разовое	повторное	разовое	повторное	разовое	повторное
0	60,0	75,0	60,0	75,0	-	-	-	-
200	61,5	-	64,0	-	+2,5	-	-5,7	-
300	60,0	84,5	66,0	80,0	0	+12,7	-9,1	+5,3
400	57,5	85,7	68,0	82,0	-4,2	+14,3	-16,9	+4,4
500	-	82,5	-	83,5	-	+10,0	-	-1,2
600	-	82,5	-	84,5	-	+10,0	-	-2,4
750	-	82,0	-	85,5	-	+9,3	-	-4,1
1000	-	79,5	-	87,0	-	+6,4	-	-8,6

Оценка количественных характеристик порового пространства цементного камня повторно вибрированного бетона позволяет сделать вывод, что объем его капиллярных пор к 28 сут твердения соответствует ~15-19%. Их точная качественная характеристика (диапазон условного радиуса сечения) является предме

## Исследования коррозионной стойкости

Испытательная среда	Количество циклов увлажнения-высушив.	Прочность бетона при сжатии, МПа, (скорость ультразвука, км/с)			
		разовое вибрирование	повторное вибрирование	повторное и 1% CaCl <sub>2</sub>	повторное и 1% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Вода	0	61,5(4,5)	73,6(4,9)	77,8(4,99)	75,4(4,94)
то же	30	60,8	72,5	77,0	74,8
"-	50	57,6	72,0	75,7	73,6
"-	70	55,8	70,0	73,8	71,8
"-	90	50,0	66,3	70,2	67,0
Раствор Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	30	51,7(4,45)	69,8(4,89)	75,0(4,99)	72,6(4,93)
(C <sub>p</sub> ≤ 15%)	50	40,0(4,35)	62,5(4,8)	67,1(4,96)	63,8(4,89)
то же	70	27,6(4,06)	52,8(4,66)	56,4(4,88)	54,7(4,77)
"-	90	-	39,5(4,43)	45,8(4,74)	40,2(4,6)

том дальнейших научных исследований. На основании приведенных данных (например, по водонепроницаемости бетона (образцов) при выдержке 48ч под давлением 2,0 МПа) можно сделать вывод о перекрытии сечения капилляров адсорбционными слоями жидкости, обладающими способностью сопротивляться сдвиговым усилиям. В результате затрудняется диффузия вглубь бетона жидкости и агрессивных реагентов, повышается его долговечность, что подтверждают исследования морозо-, водо- и коррозионной стойкости бетона, защитной способности его по отношению к стальной арматуре. Данные табл. 2 об опережающем росте прочности основных образцов бетона до 400 циклов попеременного замораживания-оттаивания, в сравнении с твердевшими в нормально-влажностных условиях, являются отражением сложного сочетания двух взаимоисключающих процессов: деструкции и образования новых фаз, в результате специфично развивающейся гидратации цемента под влиянием знакопеременной температуры. Означенный эффект возможен при отсутствии в системе жидкой фазы со свойствами, присущими "свободной воде". Расчеты и приведенные экспериментальные данные свидетельствуют об аномальных свойствах жидкости в бетоне с повторным вибрированием, присущих как адсорбционным ее слоям, так и насыщенным растворам - квазиэлектролитам. В целом, представленная совокупность свойств бетона сухого формирования свидетельствует о достаточно высокой степени гарантии его эксплуатационной долговечности.

### Литература

- 1.Ахвердов И.Н., Батыновский Э.И. А.с. 846271. Способ изготовления бетонных и железобетонных изделий. СССР.
- 2.Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н. и др. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. Стройиздат.
- 3.Лещинский М.Ю. Испытание бетона. Стройиздат.

## **БЕТОНЫ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ УСАДКОЙ ДЛЯ ПОЛОВ ПРОМЗДАНИЙ**

М.И. Бейлина, М.Ю.Титов

НИИЖБ

г. Москва, Россия

Приводятся характеристики бетонов с компенсированной усадкой, полученные с использованием напрягающего цемента или смеси портландцемента с расширяющей добавкой. Такие бетоны применяются для воздействия водонепроницаемых и трещиностойких покрытий полов промышленных зданий.

Ключевые слова: бетон с компенсированной усадкой, этtringит, водонепроницаемость, морозостойкость, гидроизоляция.

Получение бетона высокой плотности, прочности и долговечности одна из важнейших задач в современном строительстве. Это стало возможным благодаря разработке и промышленному освоению в нашей стране бетона с компенсированной усадкой.

Компенсация усадки в бетоне может обеспечиваться как применением напрягающего цемента заводского изготовления, так и при использовании портландцемента и расширяющих добавок прямо на строительной площадке.

Напрягающий цемент (НЦ) получается совместным помолом портландцементного клинкера, алуминатного компонента и гипсового камня. Имея в своей основе портландцемент, напрягающий цемент не только обладает всеми его положительными свойствами, но и имеет ряд отличительных особенностей - частичная компенсация усадочных явлений, повышенная прочность и предельная деформативность при растяжении, высокая, а для большинства сооружений на его основе практически полная водонепроницаемость и стойкость к различным видам воздействий.

Несмотря на эти ценные дополнительные свойства НЦ по отношению к портландцементу, он не нашел у нас в стране широкого применения. В то же время за рубежом, например в США и Японии, цементы, аналогичные отечественному НЦ, применяются в более широком объеме, хотя впервые разработка, исследование и применение в строительстве этого вяжущего были осуществлены у нас в стране.

В отличие от отечественного НЦ, за рубежом на заводах выпускается, главным образом, расширяющие добавки (РД), которые добавляются к портландцементу непосредственно на объектах его применения. Расширяющие добавки, выпускаемые за рубежом, различны по своему составу, процент ее введения - небольшой, что требует высокой культуры производства и особо точное дозирующее и смесительное оборудование. Кроме того, технология их производства трудоемка, энергоемка, с проведением высокотемпературных обжигов, поэтому такие добавки дефицитны и их стоимость высока.

В нашей стране аналогичные добавки выпускаются пока в небольшом количестве. В то же время имеются огромные запасы крупнотоннажных отходов и природных материалов, которые могут рассматриваться как долговременный источник сырья для производства добавок, решая одновременно экологические и экономические задачи.

Такие добавки из крупнотоннажных отходов различных производств разработаны сотрудниками НИИЖБ, нашли применение в бетонах с компенсированной усадкой и с успехом используются для возведения трещиностойких водонепроницаемых покрытий пола промышленных зданий.

С целью оценки механизма процессов свободных и связанных деформаций цементного камня в бетонах с компенсированной усадкой проведены комплексные физико-химические исследования портландцемента М400 ДО, напрягающего цемента и вяжущего, полученного механическим перемешиванием портландцемента и расширяющей добавки алюминатно-сульфатного типа.

В намеченные сроки исследования - 1,3 час, 1,7 и 28 сут. - отбирались пробы. Образец дробился, промывался спиртом с целью прекращения гидратации, а затем высушивался под 50%-ным раствором серной кислоты в эксикаторе при 35%-ной относительной влажности воздуха. Такой вид сушки выбран на основании адсорбционных исследований чистого этрингита, так как известно, что этрингит очень чувствителен к изменению влажностных и температурных условий.

Кинетика связывания гипса и количество образовавшегося этtringита при твердении определялись химическим анализом по методике Т.И.Розенберг.

Определение несвязанного (свободного) гипса проводилось растворением в специально приготовленном растворе, содержащем 0,1 г/л СаО и 0,05 г/л гидросульфоаломината кальция. В таком растворе несвязанный гипс полностью растворяется в течение 3-5 мин, этtringит же остается нерастворимым. Общее количество гипса определялось весовым методом.

Полученные результаты представлены в табл.1.

Таблица 1

Кинетика связывания воды SO<sub>3</sub> и кристаллизации этtringита

Вид вяжущего в бетоне	Возраст, сут.	Содержание связанной воды, %	Содержание несвязанного SO <sub>3</sub> (непрокаленное в-во), %	Содержание, %	
				связанного SO <sub>3</sub>	этtringита
1	2	3	4	5	6
ПЦ	сухая смесь	1.35	2.22	—	—
	1 сут.	10.56	1.00	1.22	6.38
	28 сут.	15.81	0.42	1.80	9.41
НЦ	сухая смесь	2.20	3.90	—	—
	1 ч.	5.37	2.52	1.30	7.21
	3 ч.	5.41	2.41	1.30	7.84
	1 сут.	8.80	1.83	1.53	10.98
	7 сут.	14.16	0.29	3.60	18.82
	28 сут.	17.67	0.20	3.65	19.35
ПЦ+РД	сухая смесь	2.10	3.73	—	—
	1 ч.	5.60	2.12	1.61	8.42
	3 ч.	5.75	2.10	1.63	8.57
	1 сут.	9.80	1.22	2.51	13.1
	7 сут.	14.75	0.33	3.40	17.81
	28 сут.	17.76	--	3.70	19.51

Как видно из анализа представленных данных в цементном камне бетона с компенсированной усадкой процесс связывания воды, SO<sub>3</sub> и образования этtringита начинается сразу после затворения водой и через час твердения составляет 7-8%, а в возрасте 7 суток гипс почти полностью связывается. В то же

время аналогичные образцы из портландцемента к 28-ми суткам образуют почти в 2 раза меньше этtringита. Большое количество образовавшегося этtringита связано с расширением и уплотнением структуры цементного камня у напрягающего цемента и вяжущего, полученного смешением портландцемента и расширяющей добавки, что гарантирует получение плотного и прочного бетона.

Исследование основных эксплуатационных характеристик бетонов марки М400 (В30) с осадкой конуса 4-6 см представлены в табл.2.

Таблица 2

Эксплуатационные характеристики бетонов с компенсированной усадкой

Вид вяжущего в бетоне	Состав бетона		Морозостойкость (к-во циклов)	Прочность кгс/м <sup>2</sup> сжатия/ изгиб	Водонепроницаемость	
	расход вяжущего кг/м <sup>3</sup>	Ц/В			W <sub>вт</sub>	глубина проникновения, мм
ПЦ	436	1.99	270	370 / 63	7	9.5-10
	550	2.53	350	430 / 68.5	8	8.7
НЦ	450	2.31	300	485 / 63.7	12	1.0-2.5
	553	2.47	500	650 / 78.7	16	1-2.7
ПЦ+РД	435	2.00	300	507 / 71.3	12	2.5-3.0
	540	2.35	500	615 / 79.3	16	1.5-2.0

Как видно из анализа представленных в таблице результатов, применение в качестве вяжущего в бетонах НЦ и смеси ПЦ и РД обеспечивают получение более прочных бетонов с повышенными показателями по морозостойкости и водонепроницаемости. Это позволяет рекомендовать применение бетонов с компенсированной усадкой для возведения конструкций, работающих в различных агрессивных средах, в частности, в полах мясоперерабатывающей промышленности.

Полученные результаты по физико-механическим показателям бетонов с компенсированной усадкой с успехом были использованы при возведении покрытий пола из данного бетона.

Конструктивными особенностями полов из бетонов с компенсированной усадкой являются:

- повышенная трещиностойкость, создающаяся за счет самоуплотнения при ограничении деформации расширения;

- обеспечение повышенной прочности по сравнению с бетоном на поргландцементе в элементах пола при снижении расхода поргландцемента;
- возможность увеличения расстояния между деформационными швами и сокращения их количества;
- совмещение в одном элементе конструкции функций гидроизоляционного, чистого пола и подстилающего слоя.

Все приведенные физико-механические показатели разработанных составов соответствовали требованиям, предъявляемым к полам.

В лаборатории НИИЖБ Госстроя РФ разработаны различные типы полов: вибровакуумные, декоративные и др., разработаны составы бетонов, конструктивные решения полов, осуществлялся авторский надзор за производством работ.

Полы из бетона с компенсированной усадкой успешно эксплуатируются на предприятиях мясоперерабатывающей промышленности, таких как мясокомбинаты: "КампоМос", "Микомс", Лианозовский, "Вел-ком", учебный центр Мосмясопрома и др.

#### Литература

1. Звездов А.И., Будагянц Л.И., Титова Л.А. регулируемое расширение бетона - реальный путь повышения эффективности железобетонных конструкций. М., Стройиздат, журнал "Бетон и железобетон", N5, 1997.
2. Далматов В.Я., Ким И.П., Фиговский О.Л. и др. Полы промышленных зданий. М., Стройиздат, 1978.

### **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА ЛИТЬЕВОГО ФОРМОВАНИЯ**

И.П.Блещик

Строительный факультет, БГПА

г. Минск, Беларусь

И.В.Коваль

Строительный факультет, ПГУ

г. Новополоцк, Беларусь

В статье изложены особенности проектирования композиций литых бетонных смесей влияющие на физико-механические свойства бетона.

Ключевые слова: литые бетоны, водоцементное отношение, тип цементных систем, влияние водосодержания, пористость, прочность, морозостойкость.

В течении ряда лет авторами проводились исследования физико-механических свойств бетонов литового формирования: прочности на сжатие  $R_{сж}$ , плотности- $\rho$ , морозостойкости- $F$ .

Проектируя состав бетона литового формирования необходимо обеспечить при заданной проектной прочности требуемую подвижность (удобоформуемость) смеси. Решение данной задачи должно осуществляться с учетом границ максимальной водоудерживающей способности цементных систем.

В работах многих авторов / 3, 4, 5 / подробно исследовались критерии максимального водосодержания цементных систем. По результатам их работ были установлены границы *максимальной водоудерживающей способности* цементов. Также принято условное деление цементных систем по типам в зависимости от количества содержащейся в них воды. То есть на системы, не содержащие *свободную* воду (*первый тип*), содержащие ее незначительное количество, и системы, в которых количество свободной (несвязанной) воды достаточно велико (*второй и третий тип цементной системы*). Использование систем третьего типа нежелательно из-за возникновения в них интенсивных седиментационных процессов. В этой связи целесообразно использовать лишь те литые бетонные смеси, в которых соблюдается следующее условие:

$$X_{Т.М} < X_{Т.М.М.М} \quad , \quad (1)$$

где  $X_{Т.М}$ ,  $X_{Т.М.М.М}$  - относительное и максимальное водосодержание модифицированной бетонной смеси / 5 /.

Литые бетонные смеси должны проектироваться с учетом *первого* и *второго* типа цементных систем при соблюдении минимально возможного, из условия подвижности, водоцементного соотношения. Основная масса литых бетонных смесей, модифицированных добавками-суперпластификаторами, имеет водоцементное соотношение в пределах 0,4...0,7. При этом, для условий зимнего беспрогревного бетонирования водоцементное отношение не должно превышать 0,6. Указанные пределы позволят обеспечить прочностные показатели при сохранении необходимой подвижности на этапе укладки бетонной смеси. При этом следует учитывать пластифицирующий эффект от различных видов добавок, пу-

тем использования коэффициента пластификации -  $K_{пл}$ , методика определения которого приведена в / 6 /. Также следует учитывать то, что небольшое расчетное количество цемента для бетонов марок ниже М 200 во многих случаях вызывает не выполнение условия ( 1 ), и кроме того, большинство пластифицирующих добавок обеспечивают меньший эффект в тощих смесях. Следовательно, нежелательно использование для целей литевой технологии бетонов с проектными марками ниже М 200 (особенно для зимних условий из-за повышенных значений В/Ц в таких смесях).

*Минералогический* состав цемента также оказывает существенное влияние на *прочностные* свойства и характер *кинетики* набора прочности в бетонах литьевого формирования. Цемент, входящий в состав композиции, должен иметь хорошие характеристики по кинетике набора прочности в естественных условиях твердения. Это требование связано с *основным* характером применения литевых бетонов в строительстве. Следовательно, *степень алюминатности* цемента, применяемого в литевых смесях (средняя, высокая, низкая) должна быть адекватной условиям использования, а величина его удельной поверхности по возможности более высокой ( в пределах от 2900 до 4000  $см^2/кг$ ). В этом случае можно достигнуть расчетных прочностных показателей.

Плотность литевой бетонной смеси, в случае предъявления повышенных требований к водонепроницаемости, может быть достигнута за счет снижения пористости. Одним из путей снижения пористости цементного камня является уменьшение воздухоовлечения. Литевые бетонные смеси могут содержать от 2 до 10 % вовлеченного воздуха, что может существенно снизить прочностные свойства бетонов литьевого формирования. Ограничение данного явления возможно с помощью правильного проектирования величины  $n$  - соотношения масс смеси крупного и мелкого заполнителей, а также с помощью изменения режимов приготовления смеси, или путем введения специальных добавок. В связи с этим, для литевых бетонных смесей рекомендуется некоторое увеличение содержания мелкого заполнителя ( песка) в целях ограничения процессов расслоения. Современные добавки суперпластификаторы (С-3, СПС) имеют различную адсорбционную способность и поэтому бетонные смеси, изготовленные с их применением, могут иметь существенные отличия по количеству содержащегося в них воздуха.

Ниже в таблицах № 1, 2 представлены составы и результаты исследований прочностных свойств литевых бетонных смесей, модифицированных добавкой суперпластификатором С-3.

Анализируя данные таблиц № 1, 2 можно отметить, что прочность бетонов литевого формирования достигает расчетных показателей по критерию проектного  $R_{сж}$  (МПа) в составах № 2, 3, 5. Отмечается недобор прочности в составах № 1, 4. При этом значения В/Ц для состава № 1, 4 составили 0,61 и 0,62, в тоже время, как в других составах В/Ц составило в среднем 0,445.

Таблица 1

Составы литевых бетонных смесей принятые для исследования прочностных свойств

№ состава	Расход материалов кг / м <sup>3</sup>					Факторы водосодержания смеси		Осадка конуса Фактическая (см.)
	Ц	П	Щ	В	С-3*	Относительное $X_{т.м}$	Максимальное $X_{т.мах}$	
1	314	832	985	192	1,88	1,87	1,67	23
2	385	824	976	175	2,31	1,52	1,67	19
3	375	827	978	178	2,99	1,59	1,67	22
4	323	821	971	199	1,94	1,904	1,68	23
5	422	808	957	177	2,53	1,46	1,67	20

*Примечание:* \* - В указанных составах расход добавки С-3 был взят в количестве 0,6 % от массы цемента ПЦ 500 Д-0 (Кн.г. м= 0,205). В составе № 3 расход 0,8 % на ПЦ 500 Д-20 с Кн.г.м = 0,225

Таблица 2

Кинетика набора прочности бетона литевого формирования

№ состава	Прочность на сжатие $R_{сж}$ (МПа) в возрасте (суток) при естественном твердении			Проектная прочность на сжатие $R_b$ МПа	Отклонения прочности от расчетной %
	7	14	28		
1	17,7	21,6	27,2	30	- 9,43
2	26,7	31,0	41,2	40	3,07
3	27,2	35,0	39,0	35	11,28
4	17,5	20,7	28,1	30	-6,26
5	33,6	42,1	48,3	45	7,24

Недобор прочности в бетонах составов 1 и 4 вызван повышенной расслаиваемостью бетонных смесей. Расслаиваемость обусловлена наличием

большого количества свободной воды. Факт перехода расчетных композиций из одного типа в другой можно установить по показателям относительного и максимального водосодержания цементного теста. Так в смеси состава № 1 показатель  $X_{т.м} = 1,87 > X_{т.макс.м} = 1,67$  и в составе № 4  $X_{т.м} = 1,904 > X_{т.макс.м} = 1,68$ , что является не допустимым по условию (1).

В целях установления параметров морозостойкости литевых бетонных смесей были проведены исследования по третьему методу, в соответствии с ГОСТ 100.60-87, результаты которых представлены в таблицах № 3, 4. Для изготовления составов использовался бездобавочный цемент ПЦ 500Д-О.

Таблица 3

Составы бетонов литьевого формования,  
принятые для исследования морозостойкости

№ п/п	Осадка конуса (см)	Расчетная марка (Мпа)	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>				
			Ц	П	Щ	В	С-3
6	20	25	258	904	986	181	0,8 % от массы Ц
7	24	30	301	882	982	179	
8	22	35	334	867	989	171	
9	21	40	345	859	1031	167	

По результатам исследований установлено, что морозостойкость бетонов литьевого формования запроектированных составов изменялась от F100 до F200 и зависела, в основном, от водоцементного отношения. Снижение морозостойкости бетонов за счет увеличения водоцементного отношения в составах объясняется появлением менее плотной структуры цементного камня, а следовательно, увеличения количества капиллярных (в том числе открытых) пор, которые существенным образом обуславливают величину морозостойкости.

Таким образом снижение морозостойкости обусловлено изменением структуры цементного камня, вызываемым увеличением пористости и уменьшением плотности бетона.

В итоге можно отметить, что современная технология литьевого формования позволяет нам получать бетоны с требуемыми физико-механическими свойствами.

Результаты испытания морозостойкости

№	В/Ц	Предел прочности $R_{сж}$ контрольного образца (Мпа)	Предел прочности на сжатие образцов при количестве циклов испытаний 1...5, Мпа % процент прочности испытуемого образца по сравнению с контрольным					Морозостойкость по ГОСТ 10180-78 F, (циклов)
			1	2	3	4	5	
6	0,7	24,8	<u>24,5</u> 98,8	<u>24,2</u> 97,6	<u>20,8</u> 83,8	-	-	100
7	0,59	32,95	<u>32,45</u> 98,5	<u>32,0</u> 97,1	<u>31,3</u> 95	<u>25,1</u> 76	-	150
8	0,51	38,95	<u>38,4</u> 98,6	<u>38,2</u> 98,1	<u>37,9</u> 97,3	<u>37,4</u> 96	<u>31,0</u> 79,6	200
9	0,48	43,7	<u>43,3</u> 99	<u>42,8</u> 97,9	<u>42,5</u> 97	<u>42,0</u> 96	<u>38,4</u> 87,8	220

## Литература.

1. Ахвердов И.Н. Вопросы общей теории бетона в связи с его структурными и технологическими особенностями. Автореф. дисс. докт. техн. наук. - М., 1955.
2. Колокольников В.С. Технология бетонных и железобетонных изделий. - М., 1970.
3. Шмигальский В.Н. Подбор состава бетона с учетом пустотности и поверхности заполнителя. - Новосибирск., 1956.
4. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. - М., Стройиздат, 1981.
5. Блещик Н. П. Основы реологии и технологии пресс- вакуум- бетона. Автореф. дисс. докт. техн. наук, - М., 1988.
6. Рекомендации по определению составов обычного и пластифицированного бетонов с учетом условий тепловой обработки и данных статистического контроля прочности. ИСиА Госстроя БССР, - Минск, 1984.
7. Хяутин Ю.Г. Монолитный бетон. - М., Стройиздат, 1981.

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКЛОФИБРОБЕТОНА

Н.П.Блещик, Е.П.Гучко,  
строительный факультет, БГПА  
Г.В.Мазуренок

Лаборатория технологии модифицированного бетона, БелНИИС.  
Минск, Беларусь

В статье рассмотрены результаты исследований физико- механических свойств композиций бетона с различным содержанием стекловолокна. Получены расчетные модели, позволяющие прогнозировать прочностные характеристики в зависимости от состава и физико- механических свойств исходных компонентов.

Ключевые слова: стеклофибробетон, прочность при сжатии, прочность при растяжении, прочность при изгибе, модуль деформаций.

Одним из направлений в области повышения эффективности строительства является разработка и применение стеклофибробетонных конструкций.

Стеклофибробетон рекомендуется для конструкций, в которых наиболее эффективно могут использоваться его технические преимущества, а именно:

- повышенные прочность при растяжении и изгибе, трещиностойкость, ударная прочность, вязкость, износо-, морозо-, и огнестойкость ;
- возможность реализации эффективных конструктивных решений, например, тонкостенных конструкций без стержневой или сетчатой арматуры;
- возможность применения новых, более производительных приемов формирования армированных конструкций, например, пневмонабрызг, метод погиба свежесформованных листовых изделий, роликовое прессование и др. [1].

При выборе конструктивных решений учитываются методы изготовления, монтажа и условия эксплуатации конструкций. Формы и размеры элементов должны приниматься исходя из наиболее полного использования особенностей свойств стеклофибробетона, возможности механизированного и автоматизированного заводского изготовления, удобства транспортирования и монтажа конструкций.

Для расчета и конструирования тонкостенных стеклофибробетонных конструкций должны быть известны оптимальные композиции стеклофибробетона его прочностные и деформативные характеристики. В БелНИИС и БГПА были

проведены исследования по определению физико-механических свойств фибробетона, армированного щелочестойким стекловолокном.

Испытывались стандартные образцы из стеклофибробетона, с объемным содержанием фибры от 0,94 до 4,7 %, длиной от 12 до 60 мм. Составы образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Составы испытываемых образцов,  
дисперсно армированных стеклянной фиброй**

№ состава	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Цемент, кг/м <sup>3</sup>	1268	1268	1268	1268	1268	1268	1268	1268	1116	1624
Шлак, кг/м <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	152	-
Песок, кг/м <sup>3</sup>	634	634	634	634	634	634	634	634	634	-
Вода, кг/м <sup>3</sup>	374	374	374	374	408	408	374	374	374	476
С-3, кг/м <sup>3</sup>	6,34	6,34	6,34	6,34	9,51	9,51	6,34	6,34	6,34	11,37
ПВК, кг/м <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	16,74	-
Объемное содержание фибры, ρ, %	0	0,94*	1,88*	2,82*	3,76*	4,7*	2,82**	2,82***	2,82*	2,82*

Примечание: \* - длина фибры = 30 мм;  
 \*\* - длина фибры = 12 мм;  
 \*\*\* - длина фибры = 60 мм.

Образцы подвергались испытанию на осевое растяжение и сжатие, растяжение при изгибе, раскалывание.

Результаты исследования прочности стеклофибробетона представлены в таблице

## 2. Полученные данные позволили сделать следующие выводы.

Предельная прочность торкретбетона при сжатии - 48 МПа получена на образцах, изготовленных из раствора первого состава при отсутствии стеклянной фибры. При увеличении содержания фибры с 0,94 до 4,7 % по объему прочность стеклофибробетона постепенно снижается на 16,7 % по отношению к прочности неармированного бетона. Снижение прочности стеклофибробетона при сжатии может быть объяснено результатами исследований Михайла и сотрудников [ 2 ], которые установили, что введение волокна вызывает при одной и той же степени гидратации цемента увеличение пористости цементного камня. Кроме того, они предполагают, что волокна к тому же замедляют гидратацию цемента.

Таблица 2

## Прочностные характеристики стеклофибробетона.

№ состава	1	2	3	4	5	6
Процент армирования по объему	0	0,94	1,88	2,82	3,76	4,7
Прочность при сжатии, МПа	48,0	45,0	45,0	44,0	44,0	40,0
Призменная прочность, МПа	42,6	31,7	36,8	37,6	33,8	35,1
Коэффициент призменной прочности	0,89	0,88	0,82	0,85	0,77	0,88
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	1,77	4,8	6,6	9,55	11,45	11,98
Прочность на осевое растяжение по раскалыванию, МПа	1,33	3,32	3,89	6,87	7,06	7,32
Прочность на осевое растяжение по изгибу, МПа	1,02	2,74		5,58	6,64	6,95

Исследованиями установлено, что при прочих равных условиях наибольшая прочность стеклофибробетона отмечена у образцов, армированных фиброй длиной 30 мм. Увеличение длины фибры до 60 мм и уменьшение до 12 мм приводит к снижению прочности при сжатии примерно на 14%.

В результате математической обработки экспериментальных данных, полученных на образцах с длиной фибр 30 мм, зависимость прочности стеклофибробетона при сжатии представлена в следующем виде:

$$f_{ck,f} = (1 - 6,2 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_f) \cdot f_{ck}^* \quad (1)$$

где  $f_{ck}^*$  - прочность при сжатии неармированного бетона, по составу идентичного со стеклофибробетоном;

$\rho_f$  - объемное содержание фибры, %.

Коэффициент призменной прочности стеклофибробетона изменялся в пределах от 0,77 до 0,88. Среднее значение составило 0,84. Зависимости коэффициента призменной прочности от содержания стеклянной фибры не обнаружено.

Прочность на растяжение при изгибе стеклофибробетона увеличилась по отношению к неармированному бетону в 2,7...6,8 раза и составила 5,2...13,0 МПа. При длине фибр 30 мм растяжение при изгибе увеличивалось пропорцио-

нально с увеличением объемной концентрации фибр. При принятых составах раствора и характеристиках исходных компонентов линейная зависимость прочности на растяжение при изгибе представлена в следующем виде:

$$f_{ctk,i,f} = 2,6 + 2,34 \cdot \rho_f \quad (2)$$

Выражение (2) может быть использовано в интервале значений  $\rho_f = 0,94 \div 3,75$  %. С увеличением объемного содержания стеклянной фибры сверх 3,75% прочность стеклофибробетона на растяжение при изгибе увеличивается незначительно. Поэтому предельное содержание фибры следует принимать равным 3,75%.

Прочность стеклофибробетона при осевом растяжении определялась методом изгиба призм и косвенным методом при раскалывании кубов. Как следует из результатов, представленных в табл. 3, прочность на осевое растяжение, определенная по методу раскалывания, превышает прочность, определенную по методу изгиба, на  $1,2 \div 8,15$  %.

Это объясняется влиянием повышенной пластичности стеклофибробетона. Расхождение между прочностью на осевое растяжение, определенное двумя различными методами, может объясняться также неточным значением коэффициента в формуле пластического момента сопротивления образцов. В этой связи, за более достоверные значения прочности осевого растяжения следует принимать среднее значение, определенное по двум методам исследований.

Прочность на осевое растяжение стеклофибробетона определяется в зависимости от относительного объемного содержания фибры, коэффициентов, учитывающих вероятность отклонения направления усилий в фибрах от направления расчетной плоскости ( $\lambda_{op}$ ), вероятную анкеровку фибр ( $\lambda_{an}$ ), вероятность пересечения фибрами расчетной плоскости ( $\lambda_p$ ) [3-5]. Одним словом, дисперсное армирование посредством применения указанных коэффициентов приводится к направленному, а зависимость принимает вид:

$$f_{ctk,f} = \lambda_p \cdot \lambda_{op} \cdot \lambda_{an} \cdot \rho_f \cdot f_f \quad (3)$$

В результате математической обработки зависимости (3) для практического использования может быть использована следующая формула по определению нормативного сопротивления стеклофибробетона на осевое растяжение:

$$f_{ctk,f} = K_p^f \cdot f_{kf} \cdot \rho_f + f_{ctk} (1 - \rho_f) \quad (4)$$

Таблица 3

Сравнительные данные расчетных и опытных значений прочности  
стеклофибробетона при сжатии и осевом растяжении

Напряженное состояние	Характеристика	Номера составов								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Осевое растяжение	Расчет, МПа (формула 3)	-	3,08	4,59	5,75	6,73	7,5	5,69	5,75	4,54
	Опыт, $f_{ctk,os}$ , МПа	1,17	3,03	4,92	6,22	6,85	7,14	5,61	6,22	4,94
	$\frac{f_{ctk,f}}{f_{ctk,os}}$ ; %	-	1,63	-6,69	-7,6	-1,77	5,05	1,5	-7,6	-8,15
Сжатие	Расчет, МПа (формула 1)	48,0	45,11	43,92	43,0	42,23	41,55	43,0	43,0	43,0
	Опыт, $f_{ck,os}$ , МПа	48,0	45,0	45,0	44,0	44,0	40,0	37,7	44,0	37,8
	$\frac{f_{ck,f}}{f_{ck,os}}$ ; %	0	0,23	-2,9	-2,27	-4,02	3,87	14,06	-2,27	13,76

где  $f_{kf}$  - нормативное сопротивление растяжению фибровой арматуры;

$f_{ctk}$  - нормативное сопротивление неармированного бетона при осевом растяжении;

$K_p^f$  - коэффициент армирования стеклофибробетона при вычислении прочностных характеристик.

$$\text{Здесь} \quad K_p^f = 5,7 \cdot 10^{-2} - 44 \cdot \rho_f^{2,5} \quad (5)$$

Экспериментальные данные свидетельствуют о вполне удовлетворительной корреляции зависимостей (4) и (5) с расчетными данными.

Результаты исследований модулей упругих и общих деформаций, а также коэффициента Пуассона стеклофибробетона (отношение поперечных деформаций к продольным), представлены в таблице 4.

По результатам исследований зависимость начального модуля упругости представлена в виде закона смеси:

$$E_{cf} = K_p^E \cdot E_f \cdot \rho_f + E_{cm} \cdot (1 - \rho_f) \quad (6)$$

где  $K_{\rho}^k$  - коэффициент армирования стеклофибробетона при вычислении деформативных характеристик -  $K_{\rho}^E = 5 - 87,5(\rho_f - 0,01) \cdot 10^{-3}$ ;

$E_f$  - модуль упругости элементарной стеклянной нити;

$E_{cm}$  - начальный (секущий) модуль упругости неармированного мелкозернистого бетона.

Таблица 4

## Результаты исследований деформативных характеристик стеклофибробетона

№ составов	$R_{mp}$ , МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	$\frac{G}{R}$	Относит. деформат., $\varepsilon \cdot 10^{-5}$			Модуль деформаций $E \cdot 10^{-3}$ , МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	Модуль упругости $E_B \cdot 10^{-3}$ , МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	Коэффициент Пуассона $\nu = \frac{\varepsilon_{2y}}{\varepsilon_{1y}}$
			Продольные		Попереч-ные			
			полные $\varepsilon_l$	упругие $\varepsilon_{ly}$	Попереч-ные упругие, $\varepsilon_{2y}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	42.6 (435)	0.2	52	49	4.9	15.3(156)	16.2(165)	0.10
		0.3	75	71	9.9	16.3(166)	17.2(175)	0.14
		0.4	100	90	14.6	16.5(168)	18.3(187)	0.16
		0.5	127	113	23.2	16.3(166)	18.3(187)	0.21
2	39.7 (405)	0.2	37	35	4.4	19.8(202)	21.0(214)	0.13
		0.3	57	55	9.1	19.8(202)	20.6(210)	0.17
		0.4	80	73	14.5	19.1(195)	21.0(214)	0.20
		0.5	100	93	20.0	19.2(196)	20.7(211)	0.20
3	36.8 (375)	0.2	30	26	4.7	22.5(229)	25.9(264)	0.18
		0.3	52	47	9.3	20.0(204)	22.2(226)	0.20
		0.4	80	72	19.0	17.6(179)	19.5(199)	0.26
		0.5	103	92	28.0	17.3(176)	19.3(197)	0.30
		0.55	114	102	34.0	17.2(175)	19.2(196)	0.33
4	37.6 (383)	0.2	28	27	3.2	24.7(252)	25.6(261)	0.12
		0.3	46	43	6.7	23.1(236)	24.8(259)	0.16
		0.4	64	59	10.6	22.6(230)	24.4(249)	0.18
		0.5	84	74	15.4	21.7(221)	24.5(250)	0.21
5	33.8 (345)	0.2	27	26	1.7	23.0(235)	23.9(244)	0.065
		0.3	43	41	5.0	22.4(228)	23.4(239)	0.12
		0.4	61	56	8.4	21.3(217)	23.2(237)	0.15
		0.5	81	71	12.8	20.2(206)	23.0(235)	0.18
		0.6	-	86	17.6	-	22.8(233)	0.20
6	35.0 (358)	0.2	29	28	0.10	22.2(234)	22.9(234)	0.10
		0.3	47	44	0.15	22.6(230)	22.6(230)	0.15
		0.4	68	60	0.18	22.5(229)	22.5(229)	0.18
		0.5	89	76	0.20	22.3(227)	22.3(227)	0.20

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	33.6 (343)	0.2	28	27	0.2	21.9(223)	22.6(231)	-
		0.3	45	41	1.8	21.1(215)	23.1(236)	-
		0.4	66	56	4.5	19.4(198)	22.9(234)	0.08
		0.5	87	73	8.6	18.6(190)	22.2(226)	0.12
		0.6	-	91	13.2	-	21.8(222)	0.15
8	34.2 (349)	0.2	27	26	2.9	23.0(235)	23.9(244)	0.11
		0.3	44	41	6.6	22.0(224)	23.5(240)	0.16
		0.4	64	58	10.0	20.4(208)	22.6(230)	0.17
		0.5	86	74	15.6	19.2(196)	22.3(227)	0.21
		0.6	110	91	18.3	18.1(185)	21.9(223)	0.20
9	34.7 (354)	0.2	28	27	2.5	22.6(230)	23.4(239)	0.09
		0.3	46	43	6.2	21.3(217)	22.8(232)	0.14
		0.4	66	60	11.5	20.1(205)	22.1(225)	0.19
		0.5	89	78	17.1	18.8(192)	21.5(219)	0.22
		0.6	115	97	23.6	17.6(179)	20.8(212)	0.24
10	25.3 (258)	0.2	27	27	4.2	16.5(168)	16.5(168)	0.16
		0.3	44	42	8.6	15.9(162)	16.6(169)	0.20
		0.4	66	59	14.7	14.4(147)	16.1(164)	0.25
		0.5	88	74	19.8	13.7(140)	16.3(166)	0.27
		0.6	117	92	29.8	12.5(127)	15.9(162)	0.32

Начальный модуль упругости стеклофибробетона зависит от модулей упругости матрицы и фибр и их объемного содержания. Причем с увеличением объемного содержания фибр начальный модуль упругости стеклофибробетона увеличивается по нелинейному закону ( на 29,4% при увеличении содержания фибр с 0,94 до 4,7%).

Начальный коэффициент поперечной деформации бетона (коэффициент Пуассона) несущественно зависит от объемного содержания фибр. Для принятых композиций стеклофибробетона его значение рекомендуется принимать равным 0,16. С увеличением уровня напряжений от 0,3 до 0,6 коэффициент Пуассона стеклофибробетона увеличивается в среднем до 0,2 или 25%.

#### Литература.

1. Рабинович Ф.Н. Дисперсно армированные бетоны. - М., 1989.- С. 176.
2. Mikhail R.Sh., Abd-El-Khalik, Hussancin A., Dollimore D., Stino R. Cem. Concr, Res 8 (6), 765 (1978).
3. Рабинович Ф.Н., Лемыш Л.Л. Об учете параметров ориентации и анкеровки фибр при расчете сталефибробетонных конструкций // Расчет пространствен-

ных строительных конструкций: - труды Куйбышевского гос. Ун-та. - Куйбышев. 1985. - Вып. 11. - С. 161-169.

4. Рабинович Ф.Н., Лемыш Л.Л. Зависимость между параметрами фибрового армирования и напряженно-деформированным состоянием сталефибробетонных элементов // Инж. Теорет. Основы строит-ва: Реф. Инф. ВНИИС. - М., 1986. - Вып. 8. - С. 2-8.
5. Рамачадран В., Фельдман Р., Бодуэндж. Наука о бетоне. Физико-химическое бетоноведение. - М., 1986. - С. 142.

## **ПРЕДПОСЫЛКИ К УСКОРЕННОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ МОРОЗО- СТОЙКОСТИ БЕТОНА СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Блещик Н.П.

Строительный факультет, БГПА

Лазаренко О.В.

Строительный факультет, ПГУ

Минск, Новополоцк, Беларусь

Рассматриваются основные положения структурно- механического метода ускоренного определения морозостойкости бетона по ГОСТ 10060.4-95, приводятся предпосылки по его совершенствованию с целью получения достоверных данных о марке бетона по морозостойкости.

Ключевые слова: морозостойкость бетона, структурно- механический метод, структурные характеристики, однократное замораживание.

Над проблемой морозной деструкции бетона работают ученые многих стран мира уже более 100 лет. Однако до сих пор нет достаточной ясности о механизме морозного повреждения и структурных параметрах его определяющих. В последние года эта проблема получила дальнейшее развитие благодаря работам Г.И.Горчакова и сотрудников [1,2], Добролюбова и др.[3], Кунцевича О.В.[4], Пауэрса Т.К.[5], Москвина и сотрудников [6], Стольников В.В.[7], Шейкина А.Е., Добшица Л.М.[8,9], Шлаина А.Т.[10] и др. В этих работах обсуждаются несколько гипотез морозной деструкции бетона, но ни одна из них не объясняет всей совокупности экспериментальных данных. В этой связи проектирование состава морозостойкого бетона осуществляется методом проб и

ошибок, а о стойкости бетона судят по результатам трудоемких и длительных испытаний контрольных образцов методом прямого замораживания.

С целью получения возможности прогнозирования деструктивных процессов, возникающих в бетоне при циклическом замораживании, в новые межгосударственные стандарты (ГОСТы 10060.0- 4-95) включены dilatометрический (ГОСТ 10060.3- 95) и структурно- механический (ГОСТ 10060.4- 95) методы ускоренного определения морозостойкости бетона. При получении достоверных данных они позволили бы определять в короткие сроки рациональные составы бетона по его заданной морозостойкости и физико- механическим свойствам исходных материалов, что имело бы большое значение как для предприятий строительной индустрии, так и для строительных лабораторий.

Однако эти методы рекомендованы только для оценки морозостойкости бетона при подборе и корректировке его состава лабораториями предприятий стройиндустрии и не могут использоваться для определения марки бетона по морозостойкости. Кроме того, в них не решен ряд задач при определении структурных характеристик бетона, а также приняты некоторые дискуссионные положения, противоречащие общеизвестным экспериментальным данным.

Так например, известно [10], что причиной морозной деструкции бетона являются не только температурные деформации расширения свободной воды при замерзании, но и неоднородное поле деформаций, возникающее в цементном камне и зернах заполнителя. По этой причине морозная деструкция бетона наблюдается при циклическом замораживании даже абсолютно сухого бетона, что не может определяться dilatометрическим методом. Кроме того, разность объемных деформаций при равных водоцементных отношениях цементного камня будет увеличиваться с увеличением его объемной концентрации. Соответственно, по предлагаемому dilatометрическому методу будет уменьшаться и морозостойкость бетона, что не согласуется с общеизвестными данными, в том числе с [11]. Нельзя также не отметить и то обстоятельство, что для определения объемных деформаций стандартных и контрольных образцов бетона до настоящего времени отсутствуют серийно изготавливаемые dilatометры.

Несмотря на внешнюю привлекательность и перспективность идеи ускоренного определения морозостойкости бетона по его структурно- механическим характеристикам и соотношению прочности в замороженном состоянии, принятая в ГОСТе 10060.4- 95 методика определения морозостойкости также вызывает ряд существенных возражений. Рассмотрим наиболее важные из них.

В предлагаемом методе рекомендуется использовать для определения морозостойкости бетона как в случае применения изготовленных образцов - кубов, так и в случае образцов-кернов капиллярно-открытую пористость, рассчитываемую для тяжелого бетона по формуле:

$$P_i = \frac{W_i - K_5 \Delta V'_i \cdot P_i}{10}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – капиллярно-открытая пористость бетона, %;

$W_i$  – объем воды затворения в 1 л уплотненной смеси образца бетона за вычетом водоотделения или водопоглощения заполнителями в процессе уплотнения, см<sup>3</sup>;

$\Delta V'_i$  – удельная контракция применяемого цемента к сроку испытания бетона на морозостойкость, см<sup>3</sup>/г;

$K_5$  – стехиометрический коэффициент контракции цемента.

Между тем известно [10,11], что не существует однофакторной зависимости бетона от его капиллярной пористости. Она зависит также от многих других факторов, в том числе от соотношения капиллярной и гелевой пористости, объемной концентрации цементного камня, термических коэффициентов, межзерновой пустотности и удельной поверхности заполнителей, режимов уплотнения смесей, термовлажностных условий твердения бетона. Введение в расчетные зависимости дополнительного коэффициента повышения прочности замороженного бетона не может компенсировать влияние этих факторов. Кроме того, расчетная зависимость (1) не учитывает влияния многих существенных факторов, в том числе минералогического состава цемента, его удельной поверхности, температурных режимов гидратации цемента, содержания минеральных добавок, объемной концентрации цементного камня, наличия химических модификаторов бетона (пластификаторов и ускорителей твердения).

Нельзя также согласиться с предложенной методикой определения значений удельной контракции цемента и ее стехиометрического коэффициента. По предложенной методике значение  $\Delta V'_i$  определяется по характеристикам контракции, полученным по экспериментальным данным за 3 часа и затем экстраполируемым на проектный возраст (28 сут). Экстраполяция производится по данным одной таблицы без учета минералогического состава цемента, его удельной поверхности, содержания гипса и минеральных добавок. Между тем

бесспорным является известное положение о том, что соотношение характеристик контракции цементного камня в проектном и начальном возрастах будет существенно зависеть от дисперсности цемента и минералогического состава клинкера, особенно от содержания  $C_3A$  и  $C_3S$ . На величину контракции существенное влияние оказывает также водоцементное отношение. Несмотря на это в стандарте рекомендуется определять значения характеристик контракции на образцах цементного теста нормальной густоты. Эти же факторы нельзя не учитывать и при определении стехиометрического коэффициента  $K_5$ , значения которого для всех портландцементов независимо от содержания и вида минеральных добавок, минералогического состава клинкера и тонкости помола рекомендуется принимать в пределах 5,1...5,2.

Анализируя формулу (1) можно сделать вывод о том, что капиллярно-открытая пористость в ней определяется по разности объемов свободной воды в бетонной смеси и продуктов гидратации цемента, т. е. геля. Между тем многими экспериментальными исследованиями установлено, что около 80 % гелевых пор также доступны к водонасыщению и замерзанию. Следовательно объем этих пор должен быть отнесен к открытым порам.

Большинство исследователей считают, что снижение долговечности влажного бетона при его попеременном замораживании и оттаивании обусловлено, в основном, увеличением объема при фазовом переходе вода-лед. При этом многие из них к главной причине относят гидравлическое давление, возникающее во влажном бетоне под влиянием замерзающей воды. " Это гидравлическое давление создается в порах и капиллярах бетона в результате сопротивления гелевой составляющей цементного камня продавливанию через поры геля поровой жидкости, отжимаемой льдом" [3].

С помощью этой гипотезы удалось ввести некоторые количественные характеристики, которые в какой-то степени позволяют проектировать морозостойкий бетон. К ним относятся фактор расстояния ФР, равный расстоянию между воздушными порами в цементном камне; объем пор геля  $V_g$ , объем резервных условно замкнутых пор  $V_{Pr}$ . При определении этих характеристик расчетно-экспериментальными методами учитывается гидратация цемента и образование при этом резервных объемов воздуха, обусловленных процессами контракции. К резервным условно замкнутым порам следует относить около 20 % гелевых пор.

Критический анализ основных положений, принятых в структурно- механическом методе ускоренного определения морозостойкости бетона, результаты теоретических и экспериментальных исследований [1-13 и др.] позволили сформулировать следующие предпосылки к разработке нового стандарта республики Беларусь: Бетоны. Структурно- механический метод ускоренного определения морозостойкости:

1. В качестве основных критериев морозостойкости бетона следует принять отношение открытой  $\Pi_0$  к условно замкнутой  $\Pi_{у.з}$  пористостей бетона и коэффициент повышения прочности при однократном замораживании

2. Открытая и условно замкнутая пористости бетона должны рассчитываться по составу бетона и степени уплотнения бетонной смеси в зависимости от степени гидратации цемента  $\alpha$  в заданных термовлажностных условиях, относительного количества химически связанной воды при полной гидратации цемента  $W$ , относительного содержания массы минеральных добавок в цементе  $r_d$ , плотности геля в цементном камне  $\rho_z$ . При этом могут быть использованы следующие формулы:

$$\Pi_0 = \left[ 1 - m_z - \frac{(1-\alpha)(\rho_{в.м} / \rho_ч)}{\rho_{в.м} / \rho_ч + (B - B_{погл}) / Ц} + 0,8 \frac{(1+w) \cdot \alpha \cdot (\rho_{в.м} / \rho_z - \rho_{в.м} / \rho_{к.з})}{\rho_{в.м} / \rho_ч + (B - B_{погл}) / Ц} \right] \times$$

$$\times 10^{-3} Ц (0,32 + ((B - B_{погл}) / Ц + m_{в.см});$$

(2)

$$\Pi_{у.з} = 0,2 \frac{(1+w) \cdot \alpha \cdot (\rho_{в.м} / \rho_z - \rho_{в.м} / \rho_{к.з})}{\rho_{в.м} / \rho_ч + (B - B_{погл}) / Ц} \times 10^{-3} Ц (0,32 + (B - B_{погл}) / Ц), \quad (3)$$

где  $m_z$  – объемная концентрация геля в цементном камне, определяемая по формуле

$$m_z = \frac{(1+w) \cdot \alpha \cdot \rho_{в.м}}{\rho_z \left( \rho_{в.м} / \rho_ч + (B - B_{погл}) / Ц \right)}; \quad (4)$$

$\rho_ч$  – плотность цемента;

$\rho_{в.м}$  – средняя плотность воды в цементном тесте, принимаемая при

$(B - B_{погл}) / Ц \geq 0,3$  равной плотности свободной воды, т.е. 1000 кг/м<sup>3</sup>

и при  $(B - V_{\text{погл}}) / Ц < 0,3$  рассчитываемая с учетом плотности пленочной воды по методике [14];

$Ц$  – содержание цемента,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$B$  – содержание воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$V_{\text{погл}}$  – количество воды, поглощенной заполнителем,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\rho_{\text{к.г}}$  – плотность камня в геле, принимаемая по данным [15] равной  $2433 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

$m_{\text{в.см}}$  – относительное объемное содержание воздуха в бетонной смеси, определяемое в зависимости от ее степени уплотнения.

Степень гидратации цемента  $\alpha$  и структурные характеристики  $w$  и  $\rho_2$  рассчитываются по формулам, приведенным в статье Блещика Н.П. и Рыскина М.Н. настоящего сборника и в работе [13].

3. При расчете марки бетона по морозостойкости должны учитываться не только основные критерии, указанные в п.1, но и объемная концентрация цементного камня в бетоне. Соответственно с этим должна быть построена таблица определения максимальной морозостойкости. В настоящее время завершается комплекс экспериментальных исследований по накоплению банка данных для построения показателей шкалы морозостойкости бетона.

#### Литература

1. Горчаков Г.И., Морозостойкость бетона в зависимости от его капиллярной пористости. – Бетон и железобетон, 1964, №7, с. 302- 306.
2. Горчаков Г.И., Орендлихер М.П., Савин В.И., Воронин В.В., Алимов Л.А., Новикова И. П. Состав, структура и свойства цементных бетонов. – Стройиздат, 1976.
3. Добролюбов Г., Ратинов В.Б., Розенберг Т.И., Прогнозирование долговечности бетона с добавками. – М., Стройиздат. 1983.-231 с.
4. Кунцевич О. В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений крайнего севера. – Л., Стройиздат, 1981 г.
5. Пауэрс Т.К. Физическая структура портландцементного теста. В кн.: Химия цемента. – М., Стройиздат, 1969. - 312 с.
6. Москвин В.М., Капкин М.М., Мазур Б.М., Подвальный А.М. Стойкость бетона и железобетона при отрицательной температуре. – М., Стройиздат. 1967 – 131 с.

7. Стольников В.В. О теоретических основах сопротивляемости цементного камня и бетонов циклам замораживания и оттаивания., В кн.: Второй международный симпозиум по зимнему бетонированию, Т2.– М., Стройиздат, 1975.– с.253-263.
8. Шейкин А.Е. Прогнозирование морозостойкости бетона при выборе его состава. –Бетон и железобетон. 1979. С. 25.
9. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости.– Л., Стройиздат, 1989 – 128 с.
10. Шлаен А.Г. Определение морозостойкости бетона по компенсационному методу- фактору. – Бетон и железобетон, 1979, №10. С. 20.
11. Клейнер В. Д. О механизме морозного повреждения бетона. – Изв. Вузов. Строительство и архитектура , 1988. №12, с.55-59.
12. Горчаков Г.И., Алимов Л.А., Воронин В.В., Акимов В.В. Зависимость морозостойкости бетонов от их структуры и температурных деформаций. – Бетон и железобетон, 1972, №10. с.7–10.
13. Отчет о НИР " Разработка основных положений структурно- механического метода экспрессной оценки морозостойкости бетона ". Руководитель Блещик Н.П.// Белорусская государственная политехническая академия. Минск, 1996.
14. Блещик Н.П. Структурно- механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуум бетона . – Мн., 1977.– 230 с.
15. Пауэрс Т. К. Физические свойства цементного теста и камня // четвертый международный Конгресс по химии цемента. – М.,:Стройиздат, 1964 - с.402 - 438.

## **К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ**

Блещик Н.П.

Строительный факультет, БГПА.

Рыскин М.Н.

Лаборатория технологии модифицированного бетона, БелНИИС.

Минск, Беларусь

В статье рассмотрены различные подходы, используемые при моделировании структуры и прочности цементного камня. Предложен новый критерий оценки прочности цементного камня.

Ключевые слова: цементный камень, структура, прочность.

Ряд отечественных и зарубежных ученых на протяжении последних десятилетий занимался изучением вопросов прочности цементного камня: И.Н.Ахвердов, Ю.М. Бутт, , А.В. Волженский, А. Грудемо, Т.К. Пауэрс, А.Ф. Полак, П.А. Ребиндер, Д.М. Рой, М.М. Сычев, В.В. Тимашев, А.Е.Шейкин, В.Н. Юнг и другие.

Структура камня является результатом комплекса сложных физико-химических процессов, обуславливающих и сопровождающих твердение вяжущих. Следует отметить, что до настоящего времени единая и общепризнанная теория формирования структуры цементного камня еще не разработана, как и не выявлена истинная природа сил, приводящих к упрочнению его структуры и синтезу прочности. Исследователями отмечаются два типа когезионных связей: вандер-ваальсовы силы, определяемые физическим притяжением полярных продуктов гидратации, и сильные химические связи, возникающие по мере дальнейшего твердения при срастании новообразований [1-4]. При этом высказываются различные взгляды о вкладе каждого типа связей в структурную прочность. Соответственно, нет единого мнения о влиянии на прочностные характеристики камня в целом, свойств отдельных продуктов гидратации. Считается, что наибольшая прочность может быть достигнута при некоем оптимальном соотношении аморфных и крупнокристаллических продуктов [3]. Впрочем никаких количественных значений данного оптимума в литературе не приводится.

В работах посвященных синтезу прочности камня (А.А. Пашенко [2], В.В. Тимашев [5], М.М. Сычев [4], И.Н.Ахвердов [6] и др.) выделяются две группы факторов, определяющих эту величину: физическая структура камня (пористость) и ряд кристаллохимических факторов (тип, дисперсность, морфология новообразований, их адгезия с негидратированными компонентами и т.д.). При этом относительно роли второй группы факторов отмечаются значительные трудности в определении их количественного учета кристаллохимических факторов при разработке физических моделей цементного камня [2,4].

Цементный камень представляет собой высокогетерогенную полидисперсную систему, состоящую из твердой фазы и порового пространства, которое может быть заполнено жидкостью или газом. По мере фазовых превращений исходного вяжущего эти составляющие постоянно изменяются, что позволяет рассматривать твердение как последовательную непрерывную смену структур камня, в каждый момент однозначно определяющих его прочность [7].

Твердая фаза цементного камня включает остатки непрогидратированные частицы цемента (ядер), составляющих до 40% от объема камня, и новообразования – коллоидные гидросиликаты типа CSH, гидроксид кальция, продукты гидратации алюминатной ( $C_aA$ ) и алюмоферритной ( $C_4AF$ ) составляющих портландцементного клинкера.

Существует большое число классификаций порового пространства цементного камня, в основу которых положены различные критерии: размерность, объем и форма пор, физико-химические причины их образования, принадлежность пор к тем или иным структурным уровням камня, влияние пор на физико-технические свойства камня и т.п. [8-11]. Во многих работах отмечается наличие двух максимумов на дифференциальных кривых распределения пор по размерам. Это позволило выделить в камне (Т. Пауэрс) две основные группы пористости: капиллярные поры и поры цементного геля. Примерный диапазон размера капиллярных пор от 50 до  $5 \cdot 10^{-3}$  мкм, гелевых пор -  $5 \cdot 10^{-3}$  -  $1 \cdot 10^{-3}$  мкм. Кроме того, в камне присутствует "технологическая" пористость – сферические поры размером от 50 мкм до 2 мм, образующиеся вследствие вовлечения воздуха при изготовлении теста.

Поры не только уменьшают рабочее сечение композиции, но и являются концентраторами напряжений. По данным Десова [12] концентрация напряжений вблизи пор и пустот в цементном камне имеет 9-27 кратное значение по сравнению со средними напряжениями (в зависимости от характера пористости). Все это обуславливает нелинейную зависимость прочности от пористости. В результате исследований влияния пористости различных материалов (металлов, керамики, цементных систем и др.) на их прочность были получены несколько типов полуэмпирических уравнений, выражающих связь  $P-R$  (пористость – прочность):

$$R = R_0(1 - P)^n; \quad (1)$$

$$R = R_0 \exp(-bP); \quad (2)$$

$$R = R_0 \left( \frac{1 - P}{1 + aP} \right); \quad (3)$$

$$R = d \cdot \ln(P_\infty / P). \quad (4)$$

В формулах (1) – (4) предложенных соответственно: (1) – Бальшиным [13]; (2) – Рышкевичем [14]; (3) – Вейлом [14]; (4) – Шиллером [3]:  $P$  – пористость;  $P_\infty$  – пористость при нулевой прочности ( $P_\infty \approx 0,6 \dots 0,8$ );  $R_0$  – прочность материала при нулевой пористости;  $R$  – прочность материала при порис-

тости  $P$ ;  $n$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $d$  – эмпирические коэффициенты находящиеся в пределах :  $n=3\dots 6$ ;  $b=4\dots 9$ ;  $a=1,5\dots 12$ ;  $d= 40\dots 70$ .

Широкие интервалы изменения параметров  $n$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $d$  позволяют, в принципе, аппроксимировать практически любую зависимость прочности от пористости (т.е. для любого материала, в т.ч. и цементного камня). Но подробный обзор исследований зарубежных авторов применявших зависимости (1) – (4) для описания прочности цементного камня на основе клинкерных и смешанных вяжущих [3], показал, что использование в расчетах только величины пористости может привести к значительным погрешностям. Монотонность и естественность связи  $R$ – $P$  имеет место лишь в пределах одного В/Ц или при близких его значениях. Нарушение этой закономерности обусловлено различием структуры камня по дифференциальной пористости [15].

А.Ф. Полак с сотрудниками [15,16] выделяют наряду с пористостью два самостоятельных фактора, влияющих на прочность: 1) – неоднородность распределения пор в объеме; 2) – разноразмерность или многограновость пор, усиливающая концентрацию напряжений. Исходя из этого, прочность неоднородной многограновой пористой структуры цементного камня вычисляется как:

$$R = R_0 V^S k^{-m}, \quad (5)$$

где  $R_0$  – прочность фазы для нулевой пористости;

$V_0$  – интегральная плотность структуры;  $S = 2\dots 6$  – показатель степени зависящий от некоторой функции распределения локальной плотности  $\varphi(v)$ ;

$k > 1$  – коэффициент концентрации напряжений;

$m \geq 1$  – число рангов пор.

Следует при этом отметить неопределенность ряда величин:  $k$ ,  $m$ ,  $\varphi(v)$ , которая может затруднить применимость формулы в реальных расчетах.

В отдельных работах [17] влияние характера пористости цементного камня на его прочность предлагается учитывать с помощью параметров, зависящих от различных функций распределения пор: в объеме камня, по размеру, по конфигурации, по ориентации к направлению действующей силы. Конкретные математические зависимости при этом не даны. Подобный подход, вероятно, носит лишь теоретический характер, из-за сложности получения таких функций.

Среди предлагавшихся моделей строения цементного камня (Фельдмана – Середы, Кондо – Даймона, Пауэраса и др.) наиболее удачной, с позиции описа-

ния связи структура–прочность, следует считать упрощенную модель Т. Пауэрса [8]. Затвердевший камень состоит из цементного геля, включающего продукты гидратации цемента, капиллярных пор и клинкерных частиц. Гель со держит гелевые поры. Прочность цементного камня связывается степенной зависи мостью с критерием  $X$ , характеризующем концентрацию продуктов гидра тации цемента в доступном для них пространстве:

$$f_c = f_c^0 X^n, \quad (6)$$

где:  $X$  – отношение объем геля к суммарному объему геля и капиллярных пор;

$f_c^0$  - характеризует прочность геля ;

$n=2,6 \dots 3$  - константа, зависящая от вида цемента.

Более объективным критерием прочности камня по мнению В.В. Бобков [15], является относительная концентрация плотных продуктов гидратации (объем геля за вычетом гелевых пор) -  $\Phi_0$ . Автор при этом справедливо указы вает на условность допущения принятого Пауэрсом о постоянстве пористости геля (~28%):

$$\Phi_0 = \frac{v_0}{B / C \cdot 1 / c\theta + 1}, \quad (7)$$

где  $v_0$  - коэффициент увеличения объема твердой фазы при гидратации вя жущего;

$c$  - отношение плотностей воды и цементного клинкера;

$\theta$  - степень гидратации цемента, определяемая экспериментально.

Однако автор, констатируя влияние на величину  $v_0$  минералогического состава цемента и стадии твердения, не приводит при этом соответствующи аналитических зависимостей, ограничиваясь лишь диапазоном значений  $v_0$  (от  $v_0=1,77$  в возрасте 1..2 суток до  $v_0=1,58$  в возрасте 1..3 года), что нельзя считать удовлетворительным.

Приведенные выше зависимости прочности не используют представлени о цементном камне, как о композиционном материале, игнорируя при этом многоуровневый характер его структуры. В.И. Соломатов, И.Н. Грушко, П.Г. Комохов, наоборот, в своих работах подходят к цементным системам с позиций структурной механики бетона, предусматривающей иерархичность строени как бетона в целом, так и камня (микромеханика), применяя принцип "структура в структуре".

Используя в основе модель Пауэрса, цементный камень можно рассмот реть как композит, имеющий несколько структурных уровней. На самом верх

нем камень состоит из включений цементных частиц ( $m_{кл}$ ) в матрице -- "связке", образованной гелем ( $m_z$ ), капиллярными порами ( $m_{к.п.}$ ) и вовлеченным воздухом ( $m_{в.в.}$ ). Гель в свою очередь состоит из плотных продуктов геля и гелевых пор. Единичный объем цементного камня равен :

$$m_z + m_{к.п.} + m_{кл.} + m_{в.в.} = 1 \quad (8)$$

Рассмотрение структуры камня как совокупности непрогидратированных клинкерных частиц и "связки", связано с понятием "микробетона", которое было впервые предложено В.Юнгом [18], а затем развито в работах И.Н. Ахвердова [6], В.В. Тимашева [19] и др. Зерна клинкера и отдельных клинкерных минералов ("заполнитель"), гидратируясь с поверхности, становятся узлами пространственной решетки цементного камня., заполняемой гидратными новообразованиями ("вяжущее") и играют важную роль при формировании свойств камня. Более прочные и жесткие клинкерные частицы воспринимают большую нагрузку чем "связка" и являются одновременно препятствием на пути распространения трещин, которые огибая цементные "ядра", изменяют свою ориентацию по отношению к действующему в материале полю напряжений , что до определенной величины нагрузки ведет к затуханию их развития. Еще один немаловажный аспект – упрочнение "связки", находящейся между зернами клинкера, при эффекте "обоймы", возникающим за счет прочного срастания жесткой клинкерной составляющей с новообразованиями, которое позволяет сдерживать таким образом деформации растяжения в "связке", вызывающие в конечном счете разрушение цементного камня.

Первоначальный объем цемента в тесте, учитывая его последующую гидратацию, в каждый ее момент, можно разложить на 2 составляющие: прогидратированный цемент ( $m_{ч.здр}$ ) и клинкерные частицы( $m_{кл.}$ ). Сумма объемных концентраций компонентов цементного теста, таким образом, запишется в виде:

$$m_{ч.здр} + m_{кл.} + m_{пл.в} + m_{к.в} + m_{в.в.} = 1, \quad (9)$$

где,  $m_{ч.здр}$ ,  $m_{кл.}$ ,  $m_{пл.в}$ ,  $m_{к.в}$ ,  $m_{в.в.}$  – соответственно объемные концентрации в тесте шеночной воды, капиллярной воды и вовлеченного воздуха.

Рассматривая процесс набора прочности как физический процесс уплотнения структуры камня, прочность "связки" может быть представлена в виде степени заполнения твердой фазой цементного геля доступного ей пространства – параметра  $\Phi$ , физический смысл которого, тождественен величине  $\Phi_0$  в формуле Бабкова (7)

$$\Phi = \frac{m_2 - m_{2л.}}{m_{ч.здр} + m_{к.с} + m_{пл.с} + m_{воз}}, \quad (10)$$

где  $(m_2 - m_{2л.})$  – объем твердой фазы новообразований (цементного геля за вычетом гелевых пор);

$(m_{ч.здр} + m_{к.с} + m_{пл.с} + m_{воз})$  – пространство, доступное для размещения цементного геля в процессе гидратации.

Принимая объем камня равным объему теста, т.е. приравнивая (8) и (9) после преобразования и подстановки в (10), получаем:

$$\Phi = \frac{m_2 - m_{2л.}}{m_2 + m_{к.л.} + m_{воз}} \quad (11)$$

Прочность связки вычисляется по степенной зависимости:

$$f_{св} = K\Phi^n, \quad (12)$$

где  $K$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты.

Полученные функциональные зависимости были использованы при разработке структурно-механической модели прочности цементного камня, представленной авторами во второй статье настоящего сборника.

#### Литература

1. Мчедлов-Петросян О.П. Химия неорганических строительных материалов. - М.: Стройиздат, 1989. - 304 с.
2. Пашенко А.А., и др. Теория цемента. Киев, Будівельник, 1991. - 165 с.
3. Рамачандран В., Фельдман Р., Бодуэн Дж. Наука о бетоне: Физико-химическое бетоноведение - М.: Стройиздат, 1986. - С. 278.
4. Сычев М.М. Теоретические основы применения цементов. Л., ЛГИ, 1986.
5. Тимашев В.В. Влияние физической структуры цементного камня на его прочность. Цемент, 1978, №2, С. 6–8.
6. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М, Стройиздат, 1981, с.
7. Гранковский И.Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах. К.: Наук. Думка, 1964. - 300 с.
8. Пауэрс Т.К. Физические свойства цементного теста и камня // Четвертый международный Конгресс по химии цемента. - М.: Стройиздат, 1964. - С. 402-438.

9. Чеховской Ю.В., Берлин Л.Е. О кинетике формирования поровой структуры цементного камня. // 6 Международный Конгресс по химии цемента. - М.: Стройиздат, 1976. - Т. 2. - С. 294-297.
10. Шейкин А.Е., Чеховской Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М, Стройиздат, 1979. - 344с.
11. Шейнфельд А.В. Бетоны повышенной прочности и непроницаемости на портландцементях с добавками микрокремнезема различных ферросплавных производств. Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. тех. наук. М., 1991.
12. Десов А.Е. Некоторые вопросы структуры, прочности и деформаций бетонов. В кн. Структура, прочность и деформации бетонов. Под ред. Десова А.Е., М., Стройиздат, 1966.
13. Бальшин М.Ю. Докл. АН СССР. 67, 831(1949).
14. Власов А.С. Теоретические основы прочности керамики. М., Моск. хим.-технол. ин-т им. Менделеева, 1982. -С. 48.
15. Бабков В.В. Физико-механические аспекты оптимизации структуры цементных бетонов. Автореф. дисс. на соискание ученой степени док. тех. наук. Л., 1990.
16. Полак А.Ф., Бабков В.В, Андреева Н.З. Вопросы твердения минеральных вяжущих веществ. Уфа.1990.
17. Угинчус Д.А. Бетоны с модифицированной пористостью для водозооэкономных сооружений. Автореф. дисс. на соискание ученой степени док. тех. наук. Л., 1987.
18. Юнг В.Н. Микробетон. Цемент, 1934, №7, С. 6 - 17.
19. Тимашев В.В. и др. Структура цементного камня многолетнего твердения. В кн. Избранные труды. Синтез и гидратация вяжущих материалов. М., Наука, 1986.

## СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ НА СЖАТИЕ

Блещик Н.П.

Строительный факультет, БГПА.

Рыскин М.Н.

Лаборатория технологии модифицированного бетона, БелНИИС.

Минск, Беларусь

В работе рассмотрены вопросы взаимосвязи структуры и прочности цементного камня. Предложена структурно-механическая модель цементного камня и приведены сравнительные оценки расчетных и опытных величин его прочности.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, цементный камень, структура, прочность.

Задача получения высокопрочного сводиться к созданию оптимальной структуры конгломерата, характеризующейся высокой собственной прочностью компонентов и высокой адгезионной прочностью их контактов. Свои особенности в характер деформирования и разрушения высокопрочных бетонов вносит то, что прочность цементного камня в них приближается к прочности заполнителя; при этом различие в дисперсности их составляющих элементов превышает три десятичных порядка. Отсюда целесообразность рассмотрения бетона как двухфазного материала (цементный камень – заполнитель), что обуславливает необходимость количественного прогнозирования прочностных и деформативных свойств камня в бетоне.

Авторы предприняли попытку выразить прочность камня исключительно через физические параметры его структуры: относительное объемное содержание геля ( $m_2$ ), гелевых пор ( $m_{2.п.}$ ), капиллярных пор ( $m_{к.п.}$ ), непрогидратированных клинкерных частиц ( $m_{кл.}$ ) и вовлеченного воздуха ( $m_{воз.}$ ).

Аналитические выражения, определяющие перечисленные структурные компоненты, получены в работе [1] в виде:

$$m_2 = \frac{(1+w) \cdot \alpha \cdot \rho_{см}}{\rho_2 \left( \rho_{с.м.} + \rho_4 + B \cdot C \right)} ; \quad (1)$$

$$m_{з.п.} = \frac{(1+w) \cdot \alpha \cdot \left( \rho_{г.м.} / \rho_2 - \rho_{г.м.} / \rho_{к.з.} \right)}{\rho_{г.м.} / \rho_4 + B / \Pi} ; \quad (2)$$

$$m_{к.п.} = 1 - m_2 - \frac{(1-\alpha)(\rho_{г.м.} / \rho_4)}{\rho_{г.м.} / \rho_4 + B / \Pi} , \quad (3)$$

в которых  $\alpha$  - степень гидратации цемента, определяемая как произведение функций учитывающих минералогический состав клинкера, содержание безводного гипса, удельной поверхности цемента и водоцементного отношения цементного теста [2]:

$$\alpha = \varphi_{мс} \varphi_{зо3} \varphi_S \varphi_{В/Ц} ; \quad (4)$$

$w$  - неиспаряемая вода на 1 г цемента при полной гидратации:

$$w = \frac{0,4K_{1г} C_3 A + 0,114K_{2г} C_4 AF + 0,231K_{3г} C_3 S + 0,155K_{4г} C_2 S}{(C_3 A + C_4 AF + C_3 S + C_2 S) \varphi_{мс}} , \quad (5)$$

где  $C_3 A, C_4 AF, C_3 S, C_2 S$  - процентное содержание трехкальциевого алюмината, четырехкальциевого алюмоферрита, трехкальциевого силиката и двухкальциевого силиката;  $K_{1г}, K_{2г}, K_{3г}, K_{4г}$  - соответствующие временные функциональные коэффициенты обуславливаемые взаимодействием основных минералов с водой;

$\rho_{г.м.}, \rho_4, \rho_2, \rho_{к.з.}$  - плотности соответственно: воды в тесте, цемента, геля и твердого вещества в геле.

$$\rho_{к.з.} = 2433 \text{ кг/м}^3 [3].$$

$$\rho_2 = \frac{0,734 \rho_4 (1+w)}{\left(1+w \frac{\rho_4}{\rho_г} - 0,00007 \rho_4\right)} \quad (6)$$

Как показано в статье [4] настоящего сборника, цементный камень может быть представлен как композиционный материал, в котором клинкерные частицы наполняют матрицу - "связку" образованную цементным гелем, капиллярными порами и вовлеченным воздухом ( $m_{св} = m_2 + m_{к.п.} + m_{зо3}$ ).

Поведение такого композита под сжимающей нагрузкой предложено описывать следующей структурно-механической моделью (рис. 1), в которой выделено два параллельно сочлененных блока (I и II).

Блок I включает негидратированные зерна цемента ( $m_{кл}$ ) и часть "связки" ( $m_{св}^I$ ), расположенную под зернами клинкера, которая при нагружении находится в сложном напряженном состоянии, обусловленном эффектом "обоймы".

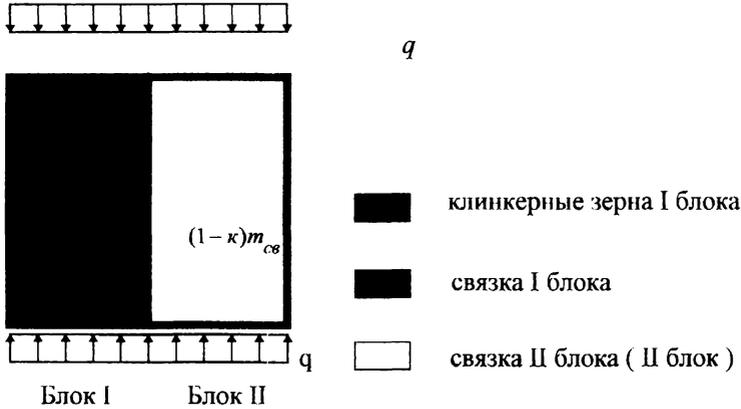


Рис. 1 Структурно-механическая модель цементного камня.

Блок II представляет собой свободнодеформируемую "связку" между включениями клинкера ( $m_{кл}^II$ ). Работа под нагрузкой данного блока определяется исключительно механическими свойствами "связки", испытывающей одноосное напряженное состояние (сжатие), ориентированное в направлении действия внешней силы.

Относительные объемные содержания в цементном камне клинкерных частиц ( $m_{кл}$ ), "связки" I блока ( $m_{св}^I$ ) и "связки" II блока ( $m_{св}^II$ ), соответственно, вычисляются по формулам:

$$m_{кл} = 1 - (m_{св}^I + m_{св}^II) = 1 - m_{св} ; \quad (7)$$

$$m_{св}^I = k m_{св} ; \quad (8)$$

$$m_{св}^II = (1 - k) m_{св} , \quad (9)$$

в которых  $k$  – параметр учитывающий долю "связки" входящей в блок I от объема всей связки. Параметр  $k$  выражен в виде линейной функции от  $m_{св}$  (рис.2) :

$$k = 1,25(1 - m_{св}) \quad (10)$$

Граничные условия данной функции: 1)  $k = 0$  при  $m_{св} = 1$  – отсутствие цементных зерен, модель вырождается в блок II ; 2)  $k = 1$  при  $m_{св} = 0,25$  – отсутствует свободнодеформируемая "связка", модель вырождается в блок I ( константа 0,25 представляет собой пустотность цементных зерен при максимально плотной их упаковке).

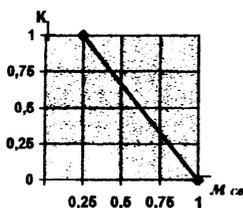


Рис. 2. Зависимость параметра  $k$  от объема "связки"  $m_{св}$ .

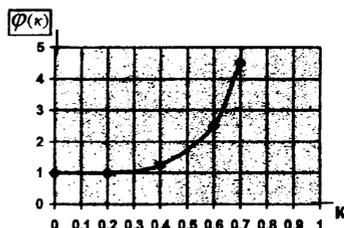


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $\varphi(k)$  от параметра  $k$ .

Относительные объемы блока I и блока II в ц.к.:

$$m_I = m_{кп} + m_{св}^I = 1 - (1 - k)m_{св} \quad ; \quad (11)$$

$$m_{II} = m_{св}^{II} = (1 - k)m_{св} \quad . \quad (12)$$

При нагружении, вплоть до момента разрушения, блоки I и II вынужденно деформируются совместно, определяя равенство их относительных продольных деформаций в предельной стадии ( $\varepsilon_{ц.к.} = \varepsilon_I = \varepsilon_{II}$ ). При этом прочность композита вычисляется из выражения:

$$f_{ц.к.} = \sigma_I m_I + \sigma_{II} m_{II} \quad . \quad (13)$$

Напряжения в блоках I и II в предельной стадии ( $\sigma_I, \sigma_{II}$ ) находятся, рассматривая концентрацию и упругие свойства отдельных компонентов каждого блока. Прочность цементного камня, исходя из зависимости (13), таким образом, определяется формулой:

$$f_{ч.к.} = \left[ \frac{f_{св}}{\frac{E_{св}^{II} m_{кл}}{E_{кл} m_I} + \frac{E_{св}^{II} m_{св}^I}{E_{св}^I m_I}} \right] m_I + f_{св} m_{II} , \quad (14)$$

где  $f_{св}$  – прочность "связки";

$E_{св}^I, E_{св}^{II}, E_{кл}$  – модули упругости соответственно "связки" I и II блока и клинкерных частиц.

Прочность "связки" определяется параметром  $\Phi$  полученном в работе [4]:

$$\Phi = \frac{m_z - m_{z,н}}{m_z + m_{кл} + m_a} . \quad (15)$$

На основании большего числа экспериментальных данных по прочности камня различных исследователей и собственных опытов, прочность "связки" цементного камня была найдена в виде:

$$f_{св} = K\Phi^n = 185\Phi^{2,9}, \text{ [МПа]}. \quad (16)$$

Физическим смыслом константы  $K=185$  МПа в формуле (16) является прочность твердого вещества "связки" в камне, т.е. прочность цементного геля при нулевой пористости.

Увеличение модуля упругости "связки" блока I ( $E_{св}^I$ ) по сравнению с модулем упругости "связки" блока II ( $E_{св}^{II}$ ) за счет ограничения деформаций связки клинкерными включениями может характеризоваться эмпирическим коэффициентом  $\varphi(k) \geq 1$ , полученном в виде функции от параметра  $k$  (рис.3):

$$\varphi(k) = E_{св}^{II} / E_{св}^I = 1 + 30k^6 . \quad (17)$$

На основании зависимостей предложенных О.Я. Бергом и др. [5], модуль упругости "связки" определяется из выражения:

$$E_{св} = E_{св}^{II} = \frac{50000 f_{св}}{80 + f_{св}}, \text{ [МПа]}. \quad (18)$$

Величина модуля упругости клинкерных частиц в цементном камне была принята равной  $E_{кл} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ .

В итоге, формула прочности цементного камня (14) с учетом (7)–(12), (14), (17) и (18) после преобразований примет вид:

$$f_{ч.к.} = 185\Phi^{2,9} \left[ \frac{(1 - (1 - k)m_{ce})^2}{\Phi^{2,9} (1 - m_{ce}) + \frac{km_{ce}}{1 + 30k^6}} + (1 - k)m_{ce} \right]. \quad (19)$$

Применимость полученных математических зависимостей проверялась на результатах многочисленных экспериментальных исследований отечественных и зарубежных авторов и собственных опытах. Часть этих данных приведена в таблице. Всего были обработаны результаты по прочности цементного камня на основе более чем 50 бездобавочных цементов различных химико-минералогических составов и дисперсности. Исходные водоцементные отношения изменялись от 0,22 до 0,5. Время твердения цементного камня составляло от 1 до 28 суток; твердение проходило в воздушно-влажностных условиях или воде при температурах 18-24°C.

Анализ экспериментальных данных и расчетных величин прочности цементного камня показал приемлемую их сходимость в широких диапазонах варьирования исходных данных. Таким образом разработанная структурно-механическая модель цементного камня достаточно адекватно отражает реальную физическую структуру цементного камня и процессы, происходящие при его деформировании и разрушении под кратковременной нагрузкой.

Расчетные ( $f_p$ ) и опытные ( $f_{on}$ ) значения прочности цементного камня

Характеристика цемента										В Ц	$\tau$ су т.	$f_p$ МПа	$f_{on}$ МПа	$f_p - f_{on}$ %
№	Вид цемента	Минералогический состав, %				SO <sub>2</sub> %	S <sub>уд.</sub> м <sup>2</sup> /кг	K <sub>нр.</sub>						
		C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	"Плевен" (Болгария)	7,08	10,3	58,2	21,1	0,36	320	0,25	0,3	1	17,5	16,0	+9,1	
		7,08	10,3	58,2	21,1	0,36	320	0,25	0,3	3	37,9	40,0	-5,4	
		7,08	10,3	58,2	21,1	0,36	320	0,25	0,3	7	59,4	62,0	-4,1	
		7,08	10,3	58,2	21,1	0,36	320	0,25	0,3	28	69,9	68,0	+2,7	
2	"В Пих" (Болгария)	12,5	9,4	38,5	35,0	0,52	350	0,26	0,3	1	21,2	27,0	-21,6	
		12,5	9,4	38,5	35,0	0,52	350	0,26	0,3	3	42,1	41,0	+2,6	
		12,5	9,4	38,5	35,0	0,52	350	0,26	0,3	7	61,3	55,0	+11,4	
		12,5	9,4	38,5	35,0	0,52	350	0,26	0,3	28	70,3	68,0	+3,3	
3	БТЦ (Болгария)	8,8	10,2	53,7	22,8	2,27	380	0,27	0,3	1	30,2	29,0	+4,2	
		8,8	10,2	53,7	22,8	2,27	380	0,27	0,3	3	53,7	46,0	+16,7	
		8,8	10,2	53,7	22,8	2,27	380	0,27	0,3	7	73,9	59,0	+25,2	
		8,8	10,2	53,7	22,8	2,27	380	0,27	0,3	28	78,2	79,0	-1,1	
										0,3				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
4	Себряков- ский	3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,25	1	27,2	26,0	+4,6
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,25	3	49,7	55,0	-9,7
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,25	7	70,0	72,0	-2,8
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,25	28	83,8	77,0	+8,9
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,3	1	14,9	13,0	+14,9
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,3	3	32,8	32,0	+2,5
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,3	7	52,1	51,0	+2,1
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,3	28	65,0	65,0	0
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,4	1	6,1	6,5,0	-0,5
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,4	3	17,1	17,0	+0,7
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,4	7	30,9	36,0	-14,1
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,4	28	40,4	45,0	-10,3
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,5	1	3,1	3,5,0	-11,3
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,5	3	10,0	11,0	-9,3
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,5	7	19,4	21,0	-7,8
3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,5	28	26,1	34,0	-23,2		

#### Литература.

1. Отчет о НИР "Разработка основных положений структурно-механического метода экспрессной оценки морозостойкости бетона" // Белорусская государственная политехническая академия. Минск, 1996.
2. Блещик Н.П., Протько Н.С., Рыский М.Н. Математические модели кинетики гидратации цемента. // Междунар. Конф. Инженерные проблемы современного бетона и железобетона. Минск, БелНИИС, 1997. - Т. 2. - С. 25 - 36.
3. Пауэрс Т.К. Физические свойства цементного теста и камня // Четвертый международный Конгресс по химии цемента. - М.: Стройиздат, 1964. - С. 402-438.
4. Блещик Н.П., Рыский М.Н. К вопросу о моделировании структуры и прочности цементного камня. Настоящий сборник.
5. Берг О.Я. и др. Высокопрочный бетон. М., Стройиздат, 1971.

## РАСЧЁТ ПЛИТ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ С НАГРУЗКАМИ В СРЕДИННОЙ ПЛОСКОСТИ

Босаков В.С.,

Строительный факультет, БГПА

г.Минск, Беларусь

Пойта П.С., Тарасевич А.Н.

Строительный факультет, БПИ

г.Брест, Беларусь

Плиты на грунтовом основании, широко используются в качестве жестких покрытий дорог, аэродромов, полов зданий, днищ шлюзов и резервуаров. Расчет конструкций на упругом основании представляет собой сложную задачу. Перед специалистами возникает ряд проблем по выбору методов расчета и расчетной модели основания.

Первым предположением была прямолинейная зависимость между осадками грунта и приложенной нагрузкой. Недостатком этой модели является то, что осадка возникает только там, где приложена нагрузка. Такая модель дает равномерное распределение реактивных давлений по подошве фундамента, что не соответствует действительной работе грунта. Несмотря на эти недостатки, расчеты по ней ведутся и в настоящее время. Хорошее совпадение теоретических расчетов с экспериментальными данными можно получить при слабых грунтах.

Г.Э.Проктором и К.Викгардом была предложена модель упругого изотропного полупространства. Это позволило применить в расчётах решения теории упругости. С применением этой модели появилась возможность рассчитывать осадки за пределами приложения нагрузки, а также учитывать влияние соседних нагрузок.

Модель предложенная в 1933 г. К.Маргерром также обладает распределительной способностью и называется моделью упругого слоя или слоя конечной толщины. С помощью этой модели можно описывать и Винклеровское основание и упругое полупространство, однако если грунт не подстилается довольно жестким слоем, определение мощности сжимаемого слоя затруднительно.

Единый подход к линейным моделям основан на применении функции влияния основания. Впервые исследования задач изгиба конструкций на упругом основании на основе общей модели линейно-деформируемого основания с математическим описанием ее с помощью ядра основания произвел

Б.Г.Корнеев [1]. Он рассмотрел плиты, которые лежат на линейно-деформируемом упругом основании, для которого между давлением на основание и перемещением поверхности основания существует следующая зависимость:

$$W(x, y) = \iint_F P(\xi, \eta) K(x, y, \xi, \eta) d\xi d\eta \quad (1)$$

где,  $W$  - осадка поверхности грунта;

$P$  - внешняя нагрузка;

$k$  - ядро уравнения, т.е. прогиб в точке  $(x, y)$  вызванный единичной сосредоточенной силой приложенной в точке  $(\xi, \eta)$ ;

$$k(x - \xi, y - \eta) = \frac{1 - \nu^2}{\pi E} \cdot \frac{1}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} \quad (2)$$

Несмотря на большую общность такая модель линейно-деформируемого основания не охватывает, например, упругое анизотропное полупространство. Кроме того в случае действия на основание движущейся единичной силы функция влияния не будет выражаться в виде (3). Чтобы охватить случаи, подобные названным, для компонент матрицы - ядра основания Г.Я. Попов [2] принял такое выражение:

$$k_{jk}(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_{jk}(\xi, \eta) \cdot e^{-i\xi x - i\eta y} \cdot d\xi \cdot d\eta; \quad (j, k) = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Принимая различные выражения функции  $H_{jk}(\xi, \eta)$  можно получать все вышеперечисленные модели.

В теории расчета конструкций на грунтовом основании основное место занимают балки и плиты.

По размерам в плане они подразделяются на бесконечные, полубесконечные, четвертьбесконечные.

Расчет плит на грунтовом основании представляет более сложную задачу по сравнению с расчетом балок, так как для описания деформируемого состояния плиты используется бигармоническое уравнение изгиба срединной поверхности плиты:

$$D \left[ \frac{\delta^4 W}{\delta x^4} + 2 \cdot \frac{\delta^4 W}{\delta x^2 \delta y^2} + \frac{\delta^4 W}{\delta y^4} \right] + N_x \frac{\delta^2 W}{\delta x^2} + N_y \frac{\delta^2 W}{\delta y^2} = q(x, y) - p(x, y) \quad (4)$$

где:  $D$  - цилиндрическая жесткость плиты;

$W$  - прогиб плиты;

$N_x, N_y$  - погонные нагрузки приложенные в срединной плоскости плиты;  
 $q$  - внешняя нагрузка перпендикулярная срединной поверхности;  
 $p$  - реактивное давление грунта;

Данное уравнение решается совместно с уравнением определяющим зависимость между осадками и реактивными давлениями, при заданных граничных условиях. При расчете конструкций на Винклеровском основании решаются системы дифференциальных уравнений в обыкновенных или частных производных.

При расчете плит лежащих на упругом полупространстве задача еще более усложняется так как дифференциальное уравнение заменяется интегродифференциальным. При решении данных уравнений применяются различные приближённые методы, многие авторы применяют методы расчета удобные для реализации на ЭВМ. Л.П.Винокуров и др. применили к расчету плиты на упругом полупространстве метод конечных разностей. К числу дискретных методов расчета, помимо метода конечных разностей, относятся вариационно-разностный и метод конечных элементов.

Точные аналитические решения большинства задач расчета конструкций на деформируемом основании важны как эталон для оценки пригодности приближенных расчётов [3,4,5,6,7].

Задачи ещё более усложняются где в расчет включаются нагрузки действующие в срединной плоскости. Этой проблеме посвящено очень мало работ. Для полосы расположенной на слое конечной толщины имеется решение в работе А.Г.Ишковой [8]. Плиты на комбинированном основании рассмотрены в работе Б.Г.Корнева [1].

Нагружение продольными силами в срединной поверхности соответствует конструкциям выполненным из самонапряженного железобетона. При выполнении монолитной плиты из напрягающего бетона твердофазовое расширение последнего в условиях ограничения свободы деформаций приводит к деформированию арматуры [9]. В результате плита получает предварительное обжатие в двух направлениях. Таким образом помимо системы традиционных сил, воздействующих на конструкцию необходимо учесть сжимающие усилия от самонапряжения, действующие в срединной плоскости плиты (при условии симметричного положения ограничивающей арматуры). Величина сил обжатия, приложенных к конструкции определяется на основании методики [10]. Вопрос

сом, подлежащим анализу остается влияние дополнительных сил от самопроявления на работу конструкции под нагрузкой.

Рассмотрим свободнолежащую на упругом полупространстве плиту, нагруженную единичной сосредоточенной силой. Решив эту задачу мы будем знать функцию влияния для данной плиты. Имеем дифференциальное уравнение изгиба срединной плоскости (4). Уравнение выражающее равенство прогибов плиты и осадок основания с ядром для упругого полупространства записывается в виде:

$$W(x, y) = \frac{1 - \nu^2}{\pi \cdot E} \cdot \int_0^a \int_0^b \frac{P(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}}$$

Граничные условия на гранях при  $x=0$  и  $x=a$

$$M_x = -D \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) = 0; \quad Q_x = -D \left( \frac{\partial^3 W}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 W}{\partial y^2 \partial x} + (1 - \mu) \frac{\partial^3 W}{\partial y^2 \partial x} \right) = 0;$$

На гранях при  $y=0$  и  $y=b$

$$M_y = D \left( \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) = 0; \quad Q_y = -D \left( \frac{\partial^3 W}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 W}{\partial x^2 \partial y} + (1 - \mu) \frac{\partial^3 W}{\partial x^2 \partial y} \right) = 0;$$

Наиболее универсальным, хотя и одним из самых простых, способов решения дифференциальных уравнений при заданных граничных условиях является метод, основанный на замене производных, входящих как в дифференциальное уравнение, так и в граничные условия, соответствующими конечными разностями, что позволяет составить систему алгебраических уравнений.

Разностное уравнение изгиба срединной поверхности плиты при квадратной ячейке сетки принимает вид

$$\frac{D}{\lambda^4} (20 \cdot W_{i,k} - 8 \cdot (W_{i-1,k} + W_{i,k-1} + W_{i+1,k} + W_{i,k+1}) + 2 \cdot (W_{i-1,k-1} + W_{i-1,k+1} + W_{i+1,k-1} + W_{i+1,k+1}) - (W_{i-2,k} + W_{i,k-2} + W_{i,k+2} + W_{i+2,k})) = q_{i,k} - P_{i,r}$$

Разностные уравнения граничных условий принимают вид

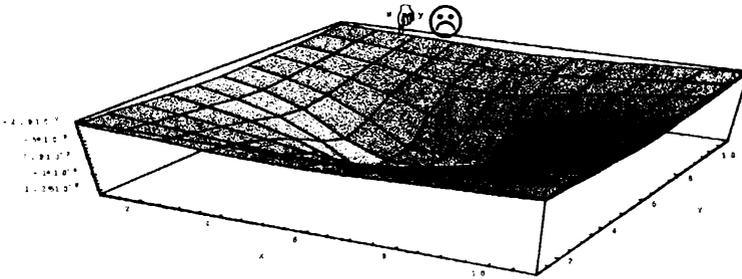
$$M_{i,k} = -\frac{D}{\lambda^2} (W_{i-1,k} - 2 \cdot W_{i,k} + W_{i+1,k} + \nu \cdot (W_{i,k-1} - 2 \cdot W_{i,k} + W_{i,k+1})) = 0;$$

$$Q_{i,k} = -\frac{D}{2 \cdot \lambda^3} (-W_{i-2,k} + 2 \cdot W_{i-1,k} - 2 \cdot W_{i+1,k} + W_{i+2,k} + (2 - \nu) \cdot (-W_{i-1,k-1} + 2 \cdot W_{i-1,k} - W_{i-1,k+1} + W_{i+1,k-1} - 2 \cdot W_{i+1,k} + W_{i+1,k+1})) = 0$$

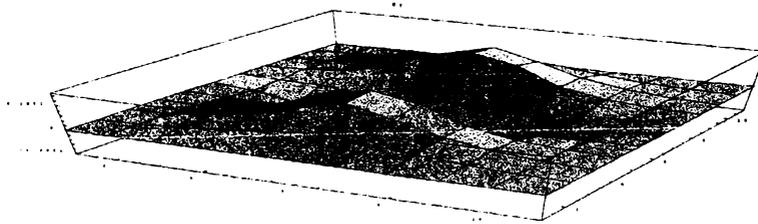
Для анализа влияния продольных сил на напряженно-деформированное состояние плиты была составлена программа расчета с помощью прикладного пакета "Mathematica".

Результаты расчетов показывают, что учет сил действующих в срединной плоскости (сил возникающих в плитах выполненных из самонапряженного бетона) уменьшает прогибы плиты, снижает максимальные значения изгибающих моментов при постоянной жесткости плиты.

Форма поверхности плиты при действии сосредоточенной нагрузки в центре.



Эпюра изгибающих моментов относительно оси "X"



#### Литература

1. Корнев Б.Г. Вопросы расчета балок и плит на упругом основании. Госстройиздат, М.; 1954 г.
2. Попов Г.Я. Изгиб полубесконечной плиты, лежащей на линейно-деформируемом основании. -ПММ, т.25, вып.2, 1961 г.
3. Жемочкин Б.Н., Силицын А.П. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании. -М, Стройиздат, 1984.
4. Woinowsky-Kriger S. Ueber die Biegung dünner rechteckigen Platten durch Kreislasten. Ingenieur Archiv, v.3, 1932.
5. Westergaard H.M. Stress concentration in plates loaded over small areas. Trans. ASCE, v.108, 1943.
6. Шехтер О.Я. К расчету фундаментных плит на упругом слое грунта конечной мощности. Сборник НИИ № 11 "Основания и фундаменты", 1948.

7. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. -М., Стройиздат, 1984.
8. Ишкова А.Г. Об изгибе изотропных и ортотропных пластинок на упругом основании Изв. ВУЗов "Строительство и архитектура", вып. XVII, 1969.
9. Михайлов В.В., Литвер С.С, Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные конструкции. М.: Стройиздат, 1976.
10. Пособие по проектированию самонапряженных конструкций к СНиП 2.03.01-84. М.: Стройиздат, 1986.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПЕНОГИПСА НА НОВЫХ ВИДАХ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Г.С.Галузо, О.В.Аргихович  
Строительный факультет, БГПА,  
г.Минск, Беларусь.

В статье изложены результаты исследования технологических параметров получения эффективного теплоизоляционного материала - пеногипса на новых видах пенообразователей.

Ключевые слова: пеногипс, пенообразователь, водогипсовое отношение, предел прочности, средняя плотность.

Перспективным направлением в области теплоизоляционных материалов является производство ячеистых бетонов.

По способу образования пористой структуры различают газобетонную и пенобетонную технологии изготовления ячеистых бетонов. В мировой практике преимущественное значение получили газобетоны, что объяснялось в первую очередь отсутствием стабильных, высокоэффективных, стандартных синтетических пенообразователей.

Ячеистая структура пеноматериалов формируется при пониженном поверхностном натяжении раствора, благодаря введению в них поверхностно-активных веществ - пенообразователей. Структура лучше, чем у газоматериалов: поры меньшего диаметра, равномерно распределены в объеме изделия, отсутствуют дефекты, а поверхность пор плотная и гладкая.

Таким образом, пенная технология получения ячеистой структуры бетона более технологична и проста, чем газовая, предусматривает применение невзрывоопасных и негорючих пенообразователей.

Технология приготовления неавтоклавных пенобетонов непрерывно совершенствуется. В связи с резко возросшей стоимостью строительных материалов большой интерес представляет применение более дешевых составляющих, характеризующихся пониженными материалоемкостью и расходом тепла при их изготовлении.

В первую очередь это относится к замене портландцемента гипсовым вяжущим, которое обладает рядом достоинств: высокой гигиеничностью, огнестойкостью, биостойкостью, обеспечивает благоприятный микроклимат в помещении. К тому же быстрое твердение гипса позволяет обойтись без значительных затрат энергии на тепловую обработку для получения изделий различного назначения.

Проблема получения пеногипса может быть решена при использовании новых видов пенообразователей. Постоянство физико-химических характеристик таких пенообразователей, возможность управления процессами структурообразования при введении их в небольших количествах, высокая пенообразующая способность позволяют создать с их помощью высокопористые гипсовые материалы.

Возможность создания оптимального структурного соотношения между твердой и газовой фазами в ячеистых бетонах является необходимым условием получения прочных материалов с высокой пористостью и малой теплопроводностью. При этом влияние поверхностно-активных веществ на свойства материалов в основном связано с получением наиболее максимально поризованных устойчивых смесей при наименьшей концентрации этой добавки в растворе, а роль вяжущего – это быстрая фиксация пористой структуры с тем, чтобы предотвратить развивающееся во времени постепенное укрупнение пузырьков и утолщение стенок перегородок.

Изменение объема воздушной пористости в пеносмеси возможно за счет варьирования концентрации поверхностно-активных веществ, водогипсового отношения, введения добавок, скорости и длительности перемешивания, типа смесительного аппарата, вида применяемого вяжущего и температуры смеси.

Учет влияния указанных факторов вызывает затруднение, так как они не только изменяются во времени, но и взаимодействуют между собой.

Нами экспериментально изучено влияние некоторых из них на реологические свойства пеногипсовой смеси и физико-механические свойства пеногипса, изготовленного на новых видах пенообразователей.

В проведенных исследованиях в качестве вяжущего применялся гипс марки Г-5 Минского гипсового завода. Для получения пеногипса применялись следующие виды пенообразующих веществ:

- N - окись амина по ТУ 6-01-1-396-88;
- смола древесная омыленная (СДО) по ТУ 13-05-02-83;
- средство для удаления масляных загрязнений (СУМЗ) по ТУ 6-01-1-456-92;
- пенообразователь CONFOAM (производства Англии).

Для обеспечения подвижности пеногипсовой смеси использовался суперпластификатор С-3 по ТУ 6-14-19-252-79.

Для ускорения твердения пеногипсовых образцов применялся ускоритель твердения полиметаллический водный концентрат (ПВК) по ТУ РБ 05891370-34-94.

С целью повышения водостойкости гипсовых изделий применялся гидролизный этилдихлорсилан (ГКЖ-94) в соответствии с ГОСТ 10834-76.

Для затворения гипсового вяжущего использовали питьевую воду по ГОСТ 23732-79.

Приготовление пены осуществлялось в металлическом цилиндрическом сосуде с помощью пеногенератора с числом оборотов 1450 в минуту.

Изучено влияние температуры воды и времени перемешивания пенообразующего вещества с водой на объем полученной пены. Опытным путем установлено оптимальное время перемешивания каждого вида исследуемого пенообразователя с водой и время введения гипсового вяжущего в приготовленную пену методом “сухой минерализации”.

Исследовано влияние водогипсового отношения на реологические свойства пеногипсовой смеси и физико-механические свойства пеногипса.

Для всех видов исследуемых пенообразователей выявлены следующие закономерности:

- обратная зависимость средней плотности пеногипса от водогипсового отношения при постоянном количестве пенообразователя;
- прямая зависимость подвижности пеногипсовой смеси от водогипсового отношения;

- обратная зависимость пределов прочности на сжатие и при изгибе от водо-гипсового отношения при постоянном количестве пенообразователя.

Определено влияние количества пенообразователей на сроки схватывания, подвижность пеногипсовой смеси и физико-механические свойства пеногипса.

Для пеногипса, изготовленного на каждом из исследуемых пенообразователей выявлены следующие закономерности:

- обратная зависимость подвижности от количества пенообразователя;
- прямая зависимость средней плотности пеногипса от количества пенообразователя;
- обратная зависимость предела прочности на сжатие и при изгибе от количества пенообразователя.

Исследована устойчивость пены к эффекту пеногашения при ее минерализации гипсовым вяжущим и влияние возраста приготовленного раствора пенообразователя на реологические свойства пеногипсовой смеси и физико-механические характеристики пеногипса.

Изучено влияние добавок (пластифицирующей - С-3, ускоряющей твердения - ПВК и повышающей водостойкость пеногипсовых изделий - ГКЖ-94) на свойства пеногипсовой смеси и пеногипса.

Определены оптимальные составы для изготовления пеногипсовых образцов на каждом из исследованных видов пенообразователей со средней плотностью  $300 \dots 500 \text{ кг/м}^3$ , пределом прочности на сжатие  $0,07 \dots 1,4 \text{ Мпа}$  и при изгибе  $0,11 \dots 0,51 \text{ Мпа}$ .

Стойкая технологическая пеногипсовая смесь получена при водо-гипсовом отношении  $0,7 \dots 0,8$  для всех видов пенообразователей.

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПЕНОПОЛИСТИРОЛГАЗОГИПСА И ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА.**

Г.Я.Данько, О.Г.Галузо, И.В.Чудук  
Строительный факультет, БГПА,  
г. Минск, Беларусь.

В статье изложена технология получения теплоизоляционных полистирол-газогипсовых плит повышенной водостойкости и их физико-механические свойства.

Ключевые слова: Плиты теплоизоляционные, пенополистиролгазогипс повышенной водостойкости, водостойкий газогипс.

Жилищная проблема в Беларуси в значительной мере решается за счет малоэтажного индивидуального строительства, что требует недорогих строительных материалов и простых технологий. Новые высокие требования по снижению энергозатрат в производстве стройматериалов и строительстве жилья в настоящее время ставят проблему разработки и широкого использования высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Разработанные в СНГ эффективные теплоизоляционные материалы по своим свойствам не уступают, а в ряде случаев превосходят зарубежные аналоги. Например: торфяные блоки и плиты, пенополистиролбетон и другие. Однако, низкие цены на сырье и энергоресурсы в прошлые годы не стимулировали разработку энергосберегающих технологий в производстве строительных материалов. Они не получили еще широкого распространения и сегодня. В настоящее время в Беларуси кирпич, цемент, реже дерево, являются самыми распространенными материалами в малоэтажном строительстве и самыми дорогими. Если при многоэтажном строительстве без цемента и кирпича чаще всего не обойтись, то при малоэтажном строительстве могут послужить и такие древние материалы как известь, глина, гипс и отходы производства. Из всего разнообразия рассмотренных материалов наиболее эффективными являются ячеистые и волокнистые, получаемые без термообработки. Анализ проведенных исследований и разработок в последние годы показывает, что одним из таких эффективных теплоизоляционных материалов может стать композиция на основе пенополистирола и гипсовой связки.

В Межотраслевой научно-исследовательской лаборатории новых строительных материалов БИПА разработан новый теплоизоляционный материал - пенополистиролгазогипс повышенной водостойкости.

Проведены исследования по изучению влияния на эксплуатационные свойства теплоизоляционных полистиролгипсовых плит таких технологических факторов, как марка (активность) гипсового вяжущего, водотвердое отношение, вид и плотность легкого заполнителя - пенополистирола (размер и форма гранул) и способы введения модифицирующих добавок, а также процессов смещения и формования. Исследования позволили определить основные технологические факторы и степень их влияния на основные физико-механические и эксплуатационные свойства теплоизоляционных полистиролгазогипсовых плит. Этими факторами являются: марка и вид гипсового вяжущего и полученный на его ос-

нове водостойкий газогипс (связующее) и вид, плотность и фракционный состав пенополистирола, а также их количественное соотношение и степень уплотнения (свободная укладка или с уплотняющим пригрузом).

Установленные зависимости позволяют с минимальными затратами и в короткое время получать оптимальные композиции формовочных смесей при различных видах исходных компонентов с заданными свойствами. Это было подтверждено экспериментально. Так например, на гипсовом вяжущем Рижского завода Г-5 П Б и пенополистирола фракции 5..10 мм, плотностью 10 кг/м<sup>3</sup> были получены образцы теплоизоляционных пенополистиролгазогипсовых материалов плотностью от 180 до 350 кг/м<sup>3</sup>.

Пенополистиролгазогипс получен как эффективный композиционный материал со следующей структурой: каркас из легких заполнителей, растворная часть – водостойкий гипсовый раствор с замкнутой ячеистой структурой. В качестве растворной части использован водостойкий газогипс, который получается на основе гипсового или смешанного вяжущего. Для получения ячеистой структуры и повышения водостойкости вводится комплексная газообразующая добавка, включающая гидравлические минеральные и органические компоненты. В полученную формовочную массу вводится заполнитель - пенополистирол. Применение в качестве заполнителя вспученного гранулированного пенополистирола или дробленого пенополистирола, полученного из отходов, позволяет получать новый строительный материал - теплоизоляционный пенополистиролгазогипс повышенной водостойкости.

Технология получения теплоизоляционных полистиролгазогипсовых плит повышенной водостойкости включает:

- получение комплексной газообразующей, гидрофобизирующей добавки путем смешивания цемента, извести и кремнийорганической добавки;
- приготовление смешанного вяжущего путем перемешивания и активации газообразующей добавки и гипсового вяжущего;
- приготовление формовочной смеси путем затворения водой смешанного гипсового вяжущего и введение легких заполнителей;
- формование изделий и распалубка через 2-3 часа;
- естественная или принудительная низкотемпературная сушка.

Вместо модифицированной добавки, содержащей портландцемент, кремнийорганическую жидкость и известь, может использоваться дисперсия ПВА до

5 % от массы гипсового вяжущего. Для экономии пенополистирола может использоваться макулатура в количестве до 2 % от массы полистирола.

Основное технологическое оборудование состоит из бункеров, питателей дозаторов, лопастного и шнекового смесителя, активатора истирающего действия, форм. Технологические установки могут быть стационарные или мобильные. Все оборудование выпускается в Республике Беларусь.

Физико-механические свойства получаемых теплоизоляционных пенополистиролгазогипсовых плит следующие:

Средняя плотность,  $\text{кг/м}^3$  - 150...350

Предел прочности при сжатии, Мпа - 0,2...0,4

Предел прочности при изгибе, Мпа - 0,1...0,3

Теплопроводность, Вт/(м .К) - 0,06...0,08

Водопоглощение по массе, % - 15...20

Сорбционная влажность, % - 0,7...1,4

Отпускная влажность, % - 12

Исходя из физико-механических свойств планируется выпускать теплоизоляционные плиты повышенной водостойкости пяти марок : 150, 200, 250, 300 и 350. По своим физико-механическим и другим свойствам теплоизоляционные полистиролгазогипсовые плиты соответствуют СТБ "Полистиролбетон"

Для производства теплоизоляционных пенополистиролгипсовых плит используется гипсовое вяжущее марок Г-5, Г-7.

По выполненным предварительным технико-экономическим расчетам определены эффективность и технологичность производства теплоизоляционных пенополистиролгазогипсовых плит повышенной водостойкости.

Разрабатывается проект технических условий "Плиты теплоизоляционные пенополистиролгазогипсовые повышенной водостойкости".

Простая технология изготовления теплоизоляционного пенополистиролгазогипса повышенной водостойкости, исключение тепловой обработки позволяют снизить трудозатраты и себестоимость изделий из этого материала и строительства в целом.

## ПОЛУЧЕНИЕ ГАЗОБЕТОНОВ БЕЗ ГАЗООБРАЗУЮЩИХ ДОБАВОК

Довнар Н.И., Довнар В.Ф.  
Строительный факультет, БПИ  
Брест, Беларусь

Показана возможность получения газобетона по технологии совмещающей перемешивание бетонной смеси и насыщения ее арматурным алюминием, выделяющимся при кавитационном разрушении специальной футеровки смесителя. Приведены эксплуатационные характеристики полученного по новой технологии газобетона.

Ключевые слова: газообразователь, кавитация, смеситель-активатор, диспергация, структура.

Ячеистые газо- и пенобетоны, сочетающие в себе конструктивные и теплозащитные свойства, заняли прочное место в ряду эффективных строительных материалов. Наибольшее распространение получили газобетоны, поровая структура которых формируется в результате газовыделения при взаимодействии добавки-газообразователя со щелочами раствора. В качестве газообразователя в основном применяют пигментную алюминиевую пудру ПАП, выпускаемую для лакокрасочной промышленности. Сырьем для пудры ПАП служит дорогой и дефицитный материал - первичный алюминий высоких марок. Как и всякий пигмент, алюминиевая пудра должна обладать высокой всплываемостью и укрупненностью, для чего в процессе размола ее частицы покрывают высокомолекулярными жирными кислотами в смеси с предельными углеводородами (75% стеариновой кислоты и 25% парафина). Эта операция предотвращает возможность взрыва при помолке алюминия из-за быстрой реакции окисления.

Применяя в качестве газообразователя гидрофобную пудру, заводы ячеистых бетонов вынуждены вводить дополнительную операцию: обработку пудры растворами ПАВ (хозяйственного мыла, авероли, опанола и др.) для придания алюминиевому порошку гидрофобных свойств. С этой целью оборудуется дополнительный пост подготовки суспензии алюминиевой пудры с объемным дозированием газообразователя, раствора ПАВ, щелочи и их перемешиванием. Водно-мыльно-алюминиевая суспензия готовится с запасом на всю смену работы. При хранении подготовленной суспензии наблюдаются случаи потери активности алюминием, разогрев суспензии в емкости, сопровождающийся выбросами газообразователя наружу. Таким образом, технология ячеистых бетонов не-

избежно включает взрывопожароопасный передел, требующий дополнительных расходов по обеспечиванию норм техники безопасности и пожарной защиты. Недостатком изложенного метода подготовки алюминиевой пудры является также необходимость ее стабилизации, так как газовыделение может начаться еще в суспензии, до использования в бетоне. Стабилизация вызывает пассивирование газообразователя и снижение его активности, что в свою очередь требует дополнительно вводить раствор щелочи NaOH [1].

Известны способы повышения активности алюминиевых газообразователей путем прокаливания порошка Al (удаление пассивного слоя с поверхности), увеличения начальных температур смеси и т.п.

Однако все перечисленные приемы усложняют технологию, увеличивают энергозатраты и не всегда способствуют получению качественного газобетона из-за колебаний активности газообразователя, трудности его равномерного распределения в объеме бетона при перемешивании из-за склонности к флокуляции и др.

В этой связи нами предлагается технология изготовления газобетона, не обладающая отмеченными выше недостатками. Отличительной особенностью предлагаемой технологии является совмещение процесса интенсивного перемешивания компонентов бетонной смеси и выделения дисперсионного алюминия с рабочих органов смесительного устройства, выполненных из алюминиевого сплава, например АЛ4. Смеситель-активатор газобетонной смеси, конструктивные особенности которого описаны в а.с. N1645167 [2], имели в зоне активного перемешивания внутреннюю футеровку из съемных колец из алюминиевого сплава и лопастный ротор, выполненный из того же сплава в виде рабочего колеса центробежного насоса.

Конструкция смесителя за счет высоких центробежных максимальных скоростей обеспечивает многократно повторяющееся движение потока смеси по спирали с резкими остановками и перепадами давлений, в результате чего возникают поочередно гидравлические напоры и разрежения, приводящие к росту воздушных пузырьков в смеси и их схлопыванию. Ударные волны при схлопывании пузырьков вызывают кавитационное разрушение футеровки смесителя и постушение алюминия в смесь. Количество диспергируемого алюминия регулируется изменением скорости движения потока смеси, толщины его слоя и временем обработки.

По мере выработки (износа) футеровки в зоне наиболее активного прохождения физико-химических процессов (кавитации и истирания) происходит ее перемещение в первоначальное положение за счет подпружинивающих упоров, а при критическом износе замена на новую.

Обработанная в смесителе газобетонная смесь отличалась от приготовленной по обычной технологии с газообразователем ПАП-1 большей растекаемостью на вискозиметре Сутторда и более ранним завершением процесса вспучивания при соблюдении единых первоначальных условий: состава смеси, В/Т и температуры. Значения контролируемых параметров смесей конструкционно-теплоизоляционного газобетона, имеющего состав по массе на 1 м<sup>3</sup> бетона: в кг, цемента - 210; извести - 85; песка -450; воды-440, приведем в табл. 1. В контрольный состав, приготавливаемый в обычном смесителе, вводилась суспензия алюминиевой пудры в количестве 0,45 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона, приготовленная на подогретом до 40<sup>0</sup>С растворе хозяйственного мыла, бетон, получаемый по новой технологии, затворялся обычной водой. В исследованиях использован шлакопортландцемент М400, известь-кипелка активностью -82% и скоростью гашения 14 мин. В опытах использовался мелкозернистый кварцевый песок с М<sub>р</sub>=1,05. Время перемешивания контрольного состава в обычном смесителе составляло 2,5 мин, время перемешивания бетонной смеси по новой технологии подбиралась и равнялась 4 мин.

Физико-механические показатели испытаний изготовленных образцов кубов 10х10х10 см, твердевших в условиях паротепловой обработки по режиму 3+4+10+3 при температуре изотермического прогрева 95<sup>0</sup>С приведены в табл.2.

Таблица 1

Характеристика бетонной смеси

Способ приготовления	Начальная температура, <sup>0</sup> С	Распływ смеси, см	Время окончания газовойделения: мин	Температура смеси по окончании газовойделения, <sup>0</sup> С
Контрольный состав с добавкой ПАП-1	32	21	28	31
По технологии без газообразователя	21	24	20	26

Физико-механические свойства газобетонов

Способ приготовления	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии МПа	Водопоглощение по массе, %	Средний радиус капилляров, мм	Коэффициент однородности пор	Коэффициент водостойкости
С добавкой ПАП-1	720	5,3	57	0,46	0,22	0,59
Без добавки газообразователя	726	6,8	43	0,31	0,56	0,70

Анализ результатов испытаний бетонов показывает, что газобетон, полученный по новой технологии обладает повышенной прочностью по сравнению с бетоном с добавкой ПАП-1 природной и той же средней плотности бетона. Это обусловлено более совершенной структурой бетона с равномерно распределенной, дисперсной, замкнутой пористостью, большей прочностью межпоровых перегородок за счет активизации цемента при интенсивном смешивании бетонной смеси в смесителе-активаторе.

Таким образом, выполненные исследования показывают возможность получения газобетона высокого качества по нетрадиционной, более простой технологии, что выгодно повлияет на экономику производства, обеспечивает безопасные условия труда на технологической линии производства газобетонных изделий.

#### Литература

1. Производство ячеистых бетонов. - Промышленность автоклавных материалов. Обзорная информация/ВНИИЭСМ.М., 1983, вып.2.
2. А.С. 1645167. СССР. Смеситель. Авт. изобр. Довнар Н.И., Довнар В.Ф. Оpubл. в Б.И., 1991, N16.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИЛИКАТОПОЛИМЕРНОГО БЕТОНА НА СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛАХ, ПРОИЗВОДИМЫХ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

А.А. Дрозд, Н.Л.Полейко, Г.Ф. Новик

Факультет дорожного строительства,

Белорусская государственная политехническая академия

г.Минск, Беларусь

Рассмотрена возможность замены наполнителя при изготовлении силика-тополимерного бетона на аглопоритовую пыль и пылевидный кварц для футеровки дымовых труб.

Ключевые слова: силикатополимербетон, наполнитель, жидкое стекло.

Кислотоупорные растворы и бетоны (силикатополимербетоны) на основе жидкого стекла нашли широкое применение для футеровки специальных сооружений и возведения различных аппаратов и емкостей на химических предприятиях, электрохимических, целлюлозно-бумажных производствах и в других отраслях промышленности.

Силикатополимербетон успешно применяется для футеровки дымовых труб, эксплуатируемых в агрессивной среде с высоким содержанием сернистого газа.

При возведении железобетонной дымовой трубы на Минской ТЭЦ-5 для мо-литной футеровки лабораторией высотных и специальных сооружений ВНИПИ-Гешлопроект был рекомендован следующий состав силикатополимербетона: расход составляющих на 1 м<sup>3</sup> бетона) - жидкое стекло- 330 кг., кремнефтористый натрий- 50 кг., тонкомолотый наполнитель - 400 кг., керамзитовый гравий- 320 кг., уплотняющая добавка (ацетон-формальде-гидная смола) - 15 кг.

Подвижность бетонной смеси должна быть 6-8 см по осадке стандартного конуса (ГОСТ 11061)

Удобоукладываемость бетонной смеси должна сохраняться в течение 40-60 мин при температуре 20 °С.

По своим физико-техническим характеристикам силикатополимербетон должен соответствовать следующим требованиям:

- плотность в высушенном состоянии 1500-1700 кг/м<sup>3</sup>.
- Класс бетона по прочности на сжатие В 12,5 (ГОСТ 26633),
- водопоглощение не более 5% (ГОТ12730),



Особый интерес представляло влияние степени обжига аглопорита на его кислотостойкость (Табл 3).

Таблица 3

Влияние степени обжига аглопорита на его кислотостойкость

Классификация обжига	Кислотостойкость, %
Повышенной интенсивности	97
Нормальной интенсивности	94
Недостаточно обожженный	39

Основные физические характеристики аглопоритовой пыли:

- истинная плотность- 2600 кг / м<sup>3</sup>.
- насыпная плотность- 980-1000 кг/ м<sup>3</sup>.,
- удельная поверхность- 2600 см<sup>2</sup>/г.

Таким образом, на основании полученных данных, применение аглопоритовой пыли, полученной из нормально обожженного аглопорита в качестве кислотостойкого наполнителя возможно.

Одновременно исследовалась возможность применения в качестве тонкокомлового наполнителя пылевидного кварца производства Гомельского горно-обогатительного комбината.

Химический состав пылевидного кварца представлен в табл.4

Таблица 4

SiO	AlO	FeO	CaO	MgO	п.п.п.	Кислотостойкость, %
95,0	3,0	-	0,3	0,1	1,6	99,0

Основные физические характеристики пылевидного кварца:

- истинная плотность- 2750 кг/м<sup>3</sup>.,
- насыпная плотность- 1100- кг/м<sup>3</sup>.,
- удельная поверхность- 2800 см<sup>2</sup>/г.

Исходя из данных химического анализа и основных физических характеристик, можно сделать вывод о его применимости в качестве кислотоупорного наполнителя для силикатополимербетона.

Необходимо отметить, что несмотря на незначительные колебания кислотостойкости и химического состава наполнителей, свойства получаемых на их основе кислотоупорных материалов существенно отличаются, что обусловлено различной степенью помола и характером поверхности наполнителей 1.

В связи с этим необходимо было провести сравнительные испытания основных свойств силикатополимербетонов, полученных на основе предлагаемых материалов.

В условиях и на оборудовании отраслевой научно-исследовательской лаборатории модифицированного бетона Белорусской государственной политехнической академии были подобраны составы с учетом свойств имеющихся материалов и требований, предъявляемых к силикатополимербетону.

При проведении экспериментов использовали материалы со следующими характеристиками:

1. Жидкое стекло Орпанского комбината строительных материалов по ГОСТ 13078 (плотность -  $1,4 \text{ г/см}^3$ , 28,6%, , силикатный модуль - 2,9, ).
2. Кремнефтористый натрий - ГОСТ 87-77 .
3. Песок кварцевый речной - ГОСТ 8735 с модулем крупности - 3,16.
4. Керамзитовый гравий ГОСТ 9759,9757 Петриковского завода фракции 5-10мм., с насыпной плотностью -  $580 \text{ кг/м}^3$ . и прочностью при сдавливании в цилиндре 2,8 МПа, что соответствует марке П 125.
5. Ацетоно-формальдегидная смола - ТУ 64-11-11-88.

Составы и соответствующие им расходы составляющих приведены в табл.5.

Таблица 5.

Составы силикатополимербетонов

Состав 1	Состав2
Жидкое стекло - 330 кг.	Жидкое стекло - 250 кг.
Кремнефтористый натрий -51 кг.	Кремнефтористый натрий - 40 кг.
Аглопоритовая пыль - 265 кг.	Пылевидный кварц - 280 кг.
Керамзитовый гравий - 330 кг.	Керамзитовый гравий - 330 кг.
Песок кварцевый - 610 кг.	Песок кварцевый - 600 кг.

Примечание: 1) Уплотняющая добавка - ацетоно-формальдегидная смола АЦФ-3М-65 составляла 3% от массы жидкого стекла.

2) Подвижность бетонной смеси по ГОСТ 10181.1 назначалась 10-12 см.

Приготовление силикатополимербетонной смеси производили в лабораторной бетономешалке. Загрузка бетономешалки осуществлялась в следующей последовательности: керамзитовый гравий и песок перемешиваются с 1/2-2/3 частями требуемого для замеса количества жидкого стекла, затем загружается

тонкомолотый наполнитель, предварительно перемешанный с кремнефтористым натрием. После дополнительного перемешивания смеси в течении 2-3 мин. Добавляется остальная часть жидкого стекла с разбавленной в нем АЦФ. Уплотнение образцов производилось на лабораторной виброплощадке в течении 40-60 с. Образцы хранились в воздушно-сухих условиях 1 сутки ( при температуре 15 °С) после чего распалубливались и подвергались тепловой обработке по следующему режиму: подъем температуры до 50 °С (скорость подъема температуры 20 °С/час)-1,5 часа, выдержка при температуре 50 °С -12 часов, остывание -3 часа.

Основные физико-технические характеристики силикатоплимербетона представлены в табл.6.

Таблица 6

Характеристики	Состав 1	Состав 2
Плотность в сухом состоянии кг/м <sup>3</sup> .	1570	1650
Прочность бетона на сжатие Мпа	14,0	16,5
Водопоглощение,%	7,0	6,5
Коэффициент химической стойкости	0,95	0,95
Теплопроводность , Вт/м К	0,54	0,7
Воздушная усадка, мм/м	1,5	1,2
Водостойкость,%	87	91

Полученные результаты позволили сделать выводы о предпочтительном использовании в качестве наполнителя для силикатоплимербетона пылевидный кварц и рекомендовать состав с его применением для возведения монолитной футеровки при строительстве дымовой трубы на ТЭЦ 5.

#### Литература

1. Субботкин М.И., Курицина Ю.С.. Кислотоупорные бетоны и растворы. Изд. лит-ры по стр-ву.М., 1967.

# ГЛАЗУРОВАННЫЕ ФОСФАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

А. А. Зайцев

Строительный факультет, БПИ

г. Брест, Беларусь

Исследована возможность получения стекловидных покрытий на фосфатных материалах. Установлено, что требованиям глазурирования удовлетворяет перлитофосфат, связующим в котором является алюмохромфосфорная связка, а заполнителем перлитовый песок. Средняя плотность перлитофосфата составляет  $650-700 \text{ кг/м}^3$ , прочность на изгиб - до 2 МПа. Более высокие прочностные показатели (до 15 МПа) имеет перлитофосфат со средней плотностью  $1500 - 1600 \text{ кг/м}^3$ . Разработан технологический регламент для глазурирования.

Ключевые слова: фосфатные материалы, глазурирование, глазури, эмали, температура обжига, покрытия.

Материалы на фосфатных связующих представляют интерес как основа для получения глазурированных материалов различного назначения.

Композиты с использованием этих связующих разнообразны и обладают уникальным комплексом свойств: низкой средней плотностью (от  $300 \text{ кг/м}^3$  и более), высокой теплоустойкостью, низким коэффициентом теплопроводности (от  $0.05 \text{ Вт/м}$  и более) и достаточно высокой прочностью. Они применяются в качестве теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных изделий, огнеупоров и др. [1]. Брестским строительным трестом №8 выпускаются перлитофосфогелевые изоляционные плиты со средней плотностью  $200-300 \text{ кг/м}^3$ .

В качестве фосфатных связующих используют ортофосфорную кислоту, алюмофосфатные (АФС) и алюмохромфосфатные (АХФС) композиции и др. [ ].

Заполнителями могут служить разнообразные материалы, включая попутные отходы промышленности (трепел, различные шлаки, отходы асбеста и др.)

При этом прочность на сжатие конструкционных материалов со средней плотностью около  $1400 \text{ кг/м}^3$  достигает 50 МПа.

Технология производства фосфатных материалов проста и включает в себя совместный сухой помол компонентов, смешивание полученного порошка с фосфатной связкой, полусухое прессование и термообработка при температуре  $400^\circ\text{C}$ . Себестоимость фосфатных материалов невелика.

Вышесказанное позволяет рассматривать материалы на фосфатных связующих как перспективные композиты для нанесения стекловидных покрытий.

При этом необходимо было выполнить комплекс исследований как по определению оптимальных композиций фосфатных материалов, так и специальных составов для их покрытий, так как предварительными опытами нами установлено, что их коэффициент термического расширения (КТР) низок и составляет всего около  $60 \cdot 10^{-7} \cdot \text{град}^{-1}$ . В то же время керамические материалы, для которых используются известные глазури, имеют КТР не ниже  $100^{-7} \cdot \text{град}^{-1}$ . Температуры их оплавления высоки (до  $950-1000^\circ\text{C}$ ).

Предварительные составы исследованных композитов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование материала	Содержание компонентов, масс. %							
	Перлитовый песок фракции 0-3	Перлит тонко молотый	Ортофосфорная кислота	АХФС	Цемент М400	Жидкое стекло	Зола-унос	Вода
Цементоперлит	40	—	—	—	20	—	—	40
Фосфоперлит	47	20	25	—	—	—	—	8
Перлитофосфат	55	—	—	37	—	—	—	—
Перлитогель	25	25	—	—	—	50	—	—
Золоперлитофосфат	54	—	—	18.5	—	—	20.5	—
Перлитофосфат №2	—	20	—	20	—	—	—	—

Свойства исследованных материалов представлены в табл. 2

Таблица 2

Свойства	Наименование материалов				
	Перлито-цемент	Перлито-фосфат	Перлитогель	Фосфоперлит	Золоперлит
Показатель рН	9.96	2.28	12.0	2.2	6
Средняя плотность, $\text{кг/м}^3$	700	690	680	620	468
Плотность, $\text{г/см}^3$	2.25	2.22	2.22	2.22	—
Пористость, %	69.9	68.2	69.2	72	—
Прочность при изгибе, МПа	3.34	2.3	2.73	—	1.1

Исследование дегидратации указанных материалов свидетельствует о том, что характер процесса зависит от природы материала и температуры нагрева. Значительную часть влаги материалы теряют при нагреве до температуры  $300^\circ\text{C}$ . Наиболее интенсивно при этой температуре протекает дегидратация перлитофосфата

(теряется до 77 % влаги), в наименьшей степени – перлитофосфогеля (улетучивается около 32 % влаги). При нагреве до температуры 700°C потери влаги у всех исследуемых материалов выравниваются и находятся в пределах 64–85 %. Наибольший процент остаточной влаги (около 32 %) присущ фосфатоперлиту, а у остальных материалов остаточная влага составляет 15–16 %. Однако этого количества связанной влаги достаточно, чтобы деструкционные процессы, происходящие при нагревании до 700°C, заметно не снизили прочность перлитофосфата (она уменьшилась всего на 9 %) Прочность перлитогеля и перлитоцемента уменьшается более существенно: на 44 и 54 % соответственно. Наиболее высокой теплостойкостью обладает золоперлитофосфат, прочность которого не уменьшается. Однако начальная прочность его низка (1.1 МПа). Вместе с тем введение в композиты оптимального количества золы-уноса, не приводящего к потере прочности формуемых материалов перспективно.

Таким образом, для целей глазурования наиболее перспективными представляется перлитофосфатные композиты. Теплостойкость этих материалов на аллюмохромфосфатой связке обусловлена ее высокой термодинамической стабильностью [1]. Однако при более высоких температурах (850°C) прочность перлитофосфата уменьшается на 20 %. При этом существенно возрастают среднеквадратичное отклонение (почти в 3 раза) и в 4 раза коэффициент вариации. Такой разброс прочности очевидно связан с низкой теплопроводностью материала и образованием в нем в связи с этим напряжений при нагревании, обуславливающих возникновение микротрещин.

Из полученных результатов следует, что температура глазурования перлитофосфатных материалов со средней плотностью 700 кг/м<sup>3</sup> не должна превышать 800°C. При этом определенное влияние на прочностные показатели могут оказывать скорость нагрева и охлаждения. В связи с этим исследовано влияние различных параметров нагрева и охлаждения композитов. Установлено, что режимы термической обработки в определенной степени сказываются на прочности. При нагревании до 700–800°C и медленном охлаждении до 300–400°C возможно даже повышение прочности перлитофосфата в среднем на 20 %.

Представляло также интерес исследовать свойства перлитофосфата с более высокой средней плотностью (1500–1600 кг/м<sup>3</sup>). Прочность такого материала на изгиб возрастает до 13–14 МПа, т. е. при повышении плотности в два раза она возрастает в 6 раз. Уплотненный перлитофосфат имеет также более высокую

теплостойкость: прочность при нагревании до 770–800°C уменьшается всего лишь на 5 %.

Синтез специальных стекловидных покрытий с необходимым комплексом свойств для новых материалов представляет сложную научно-техническую задачу. На первом этапе нами испытан ряд известных эмалей и глазурей с низкими температурами обжига (не выше 850°C). Большинство из этих покрытий хорошо растекаются на поверхности перлитофосфата, однако после обжига в них отчетливо просматривается сетка трещин ("цека"). Это свидетельствует о том, что КТР покрытий превышают КТР подложки.

В результате поисковых работ отобрано несколько глазурей (эмалей), образующих плотное остеклованное покрытие (без "цека"). К ним относятся силикоборатные, свинцовоборатные составы.

На этапе опытного освоения технологии глазуирования фосфатных материалов могут быть использованы глазури ЛГ–19 и РМ–2, которые изготавливаются Минским фарфоровым заводом. Минимальная температура обжига этих покрытий, при которой они еще растекаются, составляет 820°C. Глазури при этой температуре формируются в плотное остеклованное без "цека" покрытие. Для той цели могут быть использованы эмали, предназначенные для изготовления темалита (эмалированное стекло). Эти эмали обжигаются при температуре 600–620°C, что исключает снижение прочности фосфатного материала. Перспективны также разработанные нами эмали в цинкоборатных и некоторых других системах [2]

Таким образом, разработана технология получения новых эффективных дшелочных глазурированных материалов различного назначения, в том числе с двояременной функцией теплозащиты, Приведенные затраты на их изготовление и эксплуатацию на 40 % меньше по сравнению с керамическими глазурированными.

#### Литература

Копейкин В.А. Фосфатные материалы в строительстве. – В кн.: Всесоюзный семинар. Производство и применение в строительстве фосфатных материалов. – М., 1983 с3–5

А. с. 1279975 (СССР). Стекло для покрытия. Авт. В.Л. Жоров и А.А. Зайцев. – Оpubл. в Б.И, 1986, №48

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛАЗУРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ С ЦЕМЕНТНОЙ ОСНОВОЙ

А.А. Зайцев

Строительный факультет, БПИ  
Брест, Беларусь

Отделочные материалы со стекловидными покрытиями имеют ряд преимуществ и представляют большой интерес для современного строительства. Целесообразно расширение их номенклатуры путем использования новых и традиционных материалов.

Исследованы процессы формирования стекловидных покрытий (глазури) на цементных основах. Методами дифференциально-термического анализа установлены температурные интервалы с интенсивными эндоэффектами, обусловленными выделением свободной и связанной влаги. На основе полученных результатов предложены способы глазурирования. Изготовлены и смонтированы глазурированные асбестоцементные листы в качестве экранов балконов жилого дома. Опыт их эксплуатации в течение 12 лет положительный.

Ключевые слова: облицовочные материалы и изделия, стекловидные покрытия, глазури, эмали.

Требования к архитектурной выразительности зданий, их долговечность сохранению на протяжении многих лет эксплуатации внешнего вида обуславливают применение эффективных отделочных материалов, обладающих высокими строительными свойствами. В этой связи важнейшим направлением является разработка облегченных, долговечных материалов с широкой цветовой гаммой, невысокой стоимостью и минимумом эксплуатационных затрат. Эти требованиям, в определенной степени, отвечают материалы со стекловидными покрытиями (типа эмалей, глазури). Они долговечны: при сроке эксплуатации 50-80 лет сохраняют свои первоначальные качества. Однако преимущества и делий со стекловидными покрытиями в полной мере не реализуются ввиду ряда недостатков, присущие материалам (подложкам), на которые наносятся покрытия. Они традиционно ограничиваются керамическими материалами.

Вместе с тем имеется ряд материалов, которые по своим свойствам могут служить подложкой для получения эффективных изделий со стекловидным слоем различного назначения. Из этих материалов несомненный интерес представляют композиции на фосфатных вяжущих, растворимом стекле и др. Перспек-

тивны в качестве подложек и материалы цементных вяжущих. Интерес к глазурованию цементных материалов, в том числе асбестоцемента, проявляется в Японии [1].

Указанные материалы по своим свойствам отличаются от керамических. Вследствие этого необходима комплексная разработка как специальных стекло-видных покрытий с низкой температурой обжига, так и технологии их глазурования. В этой связи нами исследованы процессы, происходящие при нагреве в некоторых из этих материалов и их влияния на свойства.

В качестве модели материала на цементном вяжущем использовали асбестоцемент, изготовленный различными предприятиями. Предварительными исследованиями методом дифференциально-термического анализа (ДТА) нами установлено, что определяющее влияние на физико-химические процессы при нагревании асбестоцемента, важные с точки зрения его глазурования, оказывает цементный камень. Очевидно, такой же характер физико-химических процессов в общем присущ и другим цементным материалам с высоким содержанием вяжущего.

Исследовали асбестоцемент Ахмянского, Кричевского, Волковыского, Воскресенского и Пикалевского комбинатов. С целью увеличения теплостойки часть образцов пропитывали растворами полифосфата натрия, жидкого стекла, алумохромфосфатной связки.

Установлено, что для последних четырех вышеуказанных видов асбестоцемента характерны общие закономерности хода кривых ДТА. Три глубоких эндозффекта проявляются при температуре: 400-480<sup>0</sup>С, 620-640<sup>0</sup>С и 770-790<sup>0</sup>С. Вместе с тем кривая ДТА асбестоцемента Пикалевского комбината имеет два небольших дополнительных эндозффекта. Это обусловлено использованием в этом асбестоцементе нефелинового вяжущего. Пропитка асбестоцемента вышеуказанными растворами определенным образом сказывается на характере кривых ДТА. Все три компонента уменьшают интенсивность эндозффектов в температурном интервале 470-485<sup>0</sup>С, а растворимое стекло и полифосфат натрия смещают третий эндозффект в область более высоких температур (с 750<sup>0</sup>С до 770-780<sup>0</sup>С).

Наибольшая интенсивность потери массы согласно термогравиметрическим данным (ТГ) наблюдается при нагреве выше 500-550<sup>0</sup>С. При достижении этой температуры плавный ход кривой резко изменяется и потери массы в интервале температур 500-750<sup>0</sup>С достигают 0,3 %<sup>0</sup>С.

Резкая потеря массы в температурном интервале 500-800<sup>0</sup>С, обусловленная улетучиванием кристаллизационной воды, приводит к деструкционным процессам в материале и, следовательно, к снижению его прочности. Так, найдено, что нагреванием листового асбестоцемента при температуре 500-550<sup>0</sup>С уменьшается его прочность на изгиб на 5-20% при температуре 600<sup>0</sup>С - на 40-50%, при температуре 700-800<sup>0</sup>С - на 85-95%.

Выполненные исследования позволили разработать технологию глазурования цементных материалов.

Технология глазурования материалов с цементной основой отражена в авторском свидетельстве [ 2 ]. Эти способы предусматривают медленное выделение свободной и связанной влаги в температурных интервалах ее наиболее интенсивного выделения, что обеспечивает получение материала с достаточно высокой прочностью и качественным стекловидным покрытием. По одному из способов изделия предварительно нагревают в печи со скоростью подъема температуры 3-10<sup>0</sup>С/мин. до температуры 300-400<sup>0</sup>С и изотермически выдерживают в течение 1-2 ч. Затем их охлаждают, пропитывают растворимым стеклом, высушивают и наносят суспензию шликера эмали (глазури). При этом последующий нагрев с нанесенным слоем проводят со скоростью подъема температуры в печи не более 3-10<sup>0</sup>С/мин. до температуры остеклования нанесенного слоя.

Один из разработанных способов предусматривает двухстадийный предварительный нагрев изделия с подъемом температуры на первой стадии до 150-200<sup>0</sup>С, изотермической выдержке при этой температуре в течение 5-30 мин., последующего нагрева до 380-450<sup>0</sup>С и изотермической выдержке при этой температуре в течение 5-30 мин. По следующему способу с целью экономии энергозатрат и сокращения числа операций тепловая обработка материала может быть совмещена с процессом нагрева при оплавлении стекловидного слоя.

По разработанной технологии изготовлены глазурованные асбестоцементные листы размером 400х400 мм для экранов балконов жилого дома в г.Узда Минской области. В качестве покрытий использованы легкоплавкие эмали с температурой обжига не превышающей 550<sup>0</sup>С. В течение 12 лет эксплуатации видимых изменений в покрытиях не обнаружено: блеск и цвет их не изменились.

### Литература

1. Заявка N56-50183 (Япония). Способ получения глазурированных цементных плит /Кубота Тэко К.К., Авт. Хоси Суюро, Тэрямото Хироси. - Заявл. 26.09.79, N54-124 399; кл G04B 41/32 - Огуб./Реф. Журн. "Химия", сер.19M "Силикатные материалы", 1982, N13.
2. А.С. 1188150 (СССР). Способ глазурирования материалов на основе гидравлических вяжущих/ Авт. А.А.Зайцев, Е.Г.Масловский, И.П.Сергиевич и др. - Б.И., 1985, N40.
3. А.С. Способ получения покрытий на асбестоцементе /Авт. А.А.Зайцев, Е.Г.Масловский. - Б.И., 1988, N9.
4. А.С. Способ получения защитно-декоративного покрытия на композиционном листовом материале на основе гидравлического вяжущего / Авт. Зайцев А.А., Е.Г.Масловский, И.П.Сергиевич. - Б.И., 1985, N37.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

А.М.Зеленский

Строительный факультет, БПИ

г. Брест, Республика Беларусь

Даны рекомендации по повышению точности геометрического нивелирования в условиях возмущающих воздействий. Приведены рекомендации по определению осадок без создания специальной высотной основы.

Производственными и научными организациями накоплен большой опыт определения вертикальных смещений различных объектов геодезическими методами. Однако геодезические работы при реконструкции зданий и сооружений имеют свои особенности. Часто эти работы приходится делать при наличии сильных возмущающих воздействий (турбулентности воздуха, вибрации, резких перепадов температур, плохой освещенности и т.д.), с одной стороны. С другой стороны, для вертикальных смещений реконструируемых сооружений, часто невозможно или не выгодно строить высотную основу, что существенно затрудняет определение вертикальных перемещений.

Для научно обоснованного совершенствования геодезических измерений осадок сооружений и зданий необходимо выделить основные достижения в этой области и наметить пути повышения точности геодезического контроля в

условиях влияния указанных воздействий и без создания специальной высотной основы.

Цель данной статьи - рассмотреть особенности геодезических измерений в условиях возмущающих воздействий применительно к реконструируемым сооружениям и дать рекомендации по разработке наиболее важных направлений геодезического контроля реконструируемых сооружений. При этом в значительной мере использован производственный опыт работы автора на атомных электростанциях и промышленных предприятиях.

Прежде всего следует отметить две главные особенности производства геодезических работ на площадке.

Во-первых, это требование достаточно высокой точности измерений, которая часто характеризуется малыми величинами. Так, при определении осадок зданий, геометрическое нивелирование должно осуществляться с погрешностью 0.3 - 0.5 мм при расстояниях между точками измерений до 10 - 15 м; определение осадок без создания основы с погрешностью 0.5 - 1.0 мм.

Во-вторых достижение высокой точности измерений, как правило требует ся в сложных условиях действующего объекта. При этом возникают следующие основные задачи.

1. Выполнение исследований по обоснованию норм точности, что требует знаний технических характеристик, принципа работы и технологических допусков оборудования.
2. Производство работ в условиях влияния вибрации, турбулентности воздуха, резкого перепада температур, стесненных условий, вредных воздействий шума, плохой освещенности и т.д., которые сказываются на сосредоточенности наблюдателя. Весь комплекс существенно оказывает влияние на точность работ.
3. Цикличность выполнения работ, что требует одновременного привлечения многих исполнителей и дополнительных затрат.

При геодезических измерениях, предшествующих реконструкцию сооружений кроме общеизвестных погрешностей геодезических измерений имеют место специфические погрешности, связанные с условиями возведения и эксплуатации данных сооружений. К ним относятся:

- турбулентность воздуха, возникающая в следствии работы турбоагрегатов вентиляторов, мощных насосов, что приводит к амплитуде колебаний визирных целей в среднем на 10-15";

- существенное влияние перепада температур на технические параметры геодезических инструментов, что приводит к быстрому изменению главного условия нивелира, длины шкалы инварных реек, преломлению визирного луча по высоте при переходе его из одной среды воздуха в другую;
- влияние горизонтальной и вертикальной вибрации основания на устойчивость нивелира, приводящей к расплыванию изображения штрихов рейки, хаотичному изменению пузырька уровня;
- возможность повышения шума и плохой освещенности оказывает психологическое воздействие на наблюдателя и обуславливает увеличение темпа измерений, применение менее точной методики, но более безопасной. Вследствие этого ухудшается точность измерений.

Наши исследования и практический опыт работы показывает, что данные воздействия без принятия специальных мер приводят к увеличению погрешности измерений в 3–4 раза по сравнению с обычными условиями работ. Поэтому постановка высокоточного геометрического нивелирования должна производиться в два этапа. На первом этапе необходимо изучить погрешности измерений в конкретных условиях обычными приборами и методиками наведения, совмещения, степень влияния фактора возмущения. На втором этапе, используя полученные результаты исследований, выбирается методика измерений, уменьшающая влияние возмущающих факторов.

Развивая общеизвестные принципы повышения точности измерений, наметим наиболее первостепенные направления и способы повышения точности в условиях действия названных факторов.

1. Разработка и внедрение новых приборов и устройств с учетом возмущающих факторов: нивелиров типа Н-05 с антивибрационными насадками на зрительную трубу, биметаллических марок, реек, позволяющих учитывать изменение температуры и т.д.
2. Выбор наиболее приемлемых условий наблюдений - постоянного режима температур, времени года и суток, учета влияния воздушных потоков, сквозняков и т.д.
3. Уменьшение длин визирных лучей.
4. Привлечение к работе исполнителей, проработавших в конкретных условиях не менее 1 года, и т.д.

Учет этих рекомендаций позволит осуществить повышение точности измерений даже в условиях влияния возмущающих факторов.

Другой не менее важный вопрос определения осадок марок, заложенных в фундаменте сооружений, без создания специальной высотной основы.

При такой постановке вопроса нивелирование следует выполнять в виде замкнутых ходов и полигонов. В первом цикле нивелирования за исходную можно взять любую из нивелируемых марок относительно которой вычисляются отметки всех марок. В последующих циклах измерений следует выполнить исследование стабильности высотного положения марок и брать за исходную марку, которая по результатам исследований оказалась наиболее устойчивой.

Исследование устойчивости сводится к разделению полученных из наблюдений данных на собственно смещения и возможные погрешности их определения и в сравнении этих величин между собой. Если полученные смещения с наперед заданной вероятностью превышают погрешности, то их с данной вероятностью принимают за действительные смещения марок; в случае когда смещения меньше погрешностей, марки считаются не изменившими своего высотного положения. При этом выявление смещений или подтверждение стабильности марок является относительным, так как сравнивается изменение взаимного положения равноточных по устойчивости марок. Поэтому задача оценки устойчивости марок и выбора исходной не имеет единственного решения. Можно сформулировать требования общего характера, под условием выполнения которых следует решать заданную задачу.

1. Выбор в качестве исходной марки, сохранившей неизменным свое высотное положение, должны производиться в каждом цикле нивелирования.
2. Практическим решением должно быть однозначное указание, какую марку следует выбрать в качестве исходной. Неопределенность решения затруднит его практическое использование.
3. Должна быть минимальной возможность грубой ошибки, т.е. принятие в качестве исходной марки, получившей значимое по величине смещение. Выполнение этого условия способствует наглядности решения, когда имеется возможность проанализировать полученные величины, установить их взаимосвязь и сопоставить с другими данными, характеризующими действие предполагаемых причин возникновения смещения марок.

С позиции изложенных требований наиболее приемлемыми являются способы Зеленского А.М. [1], А.Костахела [2], И.В.Рунова [3].

В этих способах анализ выполняется по группам. В одну группу объединяются все превышения относительно определенной марки, например, 1-2, 1-3, 1-

4, и т.д. Число групп соответствует числу марок. В каждой группе по разностям  $V = h' - h$  превышений  $h$  и  $h'$ , измеренных соответственно в нулевом и последующих циклах, вычисляется сумма  $[VV]$ , которая служит для выбора наиболее устойчивой марки, принимаемой за исходную.

Матричная форма представления данных позволяет легко и надежно определить исходную марку в каждом цикле нивелирования.

#### Литература

1. Зеленский А.М., Дорофеев А.В. Об анализе устойчивости реперов на территории промышленного предприятия - "Геодезия и картография", №9, 1973, с.30-32.
2. Costachel A. Einige new Aspekte bie Prazisionsnivellemens zur Bestimmung der sekung Von Bauten. Vermessungstechnik , №7, 1967
3. Рунов И.В. О выборе наиболее стабильного репера в качестве исходного - "Вопросы атомной науки и техники", вып 2(6), 1973, с.125-127.

## **ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ**

Ю. Д. Золотухин, В.Н. Редюк

Белорусский государственный университет транспорта

г. Гомель, Беларусь

О.А. Родин, М.Г. Осмоловская

Гомельский завод сборного железобетона № 5

г. Гомель, Беларусь

Представлены результаты испытания на косою изгиб трехслойных стеновых панелей, даны рекомендации по повышению их долговечности.

Ключевые слова: бетон, арматура, прочность, жесткость, трещиностойкость, испытания, покрытия, полимеры, долговечность.

Трехслойные железобетонные панели с размерами 5980×1285×300 мм, серийно изготавливаемые гомельским заводом сборного железобетона № 5, предназначены для стен жилых зданий.

Новая типовая серия панелей (Б 1.232.1-8) с эффективным утеплителем разработана институтом "Белпроект". Наружный слой панели состоит из бетона класса В15 с маркой по морозостойкости F50, внутренний слой изготавливает-

из бетона того же класса. Утеплитель состоит из пенополистирольных плит ПСБ-25 (рисунок 1). Ребра по периметру в проектном решении предусмотрен из газосиликата ( $\gamma = 400 \text{ кг/м}^3$ ) толщиной 30-50 мм, а в производстве завода заменены пеностеклом ( $\gamma = 185 \text{ кг/м}^3$ ). Панель армирована сеткой из проволок Вр-I и стержневой арматурой класса А-III, поставленной в виде отдельных стержней, закрепленных гибкими связями, изготовленными из стали класса А. Для обеспечения долговечности гибкие связи имеют горячее цинковое и дслоя лакокрасочного или специальное полимерное покрытие [1].

Под действием собственного веса вышележащих конструкций и ветровых нагрузки панели работают на косоу изгиб при сжатой зоне бетона в форме трещины (рисунок 1), для которой  $X_1$  и  $X_2$  определяются из соотношения изгибающих моментов от расчетных нагрузок ( $M_2/M_1$ ), действующих в плоскости симметрии прямоугольного сечения [2,3].

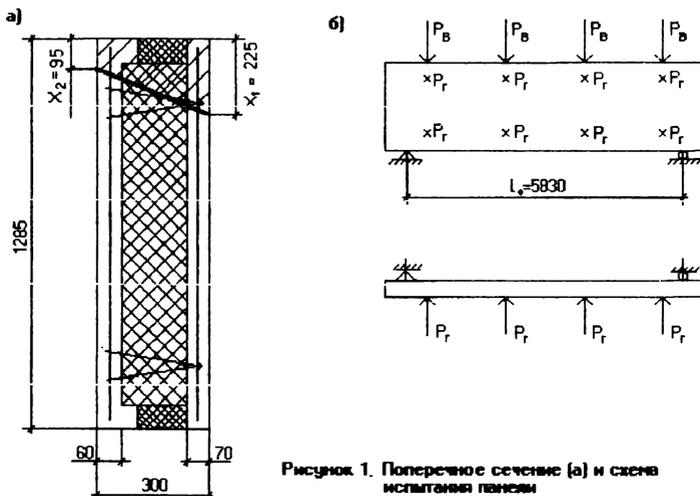


Рисунок 1. Поперечное сечение (а) и схема испытания панели

Панель испытана на заводском стенде по методике ГОСТ 8829-85 и рекомендаций [4] (рисунок 1.6). Вертикальные и горизонтальные перемещения, полученные при испытании, показаны на рисунке 2.

Трещины в растянутой зоне возникли на 5-ом этапе загрузки от расчонной нагрузки, при этом относительный прогиб в вертикальной плоскости  $f_b/l_0 = 1/6270$ , а в горизонтальной -  $f_r/l_0 = 1/5717$ . На 6-ом этапе загрузки бы приложена нагрузка, соответствующая пределу текучести арматуры, а на 7-ом разрушающая нагрузка  $P_b = 18,75 \text{ кН}$  и  $P_r = 1,125 \text{ кН}$ . Ширина раскрытия трещи

при этом увеличивалась до 0,1 мм, относительный прогиб от вертикальной нагрузки и горизонтальной нагрузки составил  $f_b / l_0 = 1 / 3640$ . Гибкие связи обеспечили совместную работу отдельных слоев конструкций.

Для дополнительной защиты теплоизоляционного материала от увлажнения, возможного в процессе эксплуатации зданий, и повышения морозостойкости фактурного слоя бетона разработана технология нанесения различных видов защитно-декоративных покрытий, отличающихся по цвету, рисунку и фактуре, осуществляемых по дополнительному заказу потребителя.

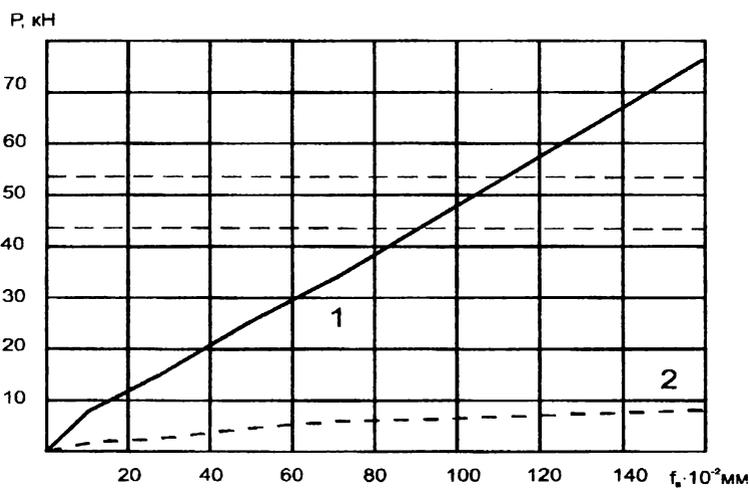


Рисунок 2. Прогибы в середине пролета от вертикальных (1) и горизонтальных (2) суммарных нагрузок

### Выводы

Железобетонные трехслойные панели, серийно изготавливаемые на заводе борного железобетона, по геометрическим размерам, армированию, прочности, жесткости и трещиностойкости соответствуют требованиям типовой серии и могут использоваться при строительстве жилых зданий.

Правильно подобранное защитное покрытие фактурного слоя бетона, обладающее хорошей адгезией, паро- и воздухонепроницаемостью позволяет защитить от увлажнения теплоизоляционные материал панели и повысить межремонтный срок их нормальной эксплуатации.

## Литература

1. Золотухин Ю.Д. и др. Испытание сооружений. - Мн.: Выш. шк., 1992, 272 с.
2. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции. Общий курс. М., 1991, 767 с.
3. Вахненко П.Ф. Современные методы расчета железобетонных конструкций на сложные виды деформации. К. Будівельник, 1992, 112 с.
4. Золотухин Ю.Д. Испытание строительных конструкций. Мн.: Вып. шк., 1983, 208 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ БУМАЖНОГО СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

В. А. Иванов

Строительный факультет, БГПА

г. Минск, Беларусь

Рассмотрены сопротивления растяжению, модули упругости при растяжении и сдвиге бумаги, а также сформулированы требования к клеям для изготовления бумажного сотового заполнителя.

Ключевые слова. Бумажный сотовый заполнитель, бумага, прочность, модули упругости и сдвига, эксперимент, растяжение, клей.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Бумажный сотовый заполнитель (БСЗ) — целлюлозно-полимерный композиционный материал, качество которого зависит как от правильности выбора исходных компонентов (армирующего материала — бумаги, матрицы — полимеров, границы раздела), так и от последовательности и точности выполнения технологических операций. В стандартах на непропитанную оберточную бумагу, используемую для БСЗ на Светлогорском ЦКК, а также в «Технологическом регламенте по выпуску бумаги и картона Светлогорского ЦКК» не регламентируются модули упругости при растяжении ( $E_t$ ), модуль сдвига ( $G$ ), прочности при растяжении ( $R_t$ ) бумаги.

В справочно-нормативной литературе не в полной мере определены механические характеристики клеев, требуемых для приготовления БСЗ.

Перечисленные характеристики необходимы для расчета сотовой структуры. Жесткость бумаги и прочность клеевых композиций оказывает влияние на процесс растяжения сотопакета или сотокольки, формирование сотовой струк-

туры. При повышенной жесткости бумаги, обусловленной значительной толщиной, при растяжении в углах ячеек появляются трещины и разрывы, бумага разрушается, качество БСЗ снижается.

В этой связи проведены кратковременные и длительные испытания бумаги, определены технические требования к клеям.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Испытывали образцы непропитанной оберточной бумаги марки Б в виде полосок размером  $180 \times 15 \times t_w$  мм. Толщина бумаги  $t_w = 0,25 - 0,3$  мм. Количество образцов в каждой выборке определялось по известной формуле [1]  $n > C_v^2 t^2 / P^2$ . Коэффициент вариации  $C_v$  принимался в пределах до 20 % в зависимости от напряженного состояния. При испытании учитывали требования стандартов по кондиционированию образцов (ГОСТ 13523-78), методам определения прочности на разрыв при растяжении материала (ГОСТ 13525.1-79\*, ГОСТ 11262-80).

Кратковременные испытания проводили на разрывной машине РМБ-30-2М. Усилия фиксировали по шкале измерений пояса Б. Перемещения волокон замеряли на базе 100 мм катиомером типа К-6 с ценой деления 0,01 мм и по нониусу шкалы удлинения. Длительные испытания производили на действие растягивающих усилий в приборах Журкова. Строились диаграммы «напряжения — деформации», с помощью которых вычисляли модули упругости. Модули сдвига определялись по методике [2]. Результаты кратковременных испытаний представлены в таблице 1.

Нормативные характеристики равны округленным величинам нижней границы вычисленного доверительного интервала (при уровне надежности 0,95). Расчетные длительные характеристики определяли с учетом коэффициента надежности по материалу ( $\gamma_m$ ) и коэффициента условий работы  $m_{дл}$ , учитывающего влияние длительности нагружения с переходом от прочности бумаги при кратковременных стандартных испытаниях к ее прочности в условиях длительно действующих постоянных и временных нагрузок. При значениях вариационного коэффициента в пределах 5,73-15,88 % коэффициент  $\gamma_m$  принят равным 1,25, а коэффициент  $m_{дл}$  — 0,35. Длительные модули упругости и сдвига определялись умножением кратковременных на временной деформационный коэффициент, равный 0,8 (табл. 2).

Параметры рассеяния прочностных и деформационных характеристик бумаги

Механическая характеристика	Среднее значение, МПа	Экстремальные значения, МПа	Дисперсия, МПа	Вариационный коэффициент, %	Генеральные средние, МПа
$\sigma_t$	8,82	6,61-11,53	1,964	15,88	7,81-9,84
$E_t$	2896	2600-3140	27627	5,73	2775-3017
$G$	804	720-870	2128	6,72	770-838

Таблица 2

Нормативные и расчетные прочностные и деформационные характеристики бумаги для БСЗ

№№ пп	Наименование показателя	Величина показателя, МПа
1.	Сопротивление растяжению: нормативное $R_{tn}$ расчетное $R_t$	6,6 1,85
2.	Модуль упругости при растяжении: нормативный $E_{tn}$ расчетный $E_t$	2600 2080
3.	Модуль сдвига: нормативный $G_n$ расчетный $G$	720 570

На основе анализа работы отечественных и зарубежных предприятий, занимающихся изготовлением БСЗ, исследований, проведенных автором, сформулированы следующие требования к клеям [3, 4, 5, 6, 7]:

1. Внешний вид — по ГОСТу, ТУ предприятия-изготовителя
2. Состояние поставки — жидкое
3. Химический состав исходных материалов — должен отвечать требованиям, предъявляемым Минздравом
4. Содержание свободного фенола, % — < 2—2,5
5. Содержание свободного формальдегида, % — < 0,8
6. Концентрация водородных ионов, рН среды — 7—8,5

7. Вязкость условная по вискозиметру ВЗ-1 (сопло 5,4) при 20°C, с	--- 40—60
8. Время желатинизации (гелеобразования) при 100°C, с	— 45—70
9. Смешиваемость смолы с водой при 20°C±1°C в соотношении по объему 1:2	— полная
10. Рабочая жизнеспособность клея при 20°C, ч	— 3—5
11. Сушка $t = 130^\circ\text{C}$ , мин	— < 30
$t = 60^\circ\text{C}$ , мин	— < 90
12. Давление при запрессовке 0,6 МПа, мин	— 20—45
13. Температура охлаждения, °C	— < 40
14. Полимеризация БСЗ после пропитки при:	
$t = 70^\circ\text{C}$ , час	— < 24
$t = 120^\circ\text{C}$ , час	— < 4
15. Расчетные сопротивления клеевого соединения (определяются прочностью склеиваемых материалов):	
— равномерный отрыв $R$ ( $\sigma$ ), Н (кгс) (по ГОСТ 28966.1-91. Метод определения прочности при расслаивании)	— > 230 (23)
— сдвиг $R$ ( $\tau$ ), Н (кгс) (по ГОСТ 28966.2-91. Метод определения прочности при отслаивании)	--- > 70 (7)
16. Расчетные физические характеристики клеев:	
— модуль нормальной упругости клея $E$ клея в клеевом соединении (по ГОСТ 26454-85), МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	— > 20 (200)
— модуль сдвига $G$ клея в клеевом соединении (по ГОСТ 25717-83), МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	--- > 6,6 (66)
— коэффициент Пуассона, $\mu$	— 0,3
— коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ , 1/град	— < 63

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Жесткость, определяющая сопротивляемость бумаги деформациям должна повышаться не за счет толщины, а за счет увеличения модуля упругости. В этой связи рекомендуется для изготовления БСЗ использовать высококачественную гибкую бумагу  $t_w = 0,08 - 0,12$  мм. При меньшей толщине она имеет более уплотненную структуру за счет увеличения сил связи между волокнами, более высокий модуль упругости. В то же время наносимые на бумагу полосы клея не пропитывают ее насквозь.

2. Модули упругости, вводимые в стандарты, должны ориентировать производителя бумаги к улучшению ее качества.

3. При повышенной жесткости бумаги и значительной ее толщине использование температурно-влажностного размягчения сотового пакета или сотовой дольки всегда позволяет достигнуть равномерного растяжения и придания структур БСЗ правильной шестигранной формы. В этом случае проблема может быть частично решена за счет использования клеенаносящих роликов, имеющих фигурный профиль кольцевых выступов (рилевочных муфт), позволяющих при нанесении клея продавливать (ривельвать) бумагу по кромкам клеевых полос. Ривелька облегчит последующее сгибание листа при растяжении.

#### Литература

1. Леонович И. И., Стрижевский В. А., Шумчик К. Ф. Испытание дорожно-строительных материалов.—Мн.: Выш. шк., 1991.— 233 с.
2. Пособие по физико-механическим характеристикам строительных пенопластов и сотовых листов.—М.: Стройиздат, 1977.—79 с.
3. Берсудский В. Е., Крысин В. Н., Лесных С. И. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций.—М.: Машиностроение, 1975.—294 с.
4. Шунгский Б. Е. Строительные конструкции с сотовыми заполнителями.—М.: Стройиздат, 1977.—112 с.
5. Иванов В. А. Характеристики бумажного сотового заполнителя //Архитектура и строительство Беларуси.—1994, № 1.—с. 9-10.
6. Иванов В. А. Технологии изготовления строительных конструкций на основе сотовых заполнителей (СЗ) и многослойного гофрокартона (МГК) //Материалы Международной 51-й НТК БГПА. Тез. докл. конф.—Минск, 1995.—Часть 5.—с. 47-48.

7. Иванов В.А. Технология изготовления бумажных сотовых заполнителей и сотовых конструкций// Сб. Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь.—Брест: БПИ, 1997.—с. 53-55.

## **ДОСТОИНСТВА ТЕХНОЛОГИЙ РЕГЕНЕРАЦИИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

Е.В.Кашевская

Строительный факультет, ММИ

г.Могилев, Беларусь

В статье дан анализ возможности и необходимости использования технологий регенерации существующих асфальтобетонных покрытий для релаксации автомобильных дорог Республики Беларусь.

Ключевые слова: регенерация, холодильный рециклинг, термопрофилирование, санация, релаксация, Ремикс, Ремикс-плюс.

Актуальность реабилитации сети автомобильных дорог Республики Беларусь определяется их включением в Европейскую транспортную систему. Наша республика находится на «перекрестке» Европы. Транспортные коридоры Лондон–Берлин–Варшава–Москва, Хельсинки–Санкт-Петербург–Киев–Одесса, Стокгольм–Калининград–Прибалтика–Украина–Молдавия включают белорусские дороги в европейские маршруты, интенсивность движения на которых уже сегодня составляет от 5 до 30 тысяч автомобилей в сутки.

— Проблема заключается в том, что Республике Беларусь приходится адаптироваться в систему европейских грузоперевозок в очень сжатые сроки, при наличии неклассных автомагистралей с сильно изношенным покрытием, ограниченными условиями безопасности движения и дорожного сервиса. В настоящее время в эксплуатации находится 35 тыс. Км дорог с усовершенствованными покрытиями, из них 15.5 тыс. км – дороги республиканского значения, диагностика которых показала, что 12.5 % (1900 км) имеют неудовлетворительную ровность, 6 % (1100 км) – неудовлетворительные сцепные свойства покрытия, 16 % (2480 км) – недостаточную прочность дорожной одежды из-за износа.

Выполняемые в настоящее время ремонтно-профилактические мероприятия ограничиваются в основном работами с использованием ремонтных материалов с избыточным содержанием битума и устройством поверхностных обра-

боток, которые проводятся в среднем раз в 4–5 лет. Поверхностная обработка ставшая альтернативой капитальному ремонту из-за недостатка средств, проводится часто с использованием материалов сомнительного качества и устаревшего оборудования.

В результате эксплуатации в течение 12–15 лет таких покрытий до очередного капитального ремонта в верхнем слое образуются такие дефекты, которые невозможно устранить традиционными проектными решениями:

- колееобразование в полосе наката глубиной 3–4 см постоянно, в отдельных местах до 8–10 см;
- трещины, вызванные старением битума, в основном поперечные;
- раскрытие и разрушение продольных и поперечных швов верхних слоев покрытий из-за нарушения технологии их устройства;
- выбоины и облом кромок покрытия (весной 1998 г. Объем ямочного ремонта на республиканских дорогах превысит 90 тыс. м<sup>2</sup>).

Вместе с тем, все покрытия сохранили несущую способность и пропускают современный транспортный поток без снижения несущей способности.

В сложившейся ситуации оптимальным выходом является использование санации покрытий технологий регенерации асфальтобетонных покрытий, которые начали активно разрабатываться в 70-е годы в европейских странах в условиях резкого роста цен на энергоресурсы.

Регенерация существующих покрытий предусматривает рециклирование в зоне верхнего слоя старого покрытия с обогащением его добавками нового материала и укладкой на месте соответственно проектному профилю в «нулевых отметках», без наращивания или с незначительным наращиванием конструктивных слоев дорожной одежды.

Эти технологии позволяют максимально использовать материал существующего покрытия, существенно сократить транспортные расходы, улучшив проектные характеристики верхнего слоя.

В зависимости от принимаемой температуры технологического процесса различают горячую регенерацию (горячее ремиксирование) и холодную регенерацию (холодный рециклинг).

Горячая регенерация используется в виде четырех базовых технологий, позволяющих выполнить следующие виды работ:

- восстановление ровности покрытия без добавления новой смеси (термопрофилирование);

- восстановление ровности покрытия с добавлением новой смеси с укладкой тонкого слоя износа (термопрофилирование с устройством слоя износа);
- усиление покрытия путем терморегенерации с добавлением новых материалов (битума, щебня или асфальтобетона) (Ремикс);
- усиление покрытия путем терморегенерации с добавлением нового материала и укладкой слоя износа (Ремикс-Плюс).

Техническая сущность технологии «Ремикс-Плюс», которая сегодня широко культивируется в Европе, США, Канаде, сводится к восстановлению и улучшению первичных свойств существующего асфальтобетонного покрытия с единовременной укладкой поверху защитного слоя из свежей асфальтобетонной смеси.

Общая толщина восстанавливаемой заново конструкции составляет 4–6 см слоя «Ремикс», плюс 2–4 см слоя износа из свежей смеси – всего от 6 до 10 см, при этом вновь созданная конструкция представляет единый моноблок, а не самостоятельные слои, как это бывает при реализации традиционной технологии (выравнивающий слой плюс один или два слоя покрытия). Горячее ремиксирование исключает некачественное сращивание рабочих и продольных швов, повышая жесткость конструкции и исключая одну из причин быстрого локального разрушения верхних слоев.

Опыт реализации технологии «Ремикс-Плюс» специалистами дорожно-строительного треста № 2 г. Гомеля в содружестве с немецкой фирмой «Шмитт Асфальттехник» на контракте СМ-1-9 в Российской Федерации в 1996 году и в нашей республике в 1997 году при санации автомобильной дороги Юго-западный обход г. Жлобина показал несомненные преимущества данной технологии. Анализ прочностных характеристик восстановленных покрытий показал увеличение расчетных характеристик на 20–30 % при том, что общая толщина покрытия слоев «Ремикс-Плюс» примерно такая же, как и для покрытий по традиционной технологии, без выхода из «нулевых отметок». Поверхность слоя «Ремикс-Плюс» отвечает требованиям по сцепным качествам уже через 0,5–1 месяц после устройства слоя. Реализованные по технологии «Ремикс-Плюс» проекты показали отличную обеспеченность продольной и поперечной ровности восстановленных покрытий.

Еще более выгодным с точки зрения экономии энергоресурсов представляется использование технологии холодной регенерации или холодного ресайклинга, получившего распространение с появлением фрез. Этот способ регене-

рации позволяет получить дорожную одежду со сроком службы, аналогично достигаемому при новом строительстве.

Технология холодной регенерации заключается в измельчении покрытия (в некоторых случаях с захватом основания) посредством холодного фрезирования, введением в образовавшийся асфальтовый гранулят необходимых добавок (каменного компонента, цемента и битумной эмульсии), смешение гранулобтонной смеси, распределение ее в виде конструктивного слоя, и уплотнения.

В зависимости от цели ремонта, конструкции дорожной одежды и ее состояния используют несколько технологических схем производства работ, которые по принципиальному характеру делятся на два типа:

- холодная регенерация методом смешения на дороге;
- холодная регенерация методом смешения в стационарной установке.

Все виды технологических схем при выполнении работ по холодной регенерации методом смешения на дороге являются высокотехнологичными, маневренными, обладают высокой рабочей скоростью. Кроме того, исключается необходимость создания притрассовых складов материалов, отсутствуют затраты на транспортировку материалов и смеси к укладчику.

При производстве работ методом смешения в стационарной установке выполняются следующие технологические операции:

- фрезерование покрытия на проектную глубину с погрузкой полученного асфальтового гранулята в автосамосвалы;
- транспортировка материалов на завод;
- приготовление смеси;
- транспортировка на объект, укладка и уплотнение.

Метод смешения в стационарной установке имеет свои преимущества по сравнению со смешиванием на месте:

- в процессе фрезерования достигается требуемый поперечный уклон;
- возможность «осреднения» в штабеле асфальтового гранулята для достижения равномерного гранулометрического состава смеси;
- качественное перемешивание компонентов в стационарной установке;
- возможность обеспечения постоянного лабораторного контроля на каждом замесе;
- отсутствие затрат на приобретение или аренду дорогостоящего оборудования (рециклеров).

В 1997 году ДСТ-2 г.Гомеля успешно реализовал проект восстановления участка дороги М-1 «Белоруссия» км 33 48.2 (контракт СМ-1-4) с использованием метода холодной регенерации в стационарной смесительной установке.

Технология холодной регенерации – это совершенно новый взгляд на проблему реабилитации утратившего свои свойства покрытия автомобильных дорог. Это ресурсосберегающая технология, позволяющая уменьшить или полностью исключить добычу природных материалов, сэкономить средства на разогрев вяжущего и работу АБЗ, а как следствие – уменьшить вредные воздействия на природу. Это технология 100 % применения имеющегося на дороге материала с устройством нового качественного покрытия.

Проблема использования технологий регенерации заключается в сложности учета и непрогнозируемости поведения в новой конструкции разнородных материалов, содержащихся в существующих покрытиях (большое количество ямочного ремонта, бесконечные поверхностные обработки и т.д). они могут послужить причиной непрогнозируемых разрушений.

Вместе с тем, внедрение технологий регенерации – это мощный шаг вперед по пути выполнения программы ресурсосбережения, что особенно важно в настоящее время и отражается целым направлением в республике, продиктованным решением правительства в части ресурсосбережения, новый взгляд на технологию санации покрытий, восстановления утраченных ими свойств.

Технологии регенерации существующих асфальтобетонных покрытий – будущее в решении проблем ремонта. Так как они соответствуют очень жестким требованиям, обеспечивая:

- высокие темпы ремонтных работ;
- безопасность движения при производстве работ в условиях не прекращающегося движения;
- высокое качество работ при сравнительно низкой их стоимости;
- экологическую безопасность работ.

Учитывая перечисленные достоинства технологий регенерации существующих асфальтобетонных покрытий, целесообразно рекомендовать использование этих технологий для релаксации покрытий сети автомобильных дорог Республики Беларусь.

## **ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ДОРОЖНЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ВЯЖУЩЕГО ИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ НЕСОВМЕСТИМЫХ КОМПОНЕНТОВ**

Я.Н. Ковалев, В.А. Веренько

БГПА

г. Минск, Беларусь

Рассмотрены вопросы структурообразования нового класса дорожных материалов - бетонов на основе органогидравлических вяжущих. Отмечено, что структура подобных бетонов образована рядом межфазных поверхностей тоберморитового типа. Предложены области практического применения бетонов на органогидравлических вяжущих.

Ключевые слова: бетон, органогидравлические вяжущие, структура, межфазные слои, технология.

В последние годы в дорожном строительстве появились новые бетоны. Основное их отличие - применение двух и более термодинамически несовместимых вяжущих, образующих в структуре материала связи различной природы, прочности и деформативности. К подобным композициям вяжущих можно отнести битум и цемент, битум - серу, битум - кальциевые мыла жирных кислот, битум - каучук и т. д. Термодинамическая несовместимость предполагает способность двух веществ к образованию в любых соотношениях устойчивой однородной системы, т. е. вещества способны объединяться только в виде коллоидных дисперсий и эмульсий.

Проблемы получения и структурообразования данных бетонов рассмотрим на примере наиболее большой их группы - бетонов на органогидравлических вяжущих (ОГВ).

Бетон на ОГВ - искусственный строительный материал, сочетающий в своей структуре свойства термодинамически несовместимых органических (битумов, дегтей) и гидравлических (цемент, гипс, зола) вяжущих. Появление бетонов на ОГВ в дорожном строительстве было связано с рядом причин:

1. Недостаточной надежностью и долговечностью традиционного асфальтобетона на действие современных транспортных нагрузок, что привело к вводу в его состав цементного теста, цемента, пропитки цементным молоком и т. д.

2. Появлением новых энерго- и ресурсосберегающих технологий, требующих в структуре материала воды (эмульсии, вспененные битумы, влажные органоминеральные смеси и т.д.).

3. Появлением новых технологий ремонта и реконструкции дорожных покрытий (метод Ресайклинга, холодного ремиксирования и т. д.).

Несмотря на большую гамму разновидностей бетонов на ОГВ в настоящее время не изучен механизм их структурообразования, что сдерживает практическое применение и не позволяет обоснованно выбрать вид или тип бетона для конкретного конструктивного слоя дорожной одежды.

Прежде всего следует отметить, что независимо от технологии приготовления бетона степень гидратации для гидравлического вяжущего составляет 50 - 100 % от степени гидратации цементного камня. Обусловлено это флокулированием частиц цемента при смешении, изменением pH среды и появлением условий для эмульгирования битума.

Процессы структурообразования в дальнейшем могут пойти путем формирования кристаллизационной связи (фазовых контактов) между структурными составляющими, а также образованием слоистой тоберморитовой структуры (по И.И. Ахвердову) со сложной системой межфазовых переходных слоев.

В ряде случаев (повышенное содержание цемента, холодные технологии и т. д.), возможно появление фазового контакта (кристаллизационной связи) между прогидратировавшими агрегатами цемента. Эти контакты возникают в разрывах битумных пленок, а также через битумные пленки небольшой толщины. Причинами появления кристаллизационных связей при наличии углеводородных пленок являются: внутрикристаллическое давление, перенос ионов в следствии диффузии, разрыв углеводородных пленок в результате контракции, частичная взаимная растворимость составляющих. Растущие кристаллы гидратных новообразований оказывают давление на битумные пленки. Порядковое значение давления колеблется от 1 до 10 г/см и превосходит прочность битумной пленки при положительных температурах (0-1 г/см). Такое положение создает условия практически беспрепятственного внедрения кристаллов в пленки органического вяжущего. Если толщина пленки не будет превышать двойного размера кристаллов возможно их соединение. Однако, как показали исследования газозовые контакты в структуре бетонов на ОГВ являются достаточно слабыми и не играют роли в процессе структурообразования.

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что основным структурообразующим элементом бетонов на ОГВ являются межфазные переходные слои кластерного типа. Дело в том, что хотя гидравлические и органические вяжущие являются термодинамически несовместимыми и не могут образовать устойчивой однофазной системы, граница раздела фаз является размытой и осуществляется через межфазные переходные слои. На формирование межфазных слоев оказывают влияние как физические (проростание кристаллов, адсорбция, разрушение ассоциатов битума, (перенос ионов), так и химические (образование связей типа  $Me^+-OOCR$ , водородных- $H$  и др.) процессы. Появление переходных слоев кластерного типа выгодно с термодинамической точки зрения. Межатомное взаимодействие частиц в системе цемент-битум-вода может быть рассмотрено и смоделировано на основе двойного взаимодействия типа: цемент (негидротированный) - битум, цемент (гидратированный) - битум, битум-вода, цемент-вода. В соответствии с законами термодинамики это означает, что общую энергию Гиббса системы цемент-битум-вода можно представить в виде энергий Гиббса двойных систем. Математически это выражается формулой вида:

$$F_{ц-б-в} = f(F_{цн-б}, F_{цг-б}, F_{б-в}, F_{ц-в}) \quad (1)$$

где  $F_{цн-б}$ ,  $F_{цг-б}$ ,  $F_{б-в}$ ,  $F_{ц-в}$  - энергии Гиббса двойных систем цемент (негидратированный) - битум, цемент (гидротированный) - битум, битум-вода, цемент-вода

$f$  - линейная функция. Физический смысл уравнения (1) состоит в том, что энергия Гиббса цемент-битум-вода может быть представлена в виде разностей химических потенциалов компонентов системы или на основе энергий Ферми компонентов.

Энергия Гиббса двойной системы, например ( $F_{цг-б}$ ) с учетом образования переходных слоев кластерного типа на границе раздела может быть определена из условия:

$$F_{цг-б} = (1-x_1-a_1*x_1)*F_{ц} + (x_1-b_1*x_1)*F_{б} + (a_1*x_1+b_1*x_1)*F_{цн-б} + 2*R*T*[(a_1*x_1)*\ln(a_1*x_1) + b_1*x_1*\ln(b_1*x_1)] \quad (2)$$

где  $F_{ц}$ ,  $F_{б}$  - энергия Гиббса прагидратировавшего цемента и битума соответственно;

$x_1$  - мольная доля битума по отношению к цементу;

$a_1, b_1$  - коэффициенты, характеризующие долю атомов, находящихся в переходном слое соответственно цемента и битума, значение которых меньше единицы;

$F_{\text{границы}}$  - энергия Гиббса атомов границы раздела переходного слоя частиц цемент-битум;

$T$  - температура;

$R$  - универсальная газовая постоянная.

Анализ выражения (2) показывает, что вклад слоя атомов, образуемых частицами цемента и битума, в общую энергию Гиббса зависит от количества атомных слоев битума (коэффициент  $b_1$ ), цемента ( $a_1$ ) их поверхностной энергии и энергии раздела ( $F_{\text{границы}}$ ). Поскольку энергия Гиббса имеет всегда отрицательное значение, то и  $F_{\text{границы}}$  меньше нуля, и следовательно, чем больше  $F_{\text{границы}}$ , тем меньше энергия Гиббса всей системы  $F_{\text{шт-б}}$  в целом. Вклад  $a_1, b_1, x_1$  в модели (2) позволяет учесть энтропию смешения атомов, находящихся в переходном слое частиц цемент-битум и характеризует число "перестановок", образующих разноименными частицами переходных слоев цемента и битума, так как  $a_1, b_1, x_1 < 1$ , то вклад этих слоев в модель (2) дает отрицательную цифру (логарифм числа меньше единицы), что также приводит к уменьшению энергии Гиббса, а следовательно, является термодинамически выгодным процессом. Образование межфазных переходных слоев свидетельствует о "гоберморитовой" структуре бетонов на ОГВ, что позволяет распространить теорию И.Н. Ахвердова на вопросы структурообразования термодинамически несовместимых вяжущих. Используя изложенные представления была разработана структурная модель бетонов на ОГВ. В результате ее анализа и расчетов на ЭВМ были получены следующие принципиальные результаты:

1. Зависимость между маркой минерального вяжущего и прочностью композита близка к линейной. Увеличение марки (прочности) гидравлического вяжущего целесообразно при его объемной доле более 50-60 %. Поэтому для ряда бетонов (особенно первой группы) можно использовать низкомарочные вяжущие.

2. Повышение прочности и протяженности переходных слоев влияет аналогично увеличению марки гидравлического вяжущего. Следовательно второй путь регулирования структуры и свойств бетонов на ОГВ это увеличение переходных зон за счет создания условий для переноса ионов в контактной зоне (применение эмульсий). Таким образом, проведенные теоретические и экс-

периментальные исследования процессов структурообразования бетонов на ОГВ позволили выработать прогнозные модели оптимальных составов для проведения опытно-промышленных работ.

В РБ опытные работы начали выполнять с 1985 года (легтезоломинеральные композиции, бетоны, полученные способом отдельного бетонирования и др.). В результате обобщения и анализа авторы предлагают для широкого внедрения следующие материалы и технологии:

1. Бетоны на ОГВ, полученные горячим способом с вводом воды на стадии укладки. Подобные бетоны не требуют нового оборудования. Однако их применение возможно только локальных небольших объектов (отдельные, наиболее напряженные перекрестки, остановки общественного транспорта и др.).

2. Бетоны на основе эмульсий и портландцемента, обладающие наиболее высокой надежностью и долговечностью. Их применение возможно как на городских, так и загородных автомагистралях. Для их широкого внедрения следует расширить сеть асфальтобетонных заводов, работающих по холодной технологии.

3. Бетоны получаемые путем обработки старого дробленого асфальтобетона битумной эмульсией и цементом. В этом случае необходимо разработать отечественную машину холодного фрезерования и передвижной смеситель достаточно высокой производительности.

4. Для повышения эффективности применения бетонов на ОГВ для их приготовления следует использовать отдельную электронно-ионную технологию и руководствоваться принципами активационно технологической механики бетонов.

## **ПОЛУЧЕНИЕ СКЛАДИРУЕМЫХ ЭМУЛЬСИОННО-МИНЕРАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ**

### **НА АКТИВИРУЕМЫХ БИТУМНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ**

Я.Н. Ковалев, Н.В. Радьков

Факультет дорожного строительства, БГПА

г. Минск, Беларусь

В работе рассмотрен один из аспектов активационной технологии применительно к получению эмульсионно-минеральных смесей (ЭМС). Показано, что свойства битумных эмульсий (БЭ) и битумно-минеральных смесей улучшаются

при использовании воды, активированной постоянным электрическим током. При этом сокращается расход одного из дорогостоящих компонентов битумных эмульсий.

Ключевые слова: битумная эмульсия, эмульсионно-минеральная смесь, активация, физико-механические свойства, активированная вода, отслеживаемость, устойчивость.

Основываясь на принципах активационно-технологической механики битумно-минеральных материалов [1], было исследовано изменение свойств воды (как компонента БЭ), при воздействии на нее постоянного электрического тока. Изменение свойств воды определяли по значениям pH возле электродов. Использовалась водопроводная вода, а постоянный ток получали путем выпрямления сетевого переменного тока до напряжения 90–100 В. Время активации составляло 40 минут. Результаты измерений представлены в табл. 1

Для получения катионной БЭ использовали воду образовавшуюся у положительного электрода ("аналитную воду") с  $\text{pH}=2,1$ . Эмульсию готовили в лабораторной коллоидной мельнице. Физико-механические свойства битумных эмульсий, полученных на обычной и активированной воде оценивали по ТУ 14559998-23-97. Эмульсионно-минеральную смесь с использованием традиционной и модифицированной эмульсии испытывали на слеживаемость (по стандартной методике), адгезию при кипячении в обычной воде и с добавлением в нее 20 % калийной соли (KCl). Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты измерений pH активированной воды

Время активации, мин	Значение pH	
	у положительного электрода	у отрицательного электрода
1	2	3
5	5	8.5
10	4.5	9.2
15	3.7	10.0
20	3.5	10.3
25	3.0	10.5
30	2.8	10.6
35	2.4	10.8
40	2.1	11.1

Таблица 2

Показатель	На обычной воде	На активированной воде
Слеживаемость (число ударов) через:		
10 суток	28	18
15 суток	38	21
20 суток	46	32
Устойчивость при кипячении (через 1 час):		
- в простой воде	наблюдается оголение углов щебня (от битумной пленки)	щебень покрыт битумной пленкой полностью
- в соленой воде	оголение до 50 % щебня	наблюдается оголение лишь крупных щебенков

Проведенные исследования показали, что у битумных эмульсий, полученных с применением активированной воды, уменьшается слеживаемость и повышается адгезия битумной пленки к минеральному материалу. Кроме того изменяя pH воды, можно уменьшить количество дефицитной соляной кислоты, необходимой, для приготовления битумных эмульсий.

---

#### Литература

1. Ковалев Я.Н. Активационно-технологическая механика асфальтобетона. "Вышэйшая школа", Минск, 1990.

## ОСОБЕННОСТИ БЕТОНИРОВАНИЯ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛИТЬЕВЫМИ СМЕСЯМИ МОДИФИЦИРОВАННЫМИ КОМПЛЕКСНЫМИ ДОБАВКАМИ

И.В.Коваль

Строительный факультет, ПГУ  
г.Новополоцк, Беларусь

В статье изложены результаты внедрения литьевой технологии бетонирования конструкций жилых зданий. Даются рекомендации по применению литьевых смесей в производственных условиях.

Ключевые слова: литьевая смесь, приготовление, транспортировка, выгрузка, укладка, распалубка.

С течением времени расширяется перечень объектов, на которых применяются литьевые бетонные смеси. Летом и осенью 1997 года сотрудниками БелНИИС и ПГУ организовывались работы по возведению монолитных железобетонных внутренних несущих стен на объекте объединения «Монолит» г.Минска. Внутренние стены толщиной  $\delta = 220$  мм с пространственным несущим каркасом возводились с применением объемно-переставной опалубки конструкции «Оргтехстроя» Литвы.

Работы велись на одной из захваток девятнадцатого этажа 20-ти этажного жилого дома в микрорайоне Юго-Запад г. Минска. Для возведения конструкции стен использовались составы тяжелой литьевой бетонной смеси проектной марки М200 со следующими показателями, представленными в таблице 1. В качестве комплексной добавки была использована композиция (С-3 + ПВК). Данная композиционная добавка, кроме пластифицирующего эффекта, оказывает заметное ускоряющее действие на бетонную смесь, а в зимних условиях может быть применена в качестве противоморозной. Указанные в таблице 1 композиции предварительно были исследованы в лабораторных условиях. При изготовлении производственного состава в качестве вяжущего использовался цемент ПЦ 500Д-20.

Литьевые бетонные смеси приготавливались на БСУ объединения «Монолит», для чего использовалась бетономешалка принудительного горизонтального действия объемом  $0.4 \text{ м}^3$ . При этом компоненты комплексной добавки, во избежание снижения расчетной подвижности, вводились отдельно. В противном случае наблюдалось небольшое снижение расчетной подвижности на 2-3 см. Общее вре-

мя приготовления замеса не превышало величин для обычных бетонов. Приготовленные литевые смеси в автобетоносмесителях транспортировались на объект, где перегружалась в бадьи объемом 2м<sup>3</sup>. Время доставки смеси от места приготовления до места выгрузки находилось в пределах 15 - 20 минут.

Таблица 1

Составы примененных литевых смесей

№ состава и условия его применения <sup>1</sup>	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>						Подвижность по конусу ( см )	Формуемость по прибору ВТ, класс смеси	Время виброуплотнения смеси ( с )
	Ц	П	Щ	В	С-3 <sup>2</sup>	ПВК			
1 летние	340	900	930	137	2,04	3,74	21-22	70 см·с (Л-3)	1-2
2 зимние	340	900	930	132	2,04	5,61	20	85-90 см·с (Л-2)	3-5

Примечания:

1 - растворо- и водоотделения сверхдопустимых пределов визуально не обнаружено;

2 - расход добавок С-3, ПВК приведен в расчете на сухое вещество до-бавки.

Бадьи для удобства выгрузки помещались в специальные приямки. Высота выгрузки смеси при этом не превышала 1,5 метров. Расслоение литевой смеси визуально не отмечалось. Одновременно проводились измерения подвижности по осадке конуса ГОСТ 10181.1-81 и замеры диаметра растекания литевой смеси согласно ENV 206 ( ISO 98-12 ). Далее при помощи монтажного крана КБ-674.0 бадьи подавались к месту укладки на высоту отметки перекрытий 19-го этажа, где укладывались в конструкция стен звеном рабочих-бетонщиков. При этом укладка производилась при падении литевой смеси в полость опалубки с высоты 3-3,5 м. По истечении двух суток выдерживания бетона в естественных условиях твердения опалубочные панели были сняты. Выдерживание и уход за бетоном выполнялись с соблюдением требований СНиП 3.03.01-87. В

течении времени выдерживания в ноябре 1997 года среднесуточная температура воздуха находилась в пределах 2...4°C отмечались кратковременные осадки.

Одновременно с опытными работами осуществлялось бетонирование конструкций стен с использованием обычных не модифицированных бетонных смесей с подвижностью 7-9 см с применением традиционных методов труда. Некоторые сравнительные данные полученные в ходе проведенных работ, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнительное время выполнения технологических операций  
при возведении участка стены

Наименование технологии бетонирования	Контрольные параметры на объекте	Время выполнения технологических операций на объекте (в минутах)					Общее время бетонирования 5 слоев (минут)	Общее время работы вибратора (минут)	Срок распалубки (суток)
		Выгрузка в бадьи	Подача к месту укладки	Укладка одного слоя	Виброуплотнение слоя	Подача бадьи к месту выгрузки			
Обычная	7-8 ОК см.	1,5	2,5	7	2	4	55	10	3-4
Литьевая	21-22 ОК см	1,5	2,5	3	0,2	4	35	1	2

Диаметр растекания литьевой смеси, согласно ENV 206 ( ISO 98-12 ) находился в пределах 350-360мм. Был получен диаметр растекания  $d = 350$  мм, что примерно соответствует классу литьевой смеси F-2.

В результате применения литьевого метода укладки бетонной смеси трудоемкость работ снизилась в 1,6-2 раза. Время виброуплотнения бетонной смеси сократилось в 7-10 раз. Расход электрической энергии снизился в 7 раз. Качество полученной поверхности стен повысилось с класса А-4 до класса А-3 согласно ГОСТ 13.015-85.

Время выдерживания бетона в опалубке сократилось с 3 - 4 суток до 2 суток, при отсутствии энергозатрат на электропрогрев бетона. Распалубка была проведена из условия сохранения формы (согласно СНиП 3.01.05-87) по достижению прочности  $R_{расп} = 1,5$  Мпа. Фактическая прочность по достижении 28-ми суточного возраста составила  $R_{28} = 23,1$  Мпа.

В заключении необходимо отметить особенности , которые следует учитывать при использовании литьевой технологии.

1. При приготовлении бетонных литевых смесей необходимо контролировать влажность применяемых заполнителей во избежания появления нерасчетного количества свободной воды. На этапе проектирования составов необходимо учитывать значения параметров относительного и предельного водосодержания цементного теста  $X_{т.м}, X_{т.мах.м} / 1, 3 /$ .
2. При перемешивании компонентов литевой смеси не рекомендуется применение повышенных скоростей вращения бетоносмесительного устройства. В противном случае следует ожидать значительного воздухововлечения (более 6-9 %) и в дальнейшем снижения расчетной прочности изделия. В случае использования комплексной добавки (к примеру (С-3+ПВК)) необходимо осуществлять ввод ее компонентов раздельно, сначала ПВК, а затем С-3.
3. На этапе транспортирования следует ограничивать время транспортировки до 45 минут от момента загрузки в автобетоносмеситель до выгрузки в приемные устройства на объекте / 2 /.
4. При выгрузке литевых смесей не рекомендуется осуществлять их перегрузку более 1 раза. Высота свободного падения допускается в пределах 3-3,5 метров. В противных случаях возможно появление расслоения смеси.
5. При укладке следует учитывать, что дальность свободного растечения литевой смеси может достигать 6-7 метров от точки укладки /3/. В связи с этим нужно особенно тщательно производить укладку смесей вблизи не отсеченных поверхностей, а также следить за шириной щелей в опалубке.
6. В случае использования литевых бетонных смесей классов Л-3, Л-4 ( F-3, F-4) допускается виброуплотнение только в углах, сопряжениях стен и местах установки проемообразователей в течении 3-5 секунд.
7. При использовании комплексной добавки С-3 + ПВК возможно применение литевых бетонных смесей без дополнительного прогрева до температуры не ниже минус 10°C. Причем время выдерживания бетона в опалубке должно устанавливаться индивидуально, с учетом условий производства и технического задания, изложенного в ИПР.

#### Литература

1. Отчет о НИР «Исследовать, разработать и внедрить ресурсосберегающую литевую технологию возведения конструкций из монолитного бетона с использованием отходов промышленных производств республики Беларусь»БелНИИС, закл.отчет о х..д. 23-202/95, Минск. 1997. - 170 с.

2. Калмыков Л.Ф. «Литьевая технология бетонирования монолитных конструкций» БелНИИНТИ, Минск, 1989. - 72 с.
3. Отчет о НИР «Разработать и внедрить конструкцию и литьевую технологию изготовления облегченных энергоэкономичных наружных стеновых панелей». БелНИИС, Минск . 1994, - 167с.

## ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА ВЛАГИ ДЛЯ ОЦЕНКИ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА

С.Н.Ковшар

Факультет дорожного строительства, БГПА

г. Минск, Беларусь

Рассмотрена возможность применения коэффициентов переноса для оценки морозостойкости бетонов. Приведены результаты по определению коэффициентов переноса. Предложена расчетная формула для оценки морозостойкости бетона.

Ключевые слова: коэффициент диффузии влаги, термоградиентный коэффициент, морозостойкость.

Проблеме прогнозирования морозостойкости бетона посвящено много работ и в большинстве из них эта проблема рассматривается с позиции определяющего значения структуры бетона [1,2,3,4]. Предложены различные расчетные формулы для оценки морозостойкости бетонов [ 4 ]. В большинстве из них морозостойкость бетона определяется только, как функция пористости. Однако следует отметить, что для оценки стойкости бетона при попеременном замораживании и оттаивании необходимы сведения не только о параметрах поровой структуры, но и о прочностных свойствах материала. Этого недостатка лишена формула, предложенная в работе [ 6 ]:

$$F = K \cdot R_{сж} / U \quad (1)$$

где:  $K$  - коэффициент пропорциональности;

$R_{сж}$  - прочность при сжатии бетонного образца;

$U$  - количество испаряющейся влаги из материала за промежутков времени, отнесенное к условному зеркалу испарения.

Величина  $U$ , входящая в формулу ( 1 ), характеризует капиллярно-пористую структуру материала и определяется из кривой сушки (начальная скорость высушивания предварительно водонасыщенных образцов). Однако

этот метод оценки капиллярно-пористой структуры материала не нашел широкого применения в лабораториях, поскольку сложен и не обладает достаточной точностью.

Проанализировав существующие в настоящее время методики оценки капиллярно-пористой структуры бетона, автор пришел к выводу, что для оценки стойкости бетона при действии отрицательных температур, наиболее перспективным представляется использование коэффициентов переноса вещества, поскольку они характеризуют не только параметры структуры материала, но и позволяют оценить влияние процессов миграции влаги при действии знакопеременных температур на морозостойкость, т.е. описать причинный уровень разрушения бетона при замораживании.

Перенос массы вещества в процессе увлажнения бетона и действие знакопеременных температур можно характеризовать коэффициентом диффузии влаги ( $a_m$ ) и относительным коэффициентом термодиффузии влаги ( $\delta$ ). Указанные коэффициенты характеризуют капиллярно-пористую структуру цементного камня и бетона, поскольку зависят от величины пористости и функции распределения пор по радиусам. Коэффициент диффузии влаги, определяемый экспериментально, характеризует перенос влаги под влиянием молекулярной диффузии и капиллярных сил.

Термоградиентный коэффициент показывает какой, градиент влажности создается в материале при градиенте температуры  $1^\circ\text{C}/\text{см}$ . Данный коэффициент характеризует собой перенос влаги, вызванный перепадом температур между внутренними слоями и наружной поверхностью бетонного образца в начальный период замораживания. Движение жидкости вызванное перепадом температуры, происходит, как по микро-, так и по макрокапиллярам.

В общем случае закон миграции влаги в капиллярно-пористых телах [ 5 ] выражается следующим уравнением:

$$j = -a_m \cdot \gamma_0 \cdot \nabla U - a_m \cdot \gamma_0 \cdot \delta \cdot \nabla t \quad (2)$$

где:  $\gamma_0$  - плотность абсолютно сухого материала;

$\nabla U$  и  $\nabla t$  - соответственно градиент влагосодержания и температуры на поверхности тела.

При большом температурном градиенте преобладает фактор термовлагопроводности и, наоборот, при малом температурном градиенте - фактор влагопроводности.

Морозостойкости бетона определялась согласно ГОСТ 10060.1-95 на образцах-кубах с ребром 10 см. Составы бетонных смесей для проведения исследований зависели от трех переменных: водоцементного отношения, расхода цемента, соотношения между растворной частью и крупным заполнителем в бетонной смеси. Составы бетонных смесей и их морозостойкость приведены в таблице 1.

Таблица 1

Номер состава	Расход составляющих, кг на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси				Марка по МРЗ
	цемент	песок	щебень	В/Ц	
1	300	820	1215	0,45	100
2	300	830	1232	0,375	150
3	400	1092	928	0,45	200
4	400	636	1183	0,45	250

Для приготовления бетонных смесей использовали портландцемент ПЦ-500-Д20 Волковьского завода, песок с  $M_k = 2,5$  Заславльського карьера и гранитный щебень фракция 5-20 мм ГП «Гранит» г.п. Микашевичи.

Определение коэффициента диффузии влаги производилось по методике, разработанной автором. Предлагаемый метод определения коэффициента диффузии влаги основан на представлениях о зависимости электропроводности капиллярно-пористого тела от его «сквозной пористости». Данный метод позволяет значительно сократить продолжительность испытаний и трудоемкость работ.

Термоградиентный коэффициент определяли по методике [5], основанной на закономерностях температурного поля в квазистационарном состоянии, и в предположении, независимости коэффициента от влажности материала. Параллельно были проведены испытания по определению структурных характеристик методом кинетики водонасыщения ГОСТ 12730.4-76. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2

Номер состава	$W_{в,}$ %	$W_{о,}$ %	$\rho_{ср,}$ кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$	$\alpha$	$a_m \cdot 10^{-4},$ м <sup>2</sup> /ч	$\delta \cdot 10^{-2},$ 1/град
1	7,6	17,8	2350	1,10	0,5	9,9	0,61
2	6,8	16,3	2410	1,05	0,35	7,6	0,45
3	5,4	12,9	2390	0,90	0,8	6,7	0,43
4	4,9	11,9	2430	0,70	0,45	6,2	0,35

На основании проведенных исследований, а также на основе обобщения экспериментальных данных по результатам испытаний 10 серий образцов, твердевших в различных условиях, из бетонных смесей с различным минералогическим составом цемента, зерновым составом мелкого и крупного заполнителя, объемом вовлеченного воздуха автором была предложена следующая уточненная зависимость ( 1) для оценки морозостойкости бетона, выраженной в стандартных циклах замораживания и оттаивания:

$$F = K_1 \cdot 10^{-12} \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot R_{сж} / a_m \cdot (1 + \delta) \quad (3)$$

где:  $K_1$  - коэффициент, зависящий от размеров образца и от свойств насыщающей жидкости (для образцов-кубов с ребром 10 см  $K_1=50$ );

$K_2$  - коэффициент, зависящий от минералогического состава и характеристик применяемого цемента (для портландцемента Волковьского завода ПЦ-500-Д20  $K_2=1,1$ );

$K_3$  - коэффициент, зависящий от количества вовлеченного воздуха (для состава без воздухововлекающих добавок  $K_3=1,0$ );

Для уточнения применимости предложенной зависимости ( 3 ), в лабораторных условиях были проведены испытания по оценке морозостойкости бетонов для вибропрессованных тротуарных плит и дорожного бордюра. Как показали результаты испытаний на морозостойкость, среднее отклонение результатов, полученных по формуле ( 3 ) от фактической морозостойкости, составило 11 %. Следует отметить, что хорошее совпадение формула ( 3 ) дает на составах, изготовленных из бетонных смесей уплотняемых вибрацией, т.е. где исключается образование направленной пористости бетона.

В заключении следует отметить следующее, определение коэффициентов переноса вещества, поглощенного капиллярно-пористым телом, каким является бетон, представляет интерес не только с точки зрения оценки морозостойкости бетона, но и позволяет характеризовать проницаемость материала для различных агрессивных жидкостей, устанавливая связь между структурой материала и внутренними напряжениями, вызванными усадочными деформациями. Обобщение данных по определению коэффициентов переноса вещества позволит более точно на стадии проектирования состава бетона прогнозировать морозостойкость.

## Литература

- Баженов Ю.М., Горчаков Г.И., Алимов Л.А. и др. Структурные характеристики бетонов. - Бетон и железобетон. - 1972. - № 9.- С. 19.
- Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. - М.: Стройиздат, 1979. - 332 с.
- Горчаков Г.И., Алимов Л.А., Воронин В.В. и др. Зависимость морозостойкости бетонов от их структуры и температурных деформаций. - Бетон и железобетон. - 1972. - № 10. - С. 7-10.
- Чеховский Ю.В., Лифшиц А.В. Ускоренные методы определения морозостойкости бетона. -Обзорная информация.- Выпуск 1.- Серия 3.-М. - 1986 - 45 с.
- Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах.-Мн.: Высшая школа, 1974. - 290 с.
- Бугрим С.Ф. Ускоренный метод оценки морозостойкости бетона.- М., 1977. - 89с. - (Сб.тр./ВНИИСТ, Вып.36).

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОМ ЭЛЕМЕНТЕ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА ПРИ ПОВТОРНОЙ НАГРУЗКЕ

Н. А. Колесников

Строительный факультет, БПИ

г. Брест, Беларусь

В работе приводятся результаты определения напряжений в центральном железобетонном элементе при действии многократно повторной ступенчато изменяющейся нагрузки. Показано, что для области условно линейной ползучести бетона решение, полученное в [1], является частным случаем более общего закона нагружения, рассмотренного в статье.

Ключевые слова: нагрузка, ползучесть, железобетонный элемент, интегральное уравнение, свертка, напряжения.

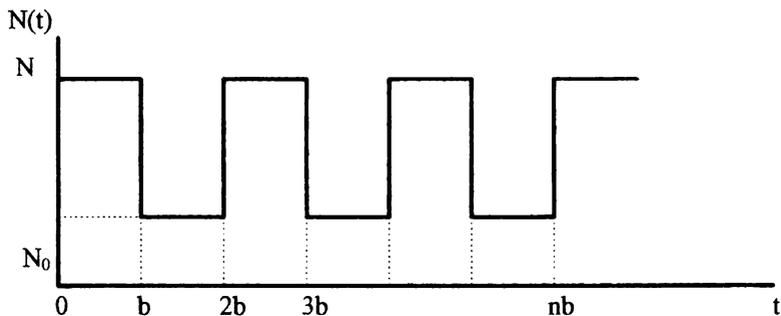
Рассмотрим центрально сжатый железобетонный элемент нагрузкой  $N(t)$ , меняющейся во времени по графику:

Показанный график изменения нагрузки можно аппроксимировать функцией вида:

$$N(t) = \sum_{(n)} [N_0 + (N - N_0)U(nb)] \quad (1)$$

где функция  $U(nb)$  принимает значения [1]:

$$U(nb) = \begin{cases} 0 & \text{при } 2nb < t < (2nb + 1)b; \\ 1 & \text{при } (2n + 1)b < t < (2n + 2)b; n = 0, 1, 2, \dots \end{cases}$$



Для случая загрузки нагрузкой  $N(t)=N=\text{const}$  задача определения напряжений в бетоне с  $E(\tau) = E_0 = \text{const}$  центрально сжатого железобетонного элемента с учетом ползучести сводится к решению следующего интегрального уравнения [2]:

$$\sigma_6(t) = \frac{N}{F_6(1 + \mu m)} + \frac{\mu E_a}{(1 + \mu m)} \int_{\tau_1}^t \sigma_6(\tau) \frac{\delta}{\delta \tau} \left[ \frac{1}{E_0} + C(t - \tau) \right] d\tau$$

где  $\sigma_6(t)$  - напряжения в бетоне с учетом ползучести;

$F_6$  - площадь бетона;

$E_0$  - модуль упругости бетона;

$E_a$  - модуль упругости арматуры;

$\mu = \frac{F_a}{F_6}$  - процент армирования;

$F_a$  - площадь арматуры;

$m = \frac{E_a}{E_0}$  - модульное отношение;

$C(t - \tau) = C_0 [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}]$  - мера ползучести бетона;

$C_0$  - предельное значение меры ползучести для данного бетона;

$\tau, t$  - соответственно момент загрузки и текущий момент времени;

$\gamma$  - опытный параметр.

Для рассматриваемого случая загрузки (1) будем иметь

$$\sigma_6(t) = \frac{N(t)}{F_6(1+\mu m)} + \frac{\mu E_a}{(1+\mu m)} \int_{\tau_1}^t \sigma_6(\tau) \frac{\delta}{\delta \tau} \left[ \frac{1}{E_0} + C(t-\tau) \right] d\tau$$

и после упрощений

$$\sigma_6(t) = \frac{N(t)}{F_6(1+\mu m)} - \frac{\mu E_a C_0 \gamma}{(1+\mu m)} \int_{\tau_1}^t \sigma_6(\tau) e^{-\gamma(t-\tau)} d\tau$$

Примем  $\tau_1=0$  и обозначим  $\frac{\mu E_a C_0 \gamma}{1+\mu m} = \lambda_0$ , тогда

$$\sigma_6(t) = \frac{N(t)}{F_6(1+\mu m)} - \lambda_0 \int_{\tau_1}^t \sigma_6(\tau) e^{-\gamma(t-\tau)} d\tau \quad (3)$$

Для решения линейного интегрального уравнения (3) воспользуемся преобразованием Лапласа [3]. Изображениями оригиналов будут :

$$F(s) \rightarrow \sigma_6(t); \quad G(s) \rightarrow \frac{N(t)}{F_6(1+\mu m)};$$

$$F(s)K(s) \rightarrow \int_0^t \sigma_6(\tau) e^{-\gamma(t-\tau)} d\tau,$$

е  $s = x+jy$  - комплексная переменная.

Таким образом, в пространстве изображений уравнение (3) получит вид :

$$F(s) = G(s) - \lambda_0 F(s)K(s) \quad (4)$$

Откуда изображение искомого оригинала будет равно :

$$F(s) = \frac{G(s)}{1 + \lambda_0 K(s)} \quad (5)$$

Найдем изображения  $G(s)$  и  $K(s)$  :

$$G(s) = \int_0^{\infty} \frac{N(t)e^{-st}}{F_6(1+\mu m)} dt = \frac{1}{F_6(1+\mu m)} \int_0^{\infty} e^{-st} \sum_{(n)} [N - (N - N_0)U(nb)] dt$$

и

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{1}{F_6(1+\mu m)} \int_0^{\infty} e^{-st} \sum_0^n [N - (N - N_0)U(nb)] dt = \\ &= \frac{1}{F_6(1+\mu m)} \left[ \int_0^{\infty} e^{-st} dt - (N - N_0) \sum_0^n \int_0^{\infty} e^{-st} dt \right] = \\ &= \frac{1}{F_6(1+\mu m)} \left[ N \frac{1}{s} - (N - N_0) \frac{1}{s} \sum_0^n \left[ e^{-(2n+1)bs} e^{-(2n+2)bs} \right] \right] = \\ &= \frac{1}{F_6(1+\mu m)} \left[ N \frac{1}{s} - (N - N_0) \frac{1}{s} (e^{-bs} - e^{-2bs} + e^{-3bs} - e^{-4bs} + \dots) \right] = \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{F_6(1+\mu m)} \left[ N \frac{1}{s} + (N - N_0) \frac{1}{s} \sum_1^n (-1)^n e^{-nbs} \right] \quad (6)$$

Для свертки функций  $\sigma_6(t)$  и  $e^{-\gamma t}$

$$\int_0^t \sigma_6(\tau) e^{-\gamma(t-\tau)} d\tau$$

на основании теоремы свертывания имеем

$$F(s)K(s) \rightarrow \int_0^t \sigma_6(\tau) e^{-\gamma(t-\tau)} d\tau$$

где

$$K(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} e^{-\gamma t} dt = \int_0^{\infty} e^{-(s+\gamma)t} dt = \frac{1}{s+\gamma} \quad (7)$$

Подставляя (6) и (7) в (5), получим:

$$F(s) = \left[ \frac{N}{F_6(1+\mu m)} \cdot \frac{1}{s} + \sum_1^n \frac{(-1)^n (N - N_0)}{F_6(1+\mu m)} \cdot \frac{e^{-nbs}}{s} \right] \cdot \frac{(s+\gamma)}{(s+\gamma+\lambda_0)}$$

Обозначим  $\gamma+\lambda_0=\alpha$ , тогда

$$F(s) = \frac{N}{F_6(1+\mu m)} \cdot \frac{(s+\gamma)}{s(s+\alpha)} + \sum_1^n \frac{(-1)^n (N - N_0)}{F_6(1+\mu m)} \cdot \frac{e^{-nbs}}{s} \cdot \frac{(s+\gamma)}{(s+\alpha)}$$

Представим дробь  $\frac{(s+\gamma)}{s(s+\alpha)}$  в виде суммы простейших дробей. Так как кор-

нями многочлена  $s(s+\alpha)$  будут числа  $s_1=0$  и  $s_2=-\alpha$ , то используя метод неопределенных коэффициентов, получим:

$$\frac{(s+\gamma)}{s(s+\alpha)} = \frac{d_1}{s-s_1} + \frac{d_2}{s-s_2} = \frac{d_1}{s} + \frac{d_1}{s+\alpha} = \frac{(d_1+d_2)s+d_1 \cdot \alpha}{s(s+\alpha)}$$

Приравняв множители при одинаковых степенях  $s$  в числителях слева и справа, получим уравнения:

$$d_1 + d_2 = 1 \quad \text{и} \quad d_1 \cdot \alpha = \gamma$$

из которых найдем

$$d_1 = \frac{\gamma}{\alpha}; d_2 = \frac{\alpha - \gamma}{\alpha} = \frac{\lambda_0}{\alpha}$$

Следовательно  $\frac{s+\gamma}{s(s+\alpha)} = \frac{\gamma}{\alpha} \cdot \frac{1}{s} + \frac{\lambda_0}{\alpha} \cdot \frac{1}{(s+\alpha)}$ . Тогда:

$$F(s) = \frac{N}{F_6(1+\mu m)} \left[ \frac{\gamma}{\alpha} \cdot \frac{1}{s} + \frac{\lambda_0}{\alpha} \cdot \frac{1}{s+\alpha} \right] + \sum_1^n \frac{(-1)^n (N - N_0)}{F_6(1+\mu m)} \left[ \frac{e^{-nbs}}{s} \cdot \frac{\gamma}{\alpha} + \frac{\lambda_0}{\alpha} \cdot \frac{e^{-nbs}}{s+\alpha} \right] \quad (8)$$

Используя таблицу соответствий [3], найдем оригинал полученного изображения. Так как:

$$\frac{\gamma}{\alpha} \cdot \frac{1}{s} + \frac{\lambda_0}{\alpha} \cdot \frac{1}{(s+\alpha)} \rightarrow \frac{\gamma}{\alpha} + \frac{\lambda_0}{\alpha} e^{-\alpha t}, \text{ а}$$

$$\frac{\gamma}{\alpha} \cdot \frac{e^{-nbs}}{s} + \frac{\lambda_0}{\alpha} \cdot \frac{e^{-nbs}}{(s+\alpha)} \rightarrow \frac{\gamma}{\alpha} U(nb) + \frac{\lambda_0}{\alpha} U(t-nb)$$

где  $U(t-nb) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < t < nb \\ e^{-\alpha(t-nb)} & \text{при } nb < t \end{cases}$

то

$$\sigma_{\delta}(t) = \frac{N}{F_{\delta}(1+\mu m)} \left( \frac{\gamma}{\alpha} + \frac{\lambda_0}{\alpha} e^{-\alpha t} \right) + \sum_1^n \frac{(-1)^n (N - N_0)}{F_{\delta}(1+\mu m)} \frac{\gamma}{\alpha} U(nb) +$$

$$+ \sum_1^n \frac{(-1)^n (N - N_0)}{F_{\delta}(1+\mu m)} \frac{\lambda_0}{\alpha} U(t-nb)$$

После упрощений получим:

$$\sigma_{\delta}(t) = \frac{\gamma N(t)}{\alpha F_{\delta}(1+\mu m)} + \frac{\lambda_0}{\alpha F_{\delta}(1+\mu m)} \sum [N e^{-\alpha t} - (N - N_0) U(t-nb)] \quad (9)$$

Как следует из (9), при действии нагрузки  $N(t) = N = \text{const}$  напряжения в бетоне будут равны:

$$\sigma_{\delta}(t) = \frac{N}{\alpha F_{\delta}(1+\mu m)} (\gamma + \lambda_0 e^{-\alpha t}) \quad (10)$$

откуда при  $t \rightarrow 0$

$$\sigma_{\delta} = \frac{N}{\alpha F_{\delta}(1+\mu m)} \quad (11)$$

т.е. соответствуют упруго-мгновенным напряжениям в железобетонном элементе с процентом армирования  $\mu$ .

$$\text{При } t \rightarrow \infty \quad \sigma_{\delta} - \sigma_{\delta}(t) = \frac{N}{\alpha F_{\delta}(1+\mu m)} \left( 1 - \frac{\gamma}{\alpha} \right) \quad (12)$$

Воспользоваться характеристиками меры ползучести, принятыми для железобетонной колонны в работе [1]:

$$C_0 = 0.9 \cdot 10^{-5} \text{ (кг/см}^2\text{)}^{-1}; \quad \gamma = 0.026 \text{ (сут)}^{-1};$$

$$E_a = 2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2; \quad m = 10; \quad \mu = 3 \%,$$

получим

$$\lambda_0 = \frac{\mu E_a C_0 \gamma}{1 + \mu m} = \frac{0.03 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 0.9 \cdot 10^5 \cdot 0.026}{1 + 0.03 \cdot 10} = 0.0108 (\text{с} \cdot \text{у})^{-1}$$

$$1 - \frac{\gamma}{\alpha} = 1 - \frac{\gamma}{\gamma + \lambda_0} = 1 - \frac{0.026}{0.026 + 0.0108} = 0.294$$

Таким образом, величина уменьшения напряжений в бетоне в данном случае доходит до 30 %. В работе [1] получен результат, равный 35 %. Кажущееся противоречие объясняется тем, что в работе [1] колонна была загружена в возрасте бетона  $\tau_1 = 28$  сут., в то время как решение (12) получено в предположении  $\tau_1 \gg 28$  сут.

#### Литература

1. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехтеорпроектидат, М., 1952.
2. Roberts G.E., Kaufman H. Nable of Laplace transforms, 1966.
3. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. "Наука", М., 1971.

### ЯЧЕИСТЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ ФОСФОГИПСА

Л.В. Красулина, И.Л. Потапова  
Строительный факультет, БГПА,  
г. Минск, Республика Беларусь.

Изложены результаты исследований основных вопросов технологии поризованного бетона на основе фосфогипса. Показана эффективность использования пенообразователей для получения ячеистого бетона. Приведены данные о физико - механических характеристиках полученного материала.

Ключевые слова: Поризация, пенообразователь, фосфогипсовое вяжущее.

Мировая практика показала высокую техническую и экономическую эффективность ячеистых бетонов. Общепринятая технология изготовления автоклавного ячеистого бетона (обработка изделий паром высокого давления в металлических автоклавах) малодоступна для многих строительных организаций, объединений сельскохозяйственного комплекса. Возможность получения ячеистого бетона с нормируемыми свойствами в условиях нормального твердения или тепловой обработки при атмосферном давлении значительно упрощает и

удешевляет технологию, а также не требует привлечения высококвалифицированных кадров.

Эффективность производства ячеистых строительных материалов во многом определяется выбранным способом поризации ячеисто-бетонной смеси, рациональность которой можно оценить по следующим основным показателям:

- возможность формирования в материале высокой степени пористости с минимальной дефектностью ячеистой структуры;
- технологичности процессов приготовления формовочной массы и формирования из нее изделий или монолитных конструкций.

Существует достаточно большое количество приемов, позволяющих в той или иной степени направленно регулировать как объем, так и характер структуры пористости.

Широкое применение при изготовлении высокопористых ячеистых материалов получил способ поризации, основанный на введении воздуха в жидкотекучие массы, содержащие поверхностно-активные вещества, равномерном его распределении в виде ячеек и стабилизации образовавшейся пеномассы.

Структура пен определяется в основном соотношением объемов жидкой и газовой фаз, и в зависимости от этого соотношения ячейки пены могут иметь сферическую и многогранную форму. Устойчивость пены зависит от вида пенообразователя, начальной кратности пены, температуры и вязкости раствора. В устойчивых пенах в течении продолжительного времени пленки пены не разрываются, а происходит постепенное диффузионное укрупнение пузырьков. С увеличением воздушных пор утолщаются перегородки и, следовательно, в них увеличивается масса жидкости. В результате снижается устойчивость пены, так как под действием гравитации происходит истечение жидкости из разделяющих пузырьки воздуха пленок - синерезис пены. Для ликвидации синерезиса пены вводят различные стабилизаторы.

В наших работах в качестве пенообразователя применяли смолу древесно-омыленную. В качестве минерализаторов-стабилизаторов исследовались казеиновый клей, желатин, синтетический латекс и мелкодисперсные минеральные порошки.

Установлено, что использование в качестве стабилизаторов латекса и коллоидных загустителей (казеиновый клей) является неэффективным. Вероятность полимеризации латекса в объеме пены с целью увеличения его прочности не подтвердилась. Пена получилась неустойчивой. При использовании клея в

пене сразу после приготовления наблюдалось истечение межпленочной жидкости.

Устойчивая пена получена при введении в раствор пенообразователя мелкодисперсных (с удельной поверхностью 2000...4000 см<sup>2</sup>/г) минеральных порошков: природного гипса, гипсового или фосфогипсового вяжущего, шлака, цемента. Предложенная пена используется при изготовлении теплоизоляционных ячеистых материалов на основе фосфогипсового вяжущего, полученного из промышленных отходов Гомельского химзавода. Фосфогипс Гомельского завода - отход производства фосфорной кислоты - является перспективным вторичным сырьем для переработки в строительные материалы и изделия. Фосфогипсовое вяжущее - экологически чистый в производстве и эксплуатации материал.

Пенофосфогипсовая смесь для производства теплоизоляционных материалов готовится по трехстадийной технологии, которая включает в себя раздельное приготовление пены, жидкотекучих минеральных компонентов и смешение их между собой до получения пеномассы с заданной плотностью. Теплоизоляционный материал изготавливается на основе фосфогипсового вяжущего марки Г-4. Использование вяжущего более низкой марки нежелательно, так как в этом случае материал будет иметь пониженную прочность. Для поризации в фосфогипсовую смесь вводится пена, полученная на основе смолы древесноомыленной и стабилизатора: гипсового или фосфогипсового вяжущего.

Введение в формовочную смесь пены приводит к резкому увеличению сроков схватывания теста. Конец схватывания наступает через 7...12 часов после затворения смеси и зависит от количества пены. Поэтому в смесь следует дополнительно вводить активирующую добавку. Значительно ускоряют сроки схватывания фосфогипсового вяжущего соединения, содержащие одноименный с фосфогипсом ион (SO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup>. Наибольший эффект был достигнут, когда в пенофосфогипсовую смесь вводили сульфат калия (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). В этом случае образцы расплубливали через 1,0...2,0 часа.

Для повышения прочностных показателей пенофосфогипсовых теплоизоляционных материалов их армируют отходами деревообрабатывающей промышленности или сельского хозяйства (опилки, костра льна, солома). Применение заполнителей растительного происхождения обусловлено их высокой адгезионной способностью по отношению к фосфогипсовому вяжущему, возможностью снижения плотности материала.

В производстве пенофосфогипса важное значение имеет правильный выбор водогипсового отношения. При малом содержании воды смесь фосфогипса и воды получается жесткой и при перемешивании с пеной образуются комочки, наличие которых снижает прочность материала. Кроме того, при перемешивании жестких растворов происходят более интенсивные процессы гашения пены, что приводит к повышению средней плотности пенофосфогипса. Избыток воды затверения приводит к возрастанию количества

Составы пенофосфогипсовых теплоизоляционных материалов определены исходя из требования получения минимальных значений плотности и теплопроводности при удовлетворительной прочности и максимально возможном использовании отходов производства. Плотность полученного материала варьируется от 500 кг/м<sup>3</sup> до 300 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность от 0,128 до 0,078 Вт/(м . град), предел прочности при сжатии - от 0,7 Мпа до 0,3 МПа.(табл.)

По разработанной технологии выпущена опытная партия теплоизоляционных пенофосфогипсовых плит. Разработан проект технических условий на плиты теплоизоляционные пенофосфогипсовые.

Таблица

Физико-механические свойства и теплофизические характеристики пенофосфогипсовых теплоизоляционных материалов

Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа	Теплопроводность, Вт/(м.К)
500	0,70	0,128
450	0,51	0,115
400	0,40	0,097
350	0,32	0,086
300	0,30	0,078

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОФАКТОРНЫХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИЗНОСА ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

И. А. Кудрявцев, С. И. Антохов

Белорусский Государственный университет транспорта  
г. Гомель, Республика Беларусь.

В статье представлена методика формирования математической модели по определению физического износа фундаментов зданий и сооружений. Получены регрессионные зависимости износа фундаментов.

Ключевые слова: фундамент, фактор, износ, корреляция, классификация, регрессия, модель.

Исследования в задаче построения многофакторных моделей износа фундаментов зданий и сооружений требуют использования обширного статистического материала. Это обусловлено необходимостью моделирования и прогнозирования работы сооружения под влиянием различных условий эксплуатации. Имея обширную статистику физического износа сооружений под воздействием ряда факторов, возможно прогнозирование остаточного срока службы сооружения, периодичности и сложности проводимых ремонтов.

Аналізу подвергались статистические данные, полученные при обследовании реальных объектов (см. табл. 1).

$У$  – величины износа фундамента;  $X_1$  – время эксплуатации;  $X_2$  – продолжительность вибрации, за время эксплуатации;  $X_3$  – ускорение в грунтовой массе;  $X_4$  – интервал отдыха сооружения от динамического воздействия;  $X_5$  – модуль деформации грунта основания;  $X_6$  – жесткость сооружения;  $X_7$  – износ канализации;  $X_8$  – износ водоснабжения;  $X_9$  – качество возведения объекта;  $X_{10}$  – отклонение от паспортной прочности материала;  $X_{11}$  – неравномерная осадка.

Весь процесс формирования математической модели состоял из следующих этапов.

### Этап 1. Классификация исходных признаков.

На данном этапе производится классификация, конечной целью которой является нахождение групп признаков, которые в рамках одной группы характеризовали бы проявления одного фактора. На этом этапе проводится классификация с использованием факторного анализа — анализ по исходным призна

Таблица 1

## Величины физического износа и значения факторов воздействия

Y	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>
14	8	1,1	0,31	25	10,5	1	21	14	5	12	13
9	10	0,2	0,11	111	21,4	1,3	17	11	4	4	4
31	18	1	0,22	18	27,1	1	17	17	4	2,4	14
20	21	—	—	—	27,6	1	80	80	5	1	15
24	10	0,6	0,18	15	28,4	1,3	65	65	4	14	4
8	5	0,5	0,14	10	14,3	1	10	10	4	6	3
7	4	0,8	0,1	6	21,5	1,3	7	9	5	3	5
15	8	0,5	0,08	16	16,3	1,5	11	15	4	4	5
19	9	0,4	0,18	21,5	14,4	1,3	15	18	4	7	4
23	10	1	0,14	10	27,8	1,3	21	24	4	9	3
28	18	0,5	0,1	20	11,3	1	31	37	5	4	12
52	31	3,1	0,11	10	16,1	1,4	94	100	5	3	14
14	10	0,6	0,5	16,2	10,3	1,2	51	67	4	8	9
20	14	0,8	0,4	17,1	14,5	1,3	83	94	3	11	14
20	11	1	0,07	11	18,1	1,4	54	59	5	3	10
28	23	1,3	0,26	18	13,2	1,6	80	51	4	4	22
44	25	1,7	0,26	15	17,6	1,7	56	4	4	6	24
27	18	0,6	0,14	30	19,4	1,8	37	31	4	6	21
10	5	—	—	—	12,3	1,4	12	14	4	11	4
8	4	—	—	—	10,4	1,3	12	15	4	11	4
17	10	—	—	—	10,6	1,4	31	36	4	5	6
19	14	—	—	—	13,7	1,1	57	54	5	5	8
28	15	0,6	0,08	25	14,5	1	51	51	4	5	9

кам с выделением двух главных компонент, корреляционного анализа — по значениям суммарных корреляций исходных признаков, полученных на основе матрицы парных корреляций (см. табл.2), а также производится кластерный анализ по исходным признакам по следующим методам:

Таблица 2

## Корреляционная матрица по исходным признакам

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	Y
X1	1,0	,74	,03	-,09	-,09	,38	,68	,41	,05	-,30	,76	,93
X2	,74	1,0	,02	-,34	-,03	,26	,59	,41	,34	-,18	,47	,77
X3	,03	,02	1,0	-,12	-,33	-,04	,31	,28	-,42	,50	,31	-,06
X4	-,09	-,34	-,12	1,0	,08	,01	-,20	-,23	-,15	-,10	-,13	-,26
X5	-,09	-,03	-,33	,08	1,0	,13	-,17	-,17	-,14	,05	-,25	,07
X6	,38	,26	-,04	,01	,13	1,0	,33	,05	-,18	-,11	,49	,32
X7	,68	,59	,31	-,20	-,17	,33	1,0	,86	-,14	,16	,52	,63
X8	,41	,41	,28	-,23	-,17	,05	,86	1,0	-,09	,19	,16	,38
X9	,05	,34	-,42	-,15	-,14	-,18	-,14	-,09	1,0	-,34	,04	,05
X10	-,30	-,18	,50	-,10	,05	-,11	,16	,19	-,34	1,00	-,15	-,18
X11	,76	,47	,31	-,13	-,25	,49	,52	,16	-,04	-,15	1,00	,63
Y	,93	,77	-,06	-,26	,07	,32	,63	,38	,05	-,18	,63	1,00

- по методу иерархической классификации (см. рис. 1 и табл. 3);
- по методу К-средних (см. табл. 3).

Для облегчения последующего сравнения результатов различных классификаций, желательно получать одинаковое количество групп.

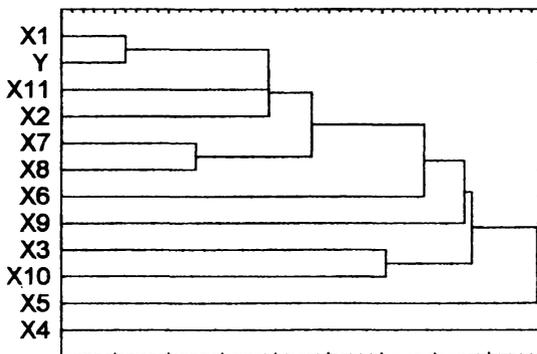


Рис. 2. Схема иерархической классификации

Таблица 3

Результаты согласования вариантов классификаций признаков

Группа	Иерархическая	К-средние	Окончательная
1	X1, Y, X11, X2, X7, X8	X1, X, X6, X7, X8, X11, Y	X1, X2, X7, X8, X11, Y
2	X6, X9, X3, X10	X9	X9, X6
3	X5, X4	X3, X4, X5, X10	X3, X4, X5, X10

## 2. Выбор информативных признаков.

Цель нахождения информативных (наиболее значимых) признаков  $X_i$  состоит в том, чтобы при выполнении следующего этапа можно было значительно сократить количество исследуемых регрессионных моделей. Существуют методики выделения значимых факторов, основанные на использовании матрицы парных корреляций. Признак определяется как информативный, если коэффициент его корреляции с целевым свойством выше порогового минимально допустимого значения, т.е.  $R_{i0} > R_{\text{дон}}$  ( $R_{\text{дон}}$  как правило равен 0.55). Также, значимый фактор можно выделить при определении порогового значения ( $R_{\Pi}$ ) посредством выявления скачка в отсортированном по возрастанию векторе суммарных корреляций признаков  $R_i = \sum_{j=0}^{11} R_{ij}$  (см рис. 3). Таким образом при выполнении условия  $R_i > R_{\Pi}$  признак  $X_i$  считается информативным.

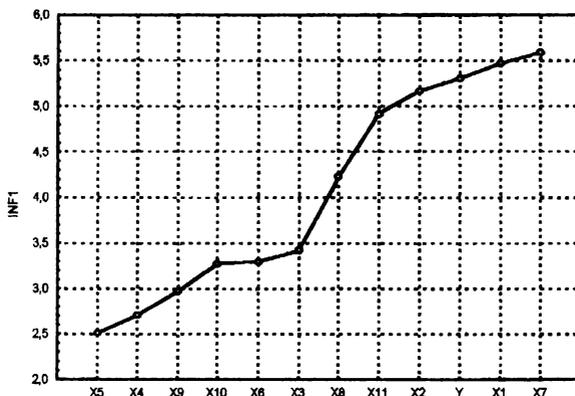


Рис.3. Диаграмма упорядоченных по возрастанию значений суммарных корреляций признаков.

Таблица 4

Группы информативных признаков

Группа	Значимые признаки
1	У, X1, X2, X7
2	X9
3	X4, X10

3. Составление регрессионных моделей и оценка их точности.

На данном этапе, с помощью итерационного процесса подключения информативных признаков из полученных классификацией групп значимых признаков, формируются линейные регрессионные модели, путем вычисления параметров регрессионной зависимости методом наименьших квадратов.

Итерационный процесс формирования регрессионных уравнений состоит в выборе наиболее информативного признака, отслеженного в процессе выполнения предыдущих этапов, и построения регрессионного уравнения  $Y=f(X_i)$ . При этом оценивается коэффициент точности формирования регрессионной модели  $i$ -м нормативным объясняющим признаком ( $\eta_i$ ). На второй итерации в полученную модель добавляется следующий за первым информативный признак ( $X_j$ ) и строится новое регрессионное уравнение:  $Y=f(X_i, X_j)$  (см. табл. 5). Оценивая полученный коэффициент точности (коэффициент корреляции), возможно иметь два случая:

1.  $\eta_i \geq \eta_{ij}$  --- для всех  $i$  и  $j$  означает, что множественная регрессия хуже описывает процесс формирования целевого свойства, в нашем случае износ фундаментов, и надо остановиться на предыдущем уравнении;
2.  $\eta_i < \eta_{ij}$  --- процесс построения регрессионных моделей надо продолжить.

Полученное уравнение регрессионной зависимости на последней итерации, при которой выполняется условие 1, является итоговым ( см. табл. 5).

Надо заметить, что в итоговом уравнении желательно присутствие хотя бы одного информативного члена каждой группы, что обеспечит полноту описания факторных влияний на целевое свойство (износ фундаментов) и следовательно повысит качество модели.

Таблица 5

Уравнения регрессии и характеристики качества регрессионных оценок целевого свойства по информативным объясняющим признакам.

Коэффициенты уравнения регрессии при информативных признаках из групп *						Характеристики качества		
1			2	3		Своб. чл.	R	StErr
X1	X2	X7	X9	X4	X10		8	9
1	2	3	4	5	6	7		
905174	-	-	-	-	-	-0,024	0,905	3,448
-	818377	-	-	-	-	156319	0,774	7,639
-	-	609871	-	-	-	-0,003	0,610	13,817
-	-	-	101398	-	-	0,0028	0,101	21,774
-	-	-	-	-274983	-	156319	0,259	17,739
-	-	-	-	-	-261391	0,0023	0,261	20,497
832369	190606	-	-	-	-	82138	0,94	2,20
994107	-	-120969	-	-	-	0,0348	0,909	3,827
914515	-	-	-547200	-	-	-0,004	0,907	3,911
955800	-	-	-	-192332	-	71114	0,95	1,861
985814	-	-	-	-	180074	0,019	0,919	3,404
860862	200794	-53034	-	-	-	80295	0,941	2,18
826068	200071	-	-13675	-	-	81722	0,940	2,206
894044	87104	-	-	-168154	-	76641	0,951	1,81
871962	181041	-	-	-	113824	81507	0,945	2,022
853481	226761	-67926	-33384	-	-	78763	0,941	2,17
943016	97430	-84581	-	-177775	-	73387	0,953	1,75
990210	208496	-174033	-	-	184960	75063	0,951	1,82
935565	123725	-99701	-33864	-177855	-	71830	0,953	1,74
998246	194453	-169564	18358	-	190647	75745	0,951	1,82
1067287	98560	-193460	146890	-169062	178814	69342	0,962	1,43

\* - значения коэффициентов уравнения регрессии увеличены в  $10^6$ .

Таким образом, по нашим исследованиям получена следующая модель, которая наиболее адекватно описывает процесс формирования износа фундаментов:

$$Y = 0,069342 + 1,067287X_1 + 0,098560X_2 - 0,193460X_7 + 0,146890X_9 - 0,169062X_4 + 0,178814X_{10}$$

### Литература

1. Кудрявцев И.А., Пироговский К.Н. Методические рекомендации по определению физического износа жилых, общественных, промышленных зданий и транспортных сооружений и примерный состав восстановительных работ. Гомель, БелГУТ, 1995.
2. Лукомский Я.И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. М.: Госстатиздат, 1958.

## ПОЛУЧЕНИЕ НЕЙТРАЛИЗОВАННОГО ФОСФОГИПСА- ПОЛУФАБРИКАТА

Н. Н. Лаптик, Л. В. Сысоева  
Строительный факультет, БГПА,  
г. Минск, Беларусь

Отход производства экстракционной фосфорной кислоты - фосфогипс после нейтрализации пригоден для использования в качестве сырья для гипсовой и цементной промышленности. Разработан новый эффективный способ нейтрализации фосфогипса, позволяющий достичь глубокой нейтрализации материала. Подобрано и испытано необходимое оборудование. Определены параметры технологического процесса.

Ключевые слова: Фосфогипс, фосфогипс-полуфабрикат, нейтрализация, добавка-нейтрализатор, грануляция, сушка.

Республика Беларусь не располагает разрабатываемыми запасами природного гипсового камня, используемого в качестве сырья в гипсовой и цементной промышленности. Поэтому, учитывая высокую стоимость привозного материала, целесообразно использовать гипсодержащие отходы промышленности. Так на Гомельском химическом заводе производственные мощности предусматривают образование более 770 тыс. т фосфогипса в год. К настоящему времени в отвалах завода его скопилось около 13 млн. т.

Фосфогипс - побочный продукт производства экстракционной фосфорной кислоты, которая в последующем большей частью используется на получение простых и сложных удобрений, содержащих фосфор в водорастворимой форме. При сернокислотном разложении апатита на каждую тонну  $P_2O_5$  в виде фосфорной кислоты образуется до 4,25 т фосфогипса (в расчете на сухой материал). Транспортирование фосфогипса в отвалы и его хранение связано с большими материальными затратами, а также с загрязнением окружающей среды, которое проявляется в загрязнении атмосферного воздуха, подземных и поверхностных вод, почвенно-растительного покрова.

По своему минералогическому составу фосфогипс удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к гипсовому сырью для цементной и гипсовой промышленности. Однако наличие в фосфогипсе вредных примесей - остатка фосфорной и других кислот, фосфатов, фторидов и т.д. - затрудняет его использование.

Разработанные и реализованные в настоящее время в производстве технологии получения гипсовых вяжущих из фосфогипса для снижения негативного влияния примесей на свойства готового продукта предусматривают в основном их отмывку или химическую нейтрализацию без удаления продуктов реакции из фосфогипса, а также комбинацию этих способов. Эти способы дают возможность получить достаточно качественное сырье для производства гипсовых вяжущих. Однако следует отметить, что отмывка фосфогипса требует большого расхода чистой воды (3...7 куб. м на 1 т вяжущего) и больших затрат на ее очистку. Химическая нейтрализация примесей позволяет работать в замкнутом цикле и обойтись без сброса отработанной воды. Так как при этом необходима репульпация фосфогипса, способ также требует использования громоздкого технологического оборудования и, как следствие, больших капитальных затрат. К тому же указанные способы подготовки сырья позволяют устранить влияние водорастворимых примесей, находящихся на поверхности отдельных кристаллов, и в какой-то степени в промежутках между агрегированными частицами, и не позволяют воздействовать на примеси, находящиеся в порах кристаллов.

В Межотраслевой научно-исследовательской лаборатории новых строительных материалов Белорусской государственной политехнической академии была поставлена задача разработать способ нейтрализации фосфогипса, позволяющий устранить недостатки описанных выше способов.

При проведении работ по нейтрализации была разработана специальная концепция, содержащая ряд научных и технологических положений.

Первое положение концепции гласит, что реакция взаимодействия кислых примесей фосфогипса с добавкой-нейтрализатором наиболее быстро и полно проходит в водной среде при их растворении. Поэтому создавались условия для растворения примесей.

Согласно второму положению, количество жидкой фазы должно быть минимальным. Выполнение этого положения дает возможность отказаться при разработке способа нейтрализации от репульпации и обезвоживания фосфогипса и, следовательно, от связанных с этими операциями капитальных затрат. При этом используется фосфогипс при его начальной влажности (после получения в технологической линии при производстве фосфорной кислоты). Содержание свободной влаги в материале колеблется в пределах 20...30 %. Использование фосфогипса с влажностью менее 20 % не допускается, так как содержащейся в нем воды недостаточно для смачивания частиц материала и заполнения пространства между ними. Фосфогипс становится рыхлым, рассыпчатым, растворение примесей и добавки-нейтрализатора значительно затрудняется. Использование фосфогипса с влажностью более 30 % также нежелательно из-за высокой текучести нейтрализованного материала и повышения энергозатрат на его сушку.

Третье положение говорит, что для нейтрализации примесей, находящихся между агрегатированными частицами и в порах крупных кристаллов фосфогипса, агрегаты кристаллов и крупные зерна необходимо разрушить, при этом становится возможным взаимодействие между этими примесями и добавкой-нейтрализатором и, следовательно, их нейтрализация.

Последнее четвертое положение указывает на необходимость равномерного распределения добавки-нейтрализатора между частицами фосфогипса. Перемешивание фосфогипса с добавкой в лопастном смесителе не дает нужного результата, т.к. происходит распределение частиц добавки не между кристаллами фосфогипса, а между его комками и агрегатированными зернами.

Для выполнения условий третьего и четвертого положений было подобрано и испытано необходимое оборудование, обеспечивающее необходимую производительность, и позволяющее создать необходимые условия для взаимодействия примесей с добавкой-нейтрализатором: разрушить агрегаты кристаллов и крупные частицы; равномерно распределить частицы добавки между зернами

фосфогипса. Материал в процессе нейтрализации теряет сыпучесть и приобретает пастообразное состояние.

Затаривание в емкости, транспортировка и использование полученного материала затруднительна. Поэтому необходима его грануляция и сушка. Удовлетворительная грануляция нейтрализованного фосфогипса достигается экструзионным методом.

Для определения влажности, до которой следует высушивать нейтрализованный гранулированный материал, из гранул с различной влажностью вырезали образцы кубической формы и определяли их плотность и предел прочности при сжатии. Результаты исследований представлены в таблице.

Таблиц

Физико-механические свойства гранул

Влажность, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа
0	1490	4,18
2,82	1520	2,08
6,34	1580	1,25
9,35	1660	1,00
12,87	1700	0,79

Были определены также физико-механические свойства нейтрализованной гранулированного фосфогипса, к которому во время грануляции добавили 20 % гипсового вяжущего Минского завода гипса. Результаты получили следующие: плотность гранул - 1220 кг/м<sup>3</sup>; предел прочности при сжатии гранул с нулевой влажностью - 0,29 МПа.

Проводили также опудривание гранул фосфогипса гипсовым вяжущим сразу после их получения. Результат получился неудовлетворительным, так как при высыхании гранулы существенно уменьшались в объеме и гипсовая корка отслаивалась и осыпалась.

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что гранулировать нейтрализованный фосфогипс следует без использования связующих добавок, а полученные гранулы высушивать до влажности не более 3 %. В таком виде их можно отправлять на дальнейшую переработку, так как материал легко транспортируется а его гранулы не разрушаются.

Разработанный способ дает возможность получать нейтрализованный гранулированный фосфогипс-полуфабрикат, пригодный для использования в гипсовой и цементной промышленности вместо природного гипсового камня.

В результате проведенных работ была разработана новая технология нейтрализации фосфогипса. Схема технологического процесса производства нейтрлизованного фосфогипса-полуфабриката представлена на рисунке.

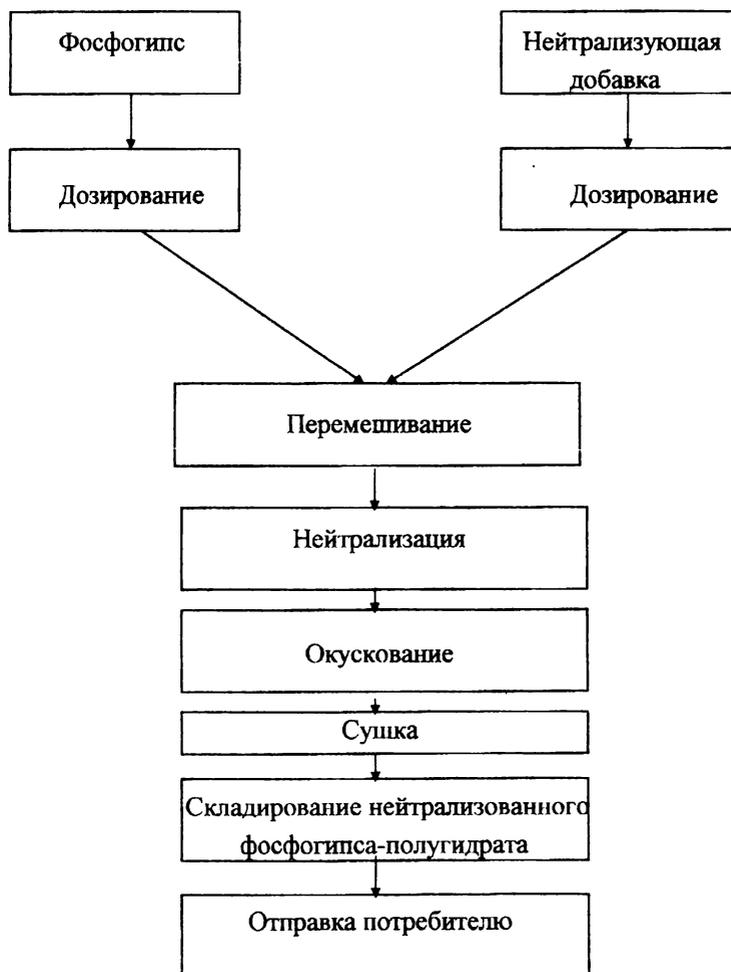


Рис. Схема технологического процесса производства нейтрализованного фосфогипса-полуфабриката

Технологический процесс - непрерывного действия. Дозирование исходных материалов осуществляют с помощью весовых дозаторов. Все последующие технологические операции также проводят, используя серийно производимое оборудование.

Технология предусматривает подготовку сырья путем химической нейтрализации примесей без удаления продуктов реакции из фосфогипса. В качестве нейтрализующей добавки используют известь, как наиболее распространенную нейтрализующую добавку. Специально разработанные метод и подборное оборудование позволяют использовать фосфогипс непосредственно из цепи производства экстракционной фосфорной кислоты или из отвала. Репульпация фосфогипса не требуется и, следовательно, не требуется и использование в технологической цепи громоздких репульпаторов и вакуум-фильтров. В то же время обеспечивается более глубокая нейтрализация материала, так как нейтрализуются не только примеси, находящиеся на поверхности кристаллов, и в промежутках между агрегированными частицами, но и в порах крупных кристаллов, так как происходит их разрушение.

Использование полученного по предлагаемой технологии нейтрализованного фосфогипса-полуфабриката позволит отказаться от импорта дорогостоящего природного гипсового камня, снизить себестоимость продукции, улучшить экологическую обстановку в районе нахождения отвалов фосфогипса.

## **ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ДОРОЖНЫХ ЦЕМЕНТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ**

И.И. Леонович, С.В. Богданович

Факультет дорожного строительства,

Белорусская государственная политехническая академия

г. Минск, Беларусь

В статье затрагиваются некоторые проблемы обеспечения качества цементобетонов в дорожном строительстве, факторы и причины, приводящие к разрушению цементобетонных покрытий. В целях предотвращения разрушения важно своевременно выполнять ремонтные мероприятия. Для наиболее эффективного их проведения необходимо прогнозировать изменение состояния покрытия с течением времени.

Ключевые слова: Цементобетон, качество, разрушение, прогнозирование

В настоящее время в дорожном строительстве достаточно широкое распространение получили цементобетонные покрытия. Высокие качества этих покрытий обеспечиваются как на стадии строительства - при точном соблюдении технологических требований, так и на стадии эксплуатации - при использовании специальных водозащитных средств и своевременном выполнении ремонтных работ. Актуальной задачей является своевременное определение участков покрытий, нуждающихся в ремонте. Для решения этой задачи необходимо прогнозировать изменение состояния покрытия с течением времени. В Белорусской государственной политехнической академии, а также в Белдорцентре ведутся исследования по прогнозированию изменения с течением времени основных транспортно-эксплуатационных показателей цементобетонных покрытий.

Ниже изложены некоторые проблемы, обозначившиеся в результате этих исследований.

#### 1. Проблемы обеспечения качества цементобетонов в дорожном строительстве

В Республике Беларусь цементобетон используется для строительства как дорог республиканского, так и местного значения. Возможность его применения обусловлена наличием развитой цементной промышленности. Высокие эксплуатационные качества таких дорог также позволяют широко применять цементобетонные покрытия.

Однако эксплуатация дорог с цементобетонными покрытиями показывает, что их долговечность несколько ниже ожидаемой, на поверхности возникают дефекты, приводящие к снижению ровности и, следовательно, к росту затрат на эксплуатацию транспорта. При формировании качественного дорожного бетона особое внимание необходимо уделять активности и химическому составу вяжущего, оптимизации структуры цементного камня и бетона в целом, соотношению крупного и мелкого заполнителя, соотношению всех компонентов материала. Важное значение имеет режим уплотнения и условия твердения бетона. К бетону для дорожных покрытий предъявляются повышенные требования прочности и морозостойкости. Значение имеет не только прочность на сжа-

тие, но и прочность на растяжение при изгибе. Получение высокопрочных бетонов основано на применении высокопрочных (алитовых) цементов М500 и М600. Понижение водоцементного отношения до определенного предела, зависящего от состава и способа уплотнения, приводит к повышению прочности бетона. Низкое водоцементное отношение (0.35 и менее) и высокая прочность бетона достигаются введением пластифицирующих добавок (например, С-3, ЛСТ и др.). Прочность, крупность и вид заполнителя оказывают влияние на свойства бетона. Если прочность зерен щебня ниже определенного предела, зависящего от материала щебня, то прочность бетона может существенно уменьшиться.

Вследствие капиллярно-пористой структуры дорожных бетонов и по причине их работы при отрицательных температурах в зимний период, важной характеристикой является морозостойкость. Как показывают экспериментальные исследования, морозостойкость бетона растет с увеличением его плотности. Это происходит вследствие того, что с уменьшением диаметра капилляров снижается температура замерзания воды. Разрушение от внутренних напряжений может произойти в тех случаях, когда поры в бетоне заполнены водой не менее, чем на 85..90% их общего объема. В обычных условиях эксплуатации дорожного покрытия такого водонасыщения не наблюдается. Однако, при замерзании бетона, которое происходит начиная от наружных слоев и постепенно распространяется в глубь конструкции, в нем создается градиент температуры, и влага из более теплых внутренних слоев мигрирует к более холодным наружным. Создаются условия для более полного насыщения пор бетона в зонах замерзания и для разрушения покрытия в этих зонах.

Независимо от причин разрушения, восстановление поверхности цементобетонного покрытия до требуемого качества требует значительных материальных и финансовых затрат. С учетом этого можно сделать вывод, что расширение применения цементобетонных покрытий и увеличение срока их эксплуатации тесно связано с решением проблемы совершенствования технологии строительства и содержания цементобетонных покрытий, а также своевременного выполнения ремонтных мероприятий.

## 2. Факторы и причины, приводящие к разрушению цементобетонных покрытий

Цементобетон представляет собой конгломерат, состоящий из природных каменных материалов и цементного камня. Последний представлен такими структурами как алит ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), белит ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), трехкальциевый алюминат ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), четырехкальциевый алюмоферрит ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) и др. Именно химический состав цементобетона обуславливает такое негативное явление как коррозия бетона. Основным требованием для получения прочных бетонов [1,2] является ограничение водоцементного отношения цементного геля (теста) ( $B/\Pi$ ) в бетонной смеси до такой степени, пока увеличивается прочность формируемого покрытия. На основе большого экспериментально-теоретического материала установлено влияние технологических факторов приготовления, уплотнения, режимов твердения на прочностные качества бетона. Численно это влияние может быть определено по формуле:

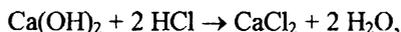
$$R_b = \frac{\alpha C R_d \sqrt{1 \pm \eta_x}}{\frac{1 + a_0 K_{\text{нг}}}{b K_{\text{нг}}} \left(\frac{B}{\Pi}\right)_b^{\text{ост}} - a_0 K_{\text{нг}}} \quad (1)$$

- где
- $\alpha$  - коэффициент, зависящий от  $K_{\text{нг}}$  и размеров образцов бетона;
  - $C$  - коэффициент,  $C=1.13$  для щебня и  $C=1.0$  для гравия;
  - $R_d$  - активность портландцемента;
  - $a_0, b$  - коэффициенты,  $a_0=1.65$  и  $b=1.0$  при приготовлении и уплотнении бетонной смеси не вызывающих пептизацию флокул цемента и  $a_0=2.0$  и  $b=1.22$  - при гомогенизации цементного геля;
  - $K_{\text{нг}}$  - водосодержание цементного геля нормальной густоты;
  - $\left(\frac{B}{\Pi}\right)_b^{\text{ост}}$  - остаточное содержание В/Ц бетонной смеси;
  - $\eta_x$  - содержание пылевидных фракций в заполнителях (если уплотнение бетонной смеси производится центрифугированием с удалением шлама,  $\eta_x$  принимается со знаком «плюс», в других случаях со знаком «минус»).

Характерным является то, что соединения  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , входящие в состав цементного камня, способны растворяться в мягкой дождевой воде и вымываться из бетона. При наличии в воде уголекислоты (отработанные газы транспортных средств) происходит следующая реакция:

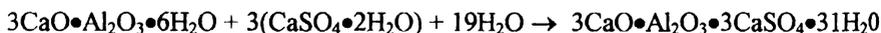


Образующийся бикарбонат кальция хорошо растворяется в воде. Если в воде содержатся свободные кислоты (кислотные осадки), процесс разрушения цементного камня идет еще быстрее:



где  $\text{CaCl}_2$  - легко растворимое соединение.

При попадании в цементный камень сульфата происходит сульфатная коррозия, образуется гипс, а затем гидросульфатаалюминат кальция:



Вследствие этого увеличивается объем твердой фазы, возникают внутренние напряжения и происходит разрушение цементного камня.

Кроме коррозии, на разрушение цементобетонных покрытий влияет ряд других факторов, к которым можно отнести:

- низкую механическую прочность бетона на истирание и знакопеременные нагрузки;
- повышенную пористость, особенно в верхней части покрытий;
- несоответствующее условиям работы количество условно замкнутых (резервных) воздушных включений;
- недостаточную коррозионную стойкость компонентов цементного камня и наполнителя.

На практике деформации и разрушения цементобетонных покрытий проявляются в виде шелушения с равномерным разрушением на глубину до 10 - мм верхнего слоя покрытия, откалывания кромок в зоне температурных швов краевых полос, образования трещин на поверхности и в общей массе дорожных покрытий, появления отдельных выбоин, раковин и др.

### 3. Проблемы прогнозирования изменения транспортно-эксплуатационных свойств цементобетонных покрытий

Вышеизложенные факторы, влияющие на разрушение цементобетонных покрытий, являются внутренними, имеющими материаловедческое и технологическое происхождение. При изучении разрушения цементобетонных покрытий автомобильных дорог необходимо также учесть и внешние факторы: напряжения от транспортных нагрузок (нормальные и касательные) и напряжения, которые возникают в конструктивных слоях дорожной одежды и земляного полотна под влиянием температуры, морозного пучения, сорбционных и осмотических сил.

Под воздействием внешних факторов на покрытиях возникают следующие дефекты: нарушение заполнения швов, повреждение кромок швов, просадки и выпучивания плит, коробление плит. Одним из наиболее распространенных дефектов является образование трещин.

Поперечные трещины на цементобетонных покрытиях могут образовываться либо по причине высокого напряжения в плитах, либо вследствие усталости материала.

Напряжения, возникающие в плитах, обусловлены преимущественно короблением вследствие действия температуры и влажности, а также действием транспортных нагрузок. Образование трещин вследствие усталости вызывается при многократном возникновении в бетонной плите напряжений, меньших прочности бетона на изгиб.

Представляет интерес модель развития трещин вследствие усталости [3]. Согласно этой модели, для определения развития трещин вследствие накопленной усталости необходимо кроме собственно усталости учесть следующие дополнительные факторы:

- прочностные характеристики бетона покрытия;
- характеристики транспортного потока;
- климатические факторы.

Основным климатическим фактором, влияющим на образование трещин вследствие усталости, является разность температур между верхней и нижней поверхностью плиты, выражаемая температурным градиентом. Положительный

температурный градиент вызывает выпуклое коробление плит, отрицательный градиент - вогнутое. В зависимости от величины температурного градиента на пражения в плите, вызванные короблением, могут быть равны или даже больше напряжений, вызванных транспортными нагрузками и результирующее напряжение может превысить предел прочности бетона. Основными факторами влияющими на температурный градиент являются температура воздуха, скорость ветра, продолжительность воздействия солнца. Таким образом, температурный градиент непрерывно изменяется в течение суток. Поскольку нет возможности учесть непрерывное изменение температурного градиента, важно получить статистические данные о распределении температуры воздуха в течение суток за несколько репрезентативных лет для условий Беларуси. Это позволит определить часовые температурные градиенты для некоторого «среднего» года и использовать их в дальнейшем в расчетах по прогнозированию трещинообразования.

Характеристиками транспортного потока, которые важно учесть, чтобы определить трещинообразование вследствие накопленной усталости являются: нагрузка на ось, интенсивность движения, распределение транспортных средств по полосе. Исследования интенсивности и состава потока ведутся в Беларуси уже в течение ряда лет. Большое значение имеет также распределение транспортных средств по полосам движения, особенно важно учесть автомобили, проходящие по краю плиты. Поскольку в настоящее время таких данных не имеется, можно использовать данные зарубежных исследований [4]. Вся нагрузка от транспортного движения преобразуется в количество приложений эквивалентной нагрузки в 82 кН. Считается, что 5% эквивалентной нагрузки приходится на край плиты. Учитывая тот факт, что в настоящее время в Республике Беларусь расчеты дорожных одежд ведутся для нагрузки 100 кН, необходимо нахождение коэффициентов пересчета.

При определении усталостного повреждения бетона учитываются среди прочих следующие свойства материала: модуль упругости бетона и предел прочности бетона. Модуль упругости возможно получить, используя результаты испытаний дорожной одежды при помощи дефлектометра падающего груза

(FWD). Предел прочности бетона может быть получен путем испытаний образцов, отобранных из различных участков дорожного покрытия.

Таким образом, одной из проблем строительства и эксплуатации дорожных цементобетонных покрытий является проблема прогнозирования развития трещин. Это достаточно трудоемкая задача и требует для своего решения учета большого количества различных факторов. Успешное решение проблемы прогнозирования развития трещин позволит продлить срок службы цементобетонных покрытий, а также более рациональным образом использовать средства, выделяемые на ремонт автомобильных дорог.

#### Литература

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М., Стройиздат, 1981
2. Ахвердов И.Н. Теоретические основы бетоноведения. Минск, 1991
3. ERES Consultants (1995) Performance of Concrete Pavements, Volume III: Improving Concrete Pavement Performance. U.S. Department of Transportation and Federal Highway Administration. Champaign, Illinois, 1995
4. Smith K.D., et al, Performance of Jointed Concrete Pavements. Federal Highway Administration/ ERES Consultants, Ink. Illinois, 1990

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОГО ВИБРИРОВАННОГО БЕТОНА

С.Н. Леонович

БГПА

Минск, Беларусь

Рассмотрены результаты равновесных испытаний высокопрочного бетона на местных материалах и проанализирована сопротивляемость образованию и развитию трещин в высокопрочном бетоне.

Ключевые слова. Высокопрочный бетон, вязкость разрушения, хрупкость.

Под высокопрочными бетонами (High-Strength Concrete), согласно принятым в рамках международных организаций по строительству ФИП и ЕКБ новым терминам и их определениям, понимаются все бетоны, имеющие прочность на сжатие в цилиндрах от 60 до 130 Мпа (или от 72 до 156 Мпа в кубах).

Были проведены равновесные испытания высокопрочных бетонов, полученных на местных материалах в БелНИИС под руководством профессора Н.П.Блещика.

Применялись портландцемент ПЦ 600-ДО Старооскольского завода с минералогическим составом:  $C_3 S = 60\%$ ,  $C_2 S = 15\%$ ,  $C_3 A = 8\%$ ,  $C_4 AF = 14\%$ . Плотность зерен цемента -  $3220 \text{ кг/м}^3$ , удельная поверхность -  $290 \text{ м}^2/\text{кг}$  и коэффициент нормальной густоты  $K_{нг} = 0,251$  и Волковский бездобавочный портландцемент ПЦ 500-ДО с минералогическим составом:  $C_3 S = 58\%$ ,  $C_2 S = 19\%$ ,  $C_3 A = 4,5\%$ ,  $C_4 AF = 15,8\%$  и  $K_{нг} = 0,24$ . В качестве тонкодисперсного наполнителя использовали промышленный отход - шлак БМЗ, размолотый до получения удельной поверхности  $250 \text{ м}^2/\text{кг}$ , что улучшило реологические характеристики бетонной смеси и облегчило процесс укладки и формирования изделий. В качестве крупного заполнителя применен гранитный щебень Микашевичского завода фракции 5-20 мм марки 1200. В качестве мелкого заполнителя - природный необогащенный песок Заславьского карьера с модулем крупности  $M_k = 2,47$  и песок карьера "Волма" с  $M_{кр} = 2,54$ . Плотность зерен и плотность песка в виброуплотненном состоянии составили соответственно  $2600$  и  $1850 \text{ кг/м}^3$  для Заславьского карьера и  $2650$  и  $1900 \text{ кг/м}^3$  - для карьера "Волма". Ускорение гидратации цемента достигалось при помощи полиэлектролита К-7 в количестве 8...12% от массы воды затворения.

Составы бетонной смеси с заданной подвижностью (ОК, см) приведены в табл. 1. Для улучшения удобоукладываемости бетонной смеси с низким водоцементным отношением применен суперпластификатор С-3, выпускаемый на Мозырском СЖБ № 12. Количество С-3 варьировалось от 0,85 до 1,2 % от массы цемента в расчете на сухое вещество.

Таблица

Составы бетонных смесей

Серия	Расход материалов на $1 \text{ м}^3$ , кг							В/Ц	ОК, см
	Ц	П	Щ	В	С-3	ПВК	Шлак		
ВБ-1	500	695	1000	152	6,6	18	55	0,30	10
ВБ-2	450	753	977	126	5,94	15	45	0,28	1

Образцы серий ВБ-1, ВБ-2 были испытаны на трехточечный изгиб с получением полностью равновесных диаграмм деформирования. Диаграммы представлены на рис. 1, расчетные прочностные, деформативные, силовые и энер

гетические характеристики бетона приведены в табл. 2. Для силовых и энергетических параметров трещиностойкости коэффициент вариации составляет 6...9 %, что свидетельствует о стабильности полученных показателей. Проведение равновесных механических испытаний образцов с искусственной трещиной в бетоне позволило добиться стабильного характера развития и продвижения магистральной трещины, вплоть до полного разрушения.

Анализ численных значений параметров проводили с учетом двух этапов (стадий) деформирования и разрушения бетона: 1 - докритическая стадия разрушения (до момента начала движения магистральной трещины) по параметрам  $W_m$ ,  $W_i$ ,  $G_e$ ,  $G_i$ ,  $J_i$ ,  $K_i$ ; 2 - закритическая стадия разрушения (с момента старта трещины и до полного разрушения образца) по параметрам  $W_L$ ,  $G_F$ .

Для высокопрочного бетона серий ВБ-1 и ВБ-2 характерно значительное повышение прочности на растяжение, которая составляет соответственно 2,88 и 3,02 Мпа. Прочность на растяжение по сравнению с образцами серий 1.1.0 и 5.2.0 выросла почти в 2,5 раза. Увеличение модуля упругости  $E_v$  даже по сравнению с модифицированным бетоном серии 5.2.0 составило 15 %.

Анализ первого этапа деформирования (восходящая ветвь ПРДД) свидетельствует о том, что энергозатраты на стадии микротрещинообразования и формирования концевой зоны магистральной трещины  $W_m$  не возросли. Это означает, что диссипативные процессы развития и слияния микротрещин до инициирования квазистатического разрушения в обычном и высокопрочном бетоне происходят без значительных различий. Энергозатраты на упругое деформирование в высокопрочном бетоне серий ВБ-1 и ВБ-2 составили соответственно  $W_e = 5,81 \times 10^{-2}$  и  $5,84 \times 10^{-2}$  Нхм и возросли по сравнению с бетоном серии 1.1.0 не менее, чем на 17 %. Таким образом, высокопрочный бетон обладает более высокими упругими свойствами.

Комплексная оценка трещинообразования (способности бетона сопротивляться образованию трещин - докритическая стадия деформирования) производилась по параметрам  $G_i$ ,  $J_i$ ,  $K_i$ . Удельные энергозатраты на иницирование квазистатического разрушения  $G_i$  составили 16,15 Н/м и возросли на 67 %. Квазистатический джей-интеграл  $J_i$  - величина, характеризующая работу пластической деформации и разрушения, а также поле напряжений и деформаций при упругопластическом деформировании вблизи вершины трещины - возрос в 2 раза. Квазистатический коэффициент интенсивности напряжений  $K_i$  высокопрочного бетона

Таблица 2

## Прочностные, деформативные, силовые и энергетические характеристики бетона

Серия образцов	Прочностные и деформативные характеристики				Силовые и энергетические параметры разрушения								K <sub>c</sub> , МН/м <sup>3/2</sup>	χ <sub>с</sub> , М
	R <sub>c</sub> , МПа	R <sub>b</sub> , МПа	R <sub>bt</sub> , МПа	E <sub>b</sub> , 10 <sup>-4</sup> МПа	W <sub>m</sub> , 10 <sup>-2</sup> , Н.м	W <sub>o</sub> , 10 <sup>-2</sup> , Н.м	W <sub>i</sub> , 10 <sup>-2</sup> , Н.м	W <sub>l</sub> , 10 <sup>-2</sup> , Н.м	G <sub>b</sub> , Н/м	G <sub>T</sub> , Н/м	J <sub>b</sub> , Н/м	K <sub>i</sub> , МН/ м <sup>3/2</sup>		
1.1.0	35,8	27,8	1,23	3,66	0,96	4,96	5,91	22,35	9,67	44,7	5,78	0,59	0,54	
5.2.0	52,4	44,7	1,26	3,642	5,14	6,20	11,34	32,40	17,72	60,3	12,0	0,80	0,59	
ВБ-1	67,5	39,5	2,88	3,94	3,84	5,81	9,65	50,14	16,15	93,24	11,29	0,80	0,62	0,444
ВБ-2	75,0	43,0	3,02	4,18	1,02	5,84	6,86	31,01	11,44	61,12	6,41	0,69	0,64	0,28

также выше аналогичного показателя обычного бетона (на 36%). Таким образом, для высокопрочного бетона характерно значительное увеличение (в 1,5...2 раза) способности сопротивляться образованию трещин.

Анализ сопротивляемости высокопрочного бетона развитию трещин (закритическая стадия деформирования - ниспадающая ветвь) выполнялся по параметрам  $W_1$ ,  $G_F$ . Энергозатраты на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины  $W_1$  высокопрочного бетона составили  $50,14 \times 10^{-2}$  Нхм и возросли в 2,2 раза. Удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение высокопрочного бетона  $G_F = 93,24$  Н/м, что выше аналогичного показателя обычного бетона (44,7 Н/м) в 2,1 раза. Таким образом установлено, сопротивляемость высокопрочного бетона развитию трещин (трещиностойкость) выше в 2 раза по сравнению с обычным бетоном. Следует только подчеркнуть, что это увеличение по сравнению с образцами серии 5.2.0 (бетон, модифицированный суперпластификатором С-3 с использованием его водо- редуцирующего действия) не столь значительно, а для серии ВБ-2 просто не существенно.

Хрупкость высокопрочного бетона оценивали по критерию хрупкости  $\chi$  Черепанова-Райса. Хрупкость образцов бетона серии ВБ-1 выше по сравнению с образцами серий 1.1.0 и 5.2.0 соответственно в 2,4 и 3,1 раза.

## **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ БЕТОНА**

С.Н. Леонович, Е.Н. Гузев

БГПА, НИИЖБ

Минск, Москва

В статье проанализированы результаты экспериментальных исследований параметров трещиностойкости бетона, где варьировались вид образцов, схема испытаний, размер агрегативного включения, его прочность и прочность сцепления с матрицей и т.д.

Ключевые слова. Трещиностойкость бетона, вязкость разрушения, силовые и энергетические параметры, коэффициенты интенсивности напряжений.

В экспериментальных исследованиях силовых и энергетических параметров бетона детально рассмотрены процесс трещиностойкости бетона, вязкости разрушения.

На начальной стадии деформирования упругие деформации бетона сопровождаются диссипативными процессами вследствие раскрытия и развития микро- и макротрещин. На стадии активного формирования концевой зоны магистральной трещины (МТ) происходит переориентация и слияние развивающихся и собственных структурных трещин, что и заканчивается полной локализацией деформаций и стартом МТ. Стадия инициирования разрушения носит квазихрупкий характер деформирования для всех (независимо от заполнителя) бетонов, так как энергозатраты на нелинейные процессы здесь сравнительно невелики.

На стадии разупрочнения активизируются псевдопластические локальные деформации в концевой зоне движущейся МТ, сопровождаемые диссипативными процессами потери энергии. Первоначально псевдопластическое деформирование определяется процессами ветвления (бифуркации), а также роста вторичных (не связанных с вершиной МТ) трещин. В последующем - значительное увеличение (особенно в наполненных агрегатированных макроструктурах бетона) степени псевдопластического деформирования уже, по-видимому, связано с некоторой подвижкой агрегатов структуры в интенсивно разупрочняемой цементной матрице, зацеплением фрактальных поверхностей (дилатансией).

Отмеченный механизм деформации бетона на ниспадающей ветви и разупрочнения подтверждается данными опытов на образцах из бетона большого количества составов с заполнителями различной формы, крупности и прочности. Так при снижении крупности (максимальной) зерна включений нелинейность ниспадающего участка диаграммы  $P-V$  значительно снижается. Экспериментальные данные демонстрируют значимость факторов: размера агрегативного включения, его прочности и прочности сцепления с матрицей на трещиностойкость и сопротивляемость бетона разрушению. Эта зависимость фиксируется на уровне инициирования разрушения параметрами  $K_i$  и  $G_i$  и на всем этапе разрушения по параметру  $G_F$  (табл.1,2). Существенное влияние на перечисленные факторы оказывает вид образцов и схема их испытаний. К анализу привлечены результаты испытаний, выполненные на образцах призмах (изгиб) и кубах (внецентренное сжатие), а так же на цилиндрах (раскол) и плитах (растяжение) (табл.3). Во всех опытах наблюдается четкая зависимость параметра  $K_{Ic}$  от размера (максимального) зерна заполнителя. В опытах на раскалывание цилиндров из гидротехнического бетона на гравии с крупностью зерен от 30 до 90 мм тенденция связи  $K_{Ic}$  с размером агрегативного включения сохраняется. При этом

Таблица 1

Вид композита	$R_b$ МПа	$R_{bt}$ МПа	$R_{btF}$ МПа	$E_b \cdot 10^4$ Мн/м <sup>2</sup>	$G_i$ Н/м	$G_F$ Н/м	$J$ Н/м	$K_i$ Мн/м <sup>3/2</sup>	$K_c$ Мн/м <sup>3/2</sup>
1. Серия "СШ" <sup>х)</sup>									
Цементный камень			1,31	0,7	5,41	17,64	3,65	0,2	0,16
2. Мелкозернистый бетон			2,11	1,219	9,11	39,39	6,24	0,33	0,27
3. Бетон со щебнем фракции 5-10 мм			4,74	2,055	21,77	142,4	13,3	0,67	0,57
4. Бетон со щебнем фракции 5-20 Серия "ЛЛ"			4,77	1,71	28,12	130,4	17,59	0,69	0,55
1. ПЦПР (ПЦ-40)									
2. ПЦ 1/1	17,2	0,83	1,44	2,67	5,24	17,5	2,63	0,38	0,34
3. ПЦ 1/3	18,3	0,857	1,47	2,75	8,79	31,4	5,06	0,49	0,43
4. ГЦПР	26,2	0,891	1,53	3,2	9,16	30,7	5,38	0,54	0,49
5. Г 1/1	21,1	1,07	1,84	2,93	7,09	20,8	4,59	0,46	0,41
6. Г 1/3	20,9	0,93	1,60	2,92	7,2	37,8	4,79	0,46	0,41
	15,9	0,8	1,38	2,57	4,6	26,7	2,43	0,32	0,84

<sup>х)</sup> В серии "СШ" данные приведены по результатам испытаний 8-15 образцов для каждого композита.

Таблица 2

Параметры трещин, прочностные, деформативные и силовые характеристики бетона

Вид композита	Номер состава	Компоненты кг/м <sup>3</sup> л/м <sup>3</sup>				В/Ц	Прочность МПа		Трещины а <sub>с</sub> × 10 <sup>3</sup> , м	Е дин. МПа	К <sub>ис</sub> МПа м <sup>1/2</sup>
		Цемент	Песок	Щебень	Вода		R <sub>пр</sub>	R <sub>б</sub>			
							8	9			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Цементный камень	1	1350	-	-	540	0,4	2,82	35,2	5,03	-	0,20
	2	1097	549	-	439		3,35	47,1	-	-	
Мелкозернистый бетон	3	900	900	-	360	0,4	3,72	48,8	11,56	25,1	0,4
	4	757	1135	-	264		3,04	43,9	21,91	29,01	0,45
	5	660	1321	-	264		2,52	38,9	36,28	28,0	0,48
	6	586	1465	-	234		2,30	34,1	38,28	27,6	0,45
	7	515	1540	-	206		2,14	33,4	40,37	-	0,43
	8	543	272	1313	217		1,72	39,9	51,4	33,9	0,39
Бетон	9	592	296	1196	237		1,62	35,7	52,16	31,2	0,37
	10	408	612	1195	163		2,48	37,0	49,18	36,7	0,55
	11	438	631	1092	175	0,4	2,74	34,7	52,87	35,7	0,63
	12	503	705	871	201		3,37	43,9	49,53	23,2	0,75
	13	390	975	871	156		3,1	34,5	50,99	32,5	0,7
	14	441	1100	645	176		2,23	33,0	50,27	30,7	0,5
Цементный камень	1	1116	-	-	614	0,55	2,26	23,5	6,34	-	0,18
	2	765	765	-	421		2,73	34,2	27,17	-	0,45
Мелкозернистый бетон	3	682	1023	-	375		2,18	33,1	38,91	20,2	0,43
	4	608	1217	-	335		2,19	30,0	38,55	22,1	0,43
	5	544	1361	-	299	0,55	2,0	29,1	44,54	24,7	0,42
	6	485	1454	-	266		1,92	29,7	39,17	26,1	0,38
	7	440	1539	-	242		1,73	26,04	43,5	22,7	0,39

Продолжение таблицы 2

Бетон	8	294	735	1195	162		2,39	30,7	54,9	31,4	0,56
	9	362	904	871	199		2,43	31,3	55,02	30,2	0,57
	10	312	1093	754	172	0,55	1,9	23,0	56,09	28,9	0,46
	11	275	962	978	171		2,09	26,1	59,54	32,5	0,51
Цемент. кам. Мелкозернистый бетон	1	950	-	-	665	0,7	1,3	16,2	17,1	-	0,17
	2	565	1130		395		1,55	23	28,14	19,5	0,26
	3	501	1253		351		1,4	21	45,92	20,9	0,3
	4	461	1382		322	0,7	1,35	20,5	43,02	22,7	0,28
Бетон	5	416	1457		291		1,28	20,0	44,5	23,0	0,27
	6	388	1551		271		0,97	18,0	45,1	20,7	0,26
	7	225	786	1195	157,5		1,7	25,9	58,17	-	0,41
	8	241	845	1092	169	0,7	1,95	26,9	60,59	-	0,48
	9	260	908	978	182		2,0	23,5	62,5	-	0,5
	10	226	1019	378	158		1,81	20,4	61,81	22,1	0,45
	11	241	1086	871	169		1,71	22,0	66,21	-	0,44
	12	258	1160	754	180		1,41	16,8	68,19	-	0,36

вероятно предположить, что существенное влияние на отмеченную зависимость оказывает количество цементного клея и заполнителя, а также состояние зон их контактов, прочность сцепления. Технологический фактор состава компонентов в смеси весьма существенно определяет процесс инициирования разрушения. Важными факторами являются для наполненного композита характеристики свойств цементирующего клея. В то время как для цементного камня значения  $K_{IC}$  не существенно зависят от В/Ц: 0,2 при В/Ц = 0,4; 0,18 при В/Ц = 0,55 и 0,17 при В/Ц = 0,7 (табл.2).

Рассматривая взаимозависимость между характеристикой трещиностойкости  $K_{IC}$  и прочностью бетона на растяжение при раскалывании ( $R_{pp}$ ) следует отметить, что композиты с более высоким сопротивлением растяжению имеют и более высокие значения  $K_{IC}$ . Однако четко прослеживается значимость фактора размера зерна в композите.

Анализ результатов неравновесных испытаний показывает, что в испытаниях образцов без надреза упругая энергия подается в образец в больших количествах (на поиск слабого звена). Это количество увеличивается в зависимости от размера образца, его конфигурации, схемы нагружения, но не от физических свойств бетона. Следовательно, при испытаниях образцов без инициатора трещины происходит завышение параметров деформирования и разрушения, искажение реальных свойств бетона. Так, значение  $G$  почти вдвое больше, а  $K_I$  до 30%.

При неравновесных испытаниях (табл.4,5) длина надреза заметно влияет на значение  $J_{IC}$ . С увеличением длины трещины от 15 до 35мм значение  $J_{IC}$  для мелкозернистого бетона уменьшилось вдвое. При равновесных испытаниях бетона фактор длины надреза оказывается инвариантным и  $J_{IC}$  сохраняет свое значение при увеличении длины надреза более чем в два раза.

Величина параметра  $K_{IC}$  для бетона связана с количеством цемента, воды, песка и щебня в его составе. Для трехкомпонентного композита - бетона при содержании песка и щебня  $\varphi_3 \geq 0,65$  и равных количествах песка  $\varphi_n = 0,35-0,4$  и щебня  $\varphi_{щ} = 0,35-0,4$  от общего объемного содержания заполнителей параметр  $K_{IC}$  имеет более высокие значения. Для двухкомпонентного композита - мелкозернистого бетона наибольшее значения  $K_{IC}$  получены для составов, в которых  $\varphi_n \approx 0,5$ .

Для трехкомпонентного композита - бетона значения  $K_{IC}$  имеют широкий диапазон от 0,37 до 0,75 при  $V/C = 0,4$ ; от 0,46 до 0,57 при  $V/C = 0,55$  и от 0,36 до 0,5 при  $V/C = 0,7$ . Столь широкий диапазон является следствием варьирования количеством цемента от 592 кг до 390 кг, песка от 272 до 1100 кг и щебня от 1313 до 645 кг/м<sup>3</sup>. При этом и прочностные свойства бетона имели диапазон соответственно в пределах трех классов В-40... В-30, В-30... В-20 и двух классов В-20... В-15.

Для двухкомпонентного композита мелкозернистого бетона  $K_{IC}$  имеет несколько меньшие значения и более узкий диапазон: 0,4-0,48 при  $V/C = 0,4$ ; 0,38-0,45 при  $V/C = 0,55$  и 0,2-0,3 при  $V/C = 0,77$ . При этом прочностные свойства бетона находились в тех же пределах классы В-40... В-30, В-30... В-20 и В-20... В-15.

В опытах впервые получено подтверждение того, что только при проведении полностью равновесных испытаний бетона по принятой в исследованиях методике трехточечного изгиба призм с разгрузкой возможно получать инвариантные и достоверные величины контурного интеграла  $J_{IC}$  и  $K_{IC}$  для бетона с учетом его упругопластического деформирования в вершине трещины.

При проведении неравновесных испытаний с ростом длины трещины в бетоне увеличиваются значения  $K_{IC}$ . Интенсивность роста  $K_{IC}$  замедляется с увеличением крупности заполнителя. Для разных схем испытания при одной и той же глубине трещины значения  $K_{IC}$  могут существенно различаться. Влияние крупности заполнителя проявляется и в том, что при глубине начального надреза меньше  $d_{max}$  чувствительность образца к надрезу понижается. Значения  $K_{IC}$  при устойчивом распространении трещины больше, чем при неустойчивом росте.

Таким образом, наиболее достоверные инвариантные экспериментальные значения параметров  $K_{IC}$ ,  $G_{IC}$ ,  $J_{IC}$  для бетона могут быть получены только по методике полностью равновесного деформирования. Эти параметры характеризуют затраты упругой энергии на разрушение и затраты энергии на упругопластическое деформирование. В опытах установлена устойчивая связь параметров  $K_{IC}$ ,  $G_{IC}$  и  $J_{IC}$  с прочностью бетона и размером зерна структуры. представляется обоснованным использовать разработанный метод для классификации бетона по более универсальным инвариантным параметрам энергии разрушения наряду с вариантным параметром прочности бетона.

Таблица 3

## Характеристики прочности и трещиностойкости конструкционных материалов

№ пп	Материал	Схема нагружения	$R_{ср}$ МПа	$\sigma_{в}(R_b)$ МПа	$G_{IC}$ Н/М	$K_{IC}$ МН/м <sup>3/2</sup>	$K_{IIC}$ МН/м <sup>3/2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Цементный камень	Растяжение при раскалывании Трехточечный изгиб равновесное испытание с надрезом.	2,82	35,5		0,17-0,2	-
			1,31		3,52	0,16	-
2.	Мелкозернистый бетон б=3мм В/Ц=0,4 В/Ц=0,55 В/Ц=0,70 Мелкозернистый бетон б=3 мм В/Ц=0,55 " - " " - " В/Ц=0,70	Растяжение при раскалывании  Трехточечный изгиб равновесное испытание с краев. надрезом	1,62-3,3	35,7-43,9	-	0,37-0,75	-
			1,87-2,73 0,97-1,55	26,0-34,5 18,0-23,0	- -	0,39-0,45 0,2-0,26	- -
			2,11	-	5,98	0,27	-
		Внеш. сжатие призмы	1,29	-		0,106 0,6	- -
3.	Песчаник мелкозернистый б=0,1мм с глинист. кварцевым цементом.	Внецентр. растяжение тоже компактного образца с трещиной	9,7	137,0		1,47 0,59-0,03 0,64-0,15	
4.	Песчаник сухой влажный					0,6	
						0,4	

Продолжение таблицы 3.

5.	Гранит	Трехточечный изгиб образца с краевой усталостн. тр-й Внецентрен. растяж.				1,17-0,17 1,01-1,07	
6.	Габбро	Трехточечный изгиб образца с краевой усталостн. тр-й. Внецентрен. растяж.				1,89-0,14 1,01-1,07	
7.	Керамика	Внецентрен. растяж.				4,33-0,06	
8.	Бетон б=5; 20 В/Ц=0,4 В/Ц=0,55 В/Ц=0,7 Бетон б=20мм В/Ц=0,5	Растяжение при раскалывании  Трехточечный равновесный изгиб	1,62-3,37  1,9-2,43 1,4-2,0  4,77	35,7-43,9  23,0-31,3 16,8-23,5		0,37-0,75  0,46-0,57 0,36-0,5  0,55	
9.	Бетон б=10 В/Ц=	Внецентр. сжатие призмы	3,12		17,73	0,22	
10.	Бетон б=10 В/Ц=0,5	Внецентр. сжатие кубы срез трехточечн. плиты	2,2	33,1-38,3		0,306-0,337	3,76-3,78
11.	Сталь 3 40х20хГ 2 φ 22 80С	Трехточечный изгиб	250 340 480 66,0	500 600 800 1060	40,2 10 <sup>3</sup>	22,0 93,0 30-45 39,7-40,6	- - - -

Продолжение таблицы 3.

12.	Железобетон Бетон б=10 мм Сталь 35 ГС $\mu = 0,9\%$ 1ф 8 $\mu = 1,8\%$ 2ф 8 $\mu = 2,8\%$ 2ф 10 Бетон б=10мм Фибра Ст. 3 1% 2% Бетон б=10мм Ар-ра 1ф 4 $\mu = 0,25\%$ 1ф 8 $\mu = 1,0\%$ 1ф 10 $\mu = 1,5\%$	Трехточечный изгиб, статическое нагружение		22-25			
					3060-3730	9,2	
					1707-3620	8,5	
					1770-2910	8,1	
		Плита с двумя надрезами срез трехточечный	2	22,67	35,2-37,1	0,38-0,59	3,3-5,55
		Плита с двумя надрезами, срез трехточечный	2,1-3,1		36,4-37,3	0,49-0,6	6,83
			2,22		38,3	0,506	3,26-3,55
				0,306	4,9-6,23		
				0,306	4,3-5,47		

Таблица 4

Результаты испытаний бетона по равновесной и неравновесной схемам.

Вид и размеры образцов	Длина инци. надреза мм	$R_{bf}$ МПа	$E_b \times 10^4$ МПа	J НМ	$K_I$ МН/м <sup>3/2</sup>	$K_{IC}$ МН/м <sup>3/2</sup>	Схема испытаний
Бетон состава 1:1,63:3,41 В/Ц=0,6 $R_c=38,2$ Мпа	15	5,66	3,81	21,37	0,63	0,9	Трехточечный изгиб с упру- гим кольцом -равновесные
Песок М-2,14 Щебень 5...10мм Размеры: 50x50x320мм $R_b=25,2$ Мпа	25	5,47	3,71	20,96	0,54	0,88	
Мелкозернистый бетон состав 1:3; В/Ц=0,85 $R_c=38,2$ Мпа	35	5,97	3,79	20,53	0,48	0,88	Трехточечный изгиб на прессе - не равновесные
Песок М=2,14 $R_b=17,7$ Мпа размеры 70x70x280мм	15	2,77		7,85	0,36		
	25	1,46		5,22	0,31		
	35	2,31		3,89	0,27		

Таблица 5

## Исследования инвариантности параметров разрушения бетона.

Размеры инициирующих надрезов	Параметры разрушения									Шифр вида испытаний	Вид испытаний
	$R_{ch}$ , МПа	$E_b \times 10^4$	$G_1$ , Н/м	$G_F$ , Н/м	$G_{сгр}$ , Н/м	$G_{св}$ , Н/м	$J_1$ , Н/м	$K_1$ , Н/м $_{3/2}$	$K_c$ , Н/м $_{3/2}$		
1. Без надреза	4,6	2,4	73,31	333,3	343,3	-	-	1,33	-	Не равновесн.	Без разгрузки
2. $a_0=35$ мм; $a_{ch}=5$ мм Ширина 1...1,2мм	6,28	2,58	40,58	133,3	147,1	-	-	1,02	-		
3. Без надреза	4,62	2,4	76,3	293,4	296,9	-	-	1,36	-	Равновесн	" - "
4. $a_0=35$ мм; $a_{ch}=5$ мм	6,37	2,36	35,1	138,1	144,8	29,25	21,67	0,91	0,83	" - "	" - "
5. " - " " - "	6,55	2,4	34,5	138,2	144,1	29,2	21,67	0,92	0,83	" - "	С разгруз.
6. $a_0=25$ мм; $a_{ch}=5$ мм	4,84	2,3	39,3	143,3	152,2	30,94	20,66	0,96	0,86	" - "	" - "
7. $a_0=45$ мм; $a_{ch}=5$ мм	7,51	2,4	36,7	129,7	138,5	28,24	22,58	0,95	0,83	" - "	" - "
8. $a_0=35$ мм; $a_{ch}=5$ мм	6,48	2,3	34,8	136,9	143,7	28,1	21,06	0,9	0,81	" - "	" - "

Испытания проведены на образцах призмах 100x100x400 мм по схеме трехточечного изгиба с разгрузкой на ниспадающей ветви диаграммы деформирования. Бетон со щебнем фракции 5...15 мм.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОПАЛУБОЧНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОНОЛИТНЫХ И СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ

Марковский М.Ф., Шпак С.В., Бурсов Н.Г.

БелНИИС

Капитонов С.В.

КТП «Минскпромстрой»

г. Минск, Беларусь

Зарубежный опыт монолитного строительства, в частности, опыт Германии, отчетливо показывает, что опалубочная техника и технология превратились в индустрию скоростного строительства различных объектов. Само производство опалубки и особенно ее дальнейшее конструктивное совершенствование идет различными путями в жесткой конкурентной борьбе между многими фирмами. Известно более 65 фирм, занимающихся разработкой, производством и обслуживанием опалубки. На последних международных строительных выставках в Берлине и Мюнхене в 1998 году выявились тенденции дальнейшего совершенствования опалубки и технологии ее применения.

Во-первых, на основе базовых опалубочных модулей (щит, панель, замок, опорно-регулирующие устройства, крепеж и т.п.) создается разветвленная сеть специализированных опалубок, таких как для перекрытия, круглых в плане сооружений, колонн, стен, с односторонними связями и т.п.).

Во-вторых, идет постоянное совершенствование замков в плане повышения их надежности и долговечности. Поиском конструктивно-технологических решений опалубочных элементов занимаются все ведущие фирмы, и это направление интенсивно развивается.

Третье направление составляет разработка путей повышения качества опалубки и, естественно, качества лицевых поверхностей бетонных конструкций. При этом самое пристальное внимание уделяется снижению трудоемкости опалубочных работ.

И, наконец, четвертое направление - совершенно новое - обнаруживается в последнее время и состоит в поиске альтернативного материала опалубки - финской фанеры.

БелНИИС активно занимается разработкой конкурентоспособной опалубочной техники для массового вида монолитных конструкций. Любая опалу-

бочная техника должна обладать необходимыми технологическими характеристиками. Качество и надежность опалубочной техники во многом определяется ее фактическими параметрами, такими как несущая способность и деформативность. Поэтому проводятся комплексные испытания натуральных образцов опалубки по специальной методике, которые подтверждают или опровергают работоспособность конструкции опалубки, ее отдельных узлов и крепежных элементов.

Целью настоящих исследований является:

- определение фактической несущей способности щитов опалубки МОДОСТР и МОДОСТР-КОМБИ;
- выявление фактической расчетной схемы работы опалубочных крепежных элементов;
- установление фактической деформативности опалубки;
- апробирование методики испытаний опалубочных элементов;
- исследование работоспособности комбинированного щита опалубки с финской фанерой;
- проверка прочности отдельных узлов и деталей опалубки;
- выявление ослабленных узлов и деталей опалубки и др.

Основные экспериментальные исследования выполнены отделом экспериментальных исследований строительных конструкций БелНИИС на опытной базе института. Кроме того, авторами опалубки проводится научное сопровождение опытного внедрения опалубки МОДОСТР и МОДОСТР-КОМБИ организацией СУ-21 КПП «Минскпромстрой» на строительстве жилого дома по ул. Варвашени в г. Минске. Для проведения испытаний изготовлены специальный нормоконструкция опалубки и крепежа, включающий стальные щиты опалубки МОДОСТР, отдельный каркас и щиты опалубки МОДОСТР-КОМБИ с палубой из финской фанеры толщиной 12мм, замки-зажимы и тяжи различной конструкции.

Методика испытаний опалубочных элементов заключалась в ступенчатом нагружении по схеме, наиболее близко отвечающей реальной работе конструкции с фиксацией деформаций и повреждений опалубки. Базовый щит размером 1,2 x 0,9 м испытан по схеме плиты, опирающейся по четырем углам: одна опора неподвижная шаровая, две – катковые и одна – подвижная шаровая. Распределенную нагрузку заменяли системой сосредоточенных сил и передавали на палубу щита в восьми точках через стальные балки, шарнирно опирающиеся друг на друга. Моделирование точности опирания щита вполне соответствует реальной передаче на-

зки от бетонной смеси на опалубку и далее на тяжи. Во время загрузки изменяли прогибы в середине пролета и поперечных ребер прогибомерами с ценой деления 0,01 мм, величину осадки опор — индикаторами с ценой деления 0,01 мм с. 1). Для отдельного испытания стальной палубы щита загрузку производили на участке 0,5 x 0,5 м, в центре которого находилась ячейка 0,3 x 0,3 м, ограниченная поперечными и продольными ребрами.

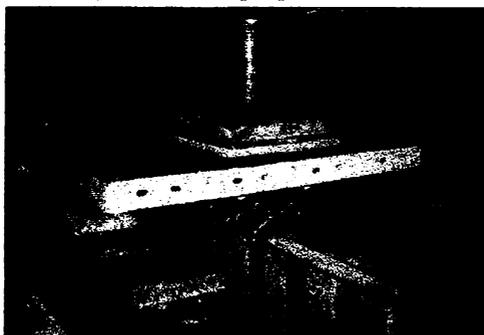


Рис. 1. Схема испытания щита опалубки МОДОСТР

Как известно, опалубка предназначена для бетонирования конструкций, к поверхности которых не предъявляются повышенные требования, в основном, скрытых поверхностей конструкций. Допускаемый прогиб для таких опалубок составляет 1/200 пролета. Конструкция щита опалубки выполнена в каркасном варианте с взаимнопересекающимися ребрами, т.е. представляет собой стину, подкрепленную ребрами различной жесткости. Максимальный прогиб в щите опалубки МОДОСТР размером 900x1200 мм при равномерно-предельной нагрузке  $q = 50$  кПа достигнут в продольном ребре  $f_1 = 6$  мм (00 L), в то время как прогиб в поперечных ребрах составляет  $f = 1,55$  мм (80 B) (рис.2). Прогиб стальной палубы, опертой по контуру на четыре ребра, в этой нагрузке составил  $f = 1,2$  мм (1/250  $l_1$ ). Несущая способность опалубки сделана из условия прогиба 1/200 пролета по диагонали щита с учетом прогиба ребер и палубы и составляет 45 кПа.

Вместе с тем, вызывает научный интерес сопоставление расчетных и фактических значений прогибов в соответствии со схемой загрузки в эксперименте. Рассматривались три варианта расчетного приведенного сечения щита: в работе участвуют только два продольных несущих ребра; в работе участвует полное сечение щита, включающего ребра и палубу;

3. в работе участвуют продольные ребра и часть примыкающей к ребрам палубы на величину  $b$  с каждой стороны ребра / 1 /:

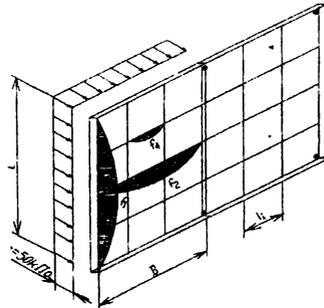


Рис.2.Схема деформации каркасного щита опалубки МОДОСТР

$$b = \sqrt{\frac{E}{R_m}}, \quad (1)$$

где  $E$  - модуль упругости стали;

$R_t$  - предел текучести стали.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по прогибам показывает, что модель 3) наиболее адекватно описывает работу щита под равномерно распределенной нагрузкой.

Замки-зажимы отдельно испытывали на действие растягивающих усилий. При этом варьировали плечо приложения. Исчерпание несущей способности фиксировали по появлению необратимых пластических деформаций в губках замка. Расчетное растягивающее усилие ( $P$ ) в замках-зажимах следует определять по следующей эмпирической формуле:

$$P = 0,076hR \frac{\delta_z}{\delta_p}, \quad (2)$$

где  $h$  - высота рабочего сечения замка;

$\delta_z$  - толщина замка;

$\delta_p$  - толщина ребра опалубки;

$R$  - расчетное сопротивление стали замка.

Принятая конструкция замка-зажима выдерживает растягивающее усилие 5 кН (500 кгс).

Опалубка МОДОСТР-КОМБИ также выполнена в каркасном варианте, но с лубой из водостойкой фанеры. Деформативность опалубочного щита при рас-тной нагрузке составляет:

- для продольных ребер –  $f_1 = l_1/400$  при  $q = 67$  кПа;
- для поперечных ребер -  $f_2 = B/400$  при  $q = 65$  кПа.

Несущая способность щита при гарантированной суммарной деформатив-ности, не превышающей 1/400 пролета, составляет 50 кПа.

В результате испытаний комбинированной опалубки установлено, что па-уба из финской фанеры частично включается в совместную работу с каркасом, м самым обеспечивая повышение несущей способности щита на 20 %. Час-точное включение палубы объясняется тем, что при больших нагрузках проис-ддит сминание фанеры под крепежными шурупами.

Одна из ключевых позиций в любой опалубочной системе принадлежит жам, от надежности которых зависим работоспособность самой опалубки. ами отработывалось несколько вариантов конструкции тяжа, в которых варьи-вались диаметр, марка стали, диаметр резьбы хомута и резьба гайки. В ходе ытных проработок за основу принят тяж из арматурной стали А-III с расчет-ым сопротивлением на растяжение 390 мПа, что в 1,85 раза прочнее стали ст.3. рматурная сталь поддается токарной обработке, сваривается и по стоимост и приближается к обычной стали ст.3. Испытания проводили на гидравлической зрывной машине, фиксируя наконечник и гайку тяжа, что соответствует его йствительной работе в опалубке.

Экспериментально определены следующие параметры тяжа:

- диаметр тяжа  $\varnothing 18$  мм;
- внутренний диаметр резьбы рабочей гайки и тяжа  $\varnothing 14,4$  мм;
- наружный диаметр резьбы  $\varnothing 17,1$  мм;
- шаг рабочей резьбы 10 мм;
- длина рабочей гайки 40 мм;
- диаметр опорной шайбы  $\varnothing 80$  мм;
- толщина опорной шайбы 6 мм.

При таких параметрах разрыв тяжа происходит по наиболее слабому се-ению – по рабочей резьбе. Экспериментально установлено, что разрывное уси-е составляет 12,2 тн. Расчетное усилие на тяже определяется по формуле

$$N_T = R \left( \frac{\pi d_b^2}{4} + F_P \right), \quad (3)$$

где  $d_b$  - внутренний диаметр рабочей резьбы тяжа;

$F_P$  - площадь витка резьбы тяжа.

Для диаметра тяжа  $\varnothing 18$  расчетное усилие тяжа составляет

$$N_T = 4000 \cdot 1,688 = 6700 \text{ кг или } 67 \text{ кПа.}$$

Авторами разработана также принципиально новая конструкция крупнощитовой опалубки с палубой из водостойкой фанеры. В качестве несущих ребер впервые применены решетчатые балки с податливыми связями, что позволяет обеспечить универсальность крепежа, возможность навески дополнительных элементов и высокую технологичность и точность изготовления.

Базовые щиты размером 2,7 x 1,2 и 2,7 x 2,4 м испытаны по схеме плиты, опирающейся на шесть точек (в местах крепления тяжей) на шаровые опоры (рис. 3) Распределенную нагрузку заменяли системой сосредоточенных сил и передавали на каркас и палубу щита через стальные балки, шарнирно опирающиеся друг на друга. Моделирование точности опирания щита вполне соответствует реальной передаче нагрузки от бетонной смеси на опалубку и далее на тяжи.

Общая схема деформирования элементов щита, приведенная на рис. 4, позволила установить несущую способность крупнощитовой опалубки, равную 5 кПа при деформативности 1/400 пролета. Также установлено, что палуба из финской фанеры обеспечивает увеличение несущей способности стального каркаса на 15 %.

Одной из базовых опалубок разрабатываемой в институте системы МОДОСТР является специализированная опалубка-стол для бетонирования монолитных перекрытий. Поэтому, с целью определения ее несущей способности и деформативности, был изготовлен натурный образец опалубки-стол и проведены его комплексные испытания (рис. 5), которые должны были подтвердить или опровергнуть работоспособность конструкции опалубки, отдельных узлов крепежных элементов, а также выявить их слабые места, если таковые имеются.

Кроме того, отдельно был испытан домкратный узел опорной системы опалубки-стол на действие вертикальной нагрузки. Домкратный узел испытывали при максимальной величине хода домкрата на прессе П-125 и контролировали изгиб стержня домкрата в двух уровнях индикаторами ИЧ-10.

Методика испытаний заключалась в ступенчатом нагружении по схеме, наиболее близко отвечающей реальной работе конструкции с фиксацией деформации

и поврежденных элементов опалубки. В процессе нагружения опалубки-стол нагрузка от домкрата передавалась на четыре стойки, причем максимальное ее значение для одной стойки составило 5000 кг, что превышает нагрузку, которой подвергается стойка в реальных условиях стройки (исходя из максимальных значений площадки формообразующего стола, равной  $4,3 \times 3 \text{ м} = 12,9 \text{ м}^2$ ).

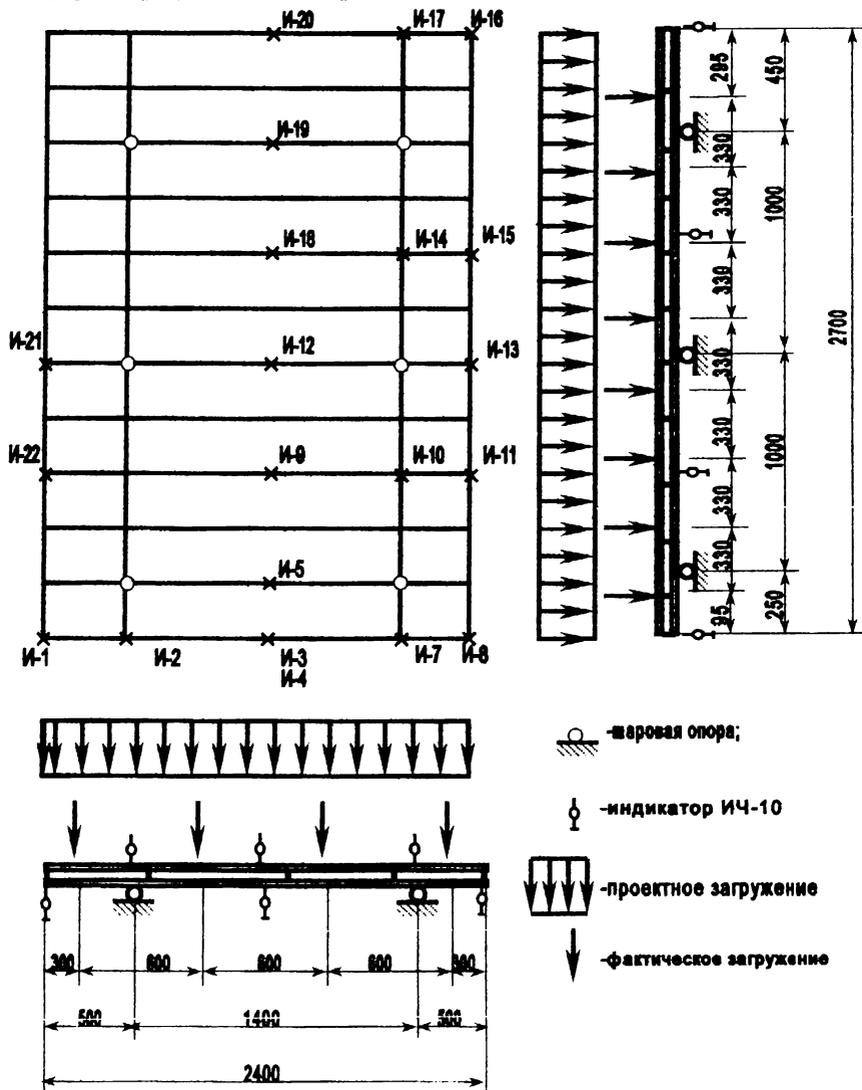


Рис.3. Схема испытания стального каркаса 2.7x2.4 м на изгиб

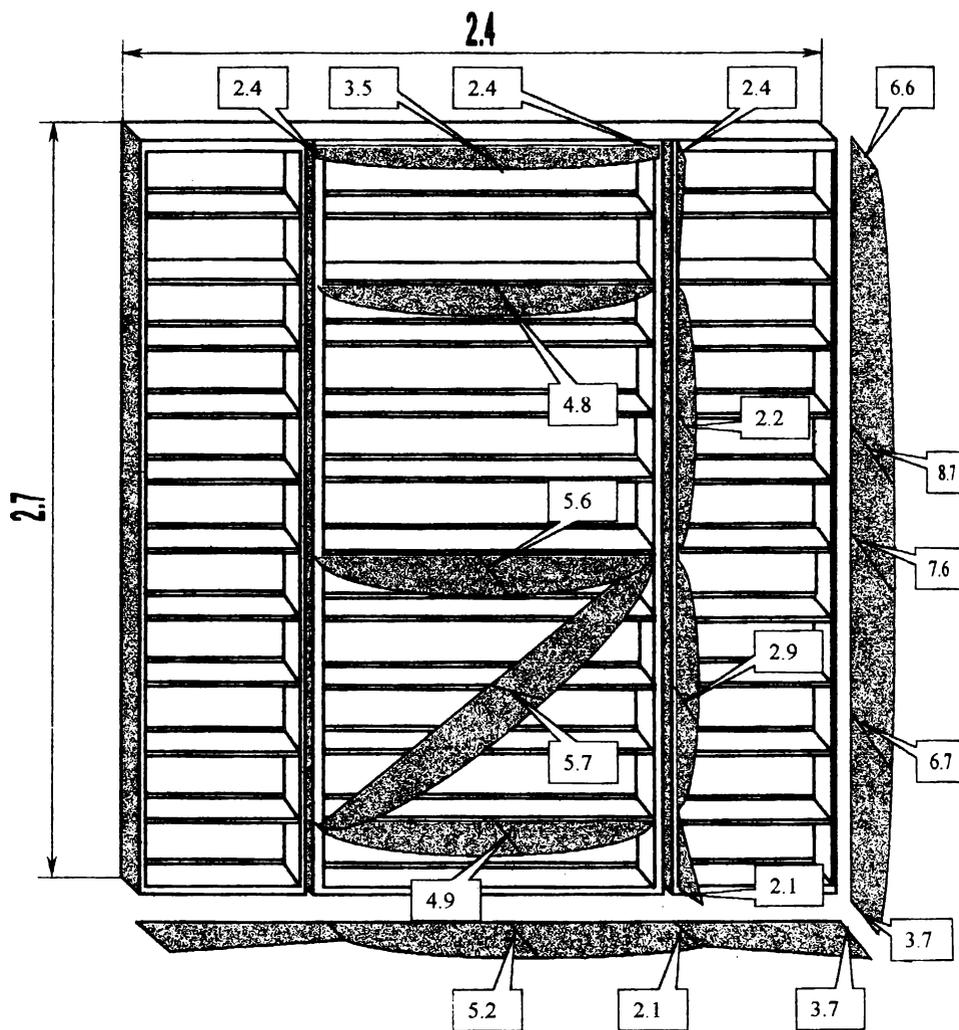


Рис.4.Общая картина деформации элементов комбинированного щита 2.7x2.4 м



Рис.5.Силовые испытания опалубки.

Жесткость всей пространственной системы опалубки-стол зависит от жесткости и устойчивости горизонтальных и наклонных связей (рис. 6). Устойчивость этой пространственной системы контролировалась приборами, установленными по верху опорных стоек, показания которых свидетельствуют о весьма незначительном (0,37 мм) смещении верха стойки от первоначального положения, вызванном наличием люфта в болтовых соединениях связей.

По результатам испытаний установлено следующее.

Конструкция опорной системы опалубки обеспечивает высокую прочность, жесткость и устойчивость при нагрузках до  $1500 \text{ кг/м}^2$ .

Гарантированная несущая способность винтового домкрата составляет 5 тс при коэффициенте перегрузки 1,5).

Болтовые соединения подкосов опорной системы имеют повышенный люфт, который необходимо устранить.

Опалубочная система успешно внедряется на многих стройках Москвы и области при строительстве монолитных зданий и отдельных монолитных конструкций [2,3,4]. Авторами также разработана гибкая опорная система башенного типа для возведения сборно-монолитного каркаса и монолитных ригелей (рис. 7). Система успешно внедрена при строительстве сборно-монолитного каркаса в Москве и жилых зданий в Гомеле и Новгороде.

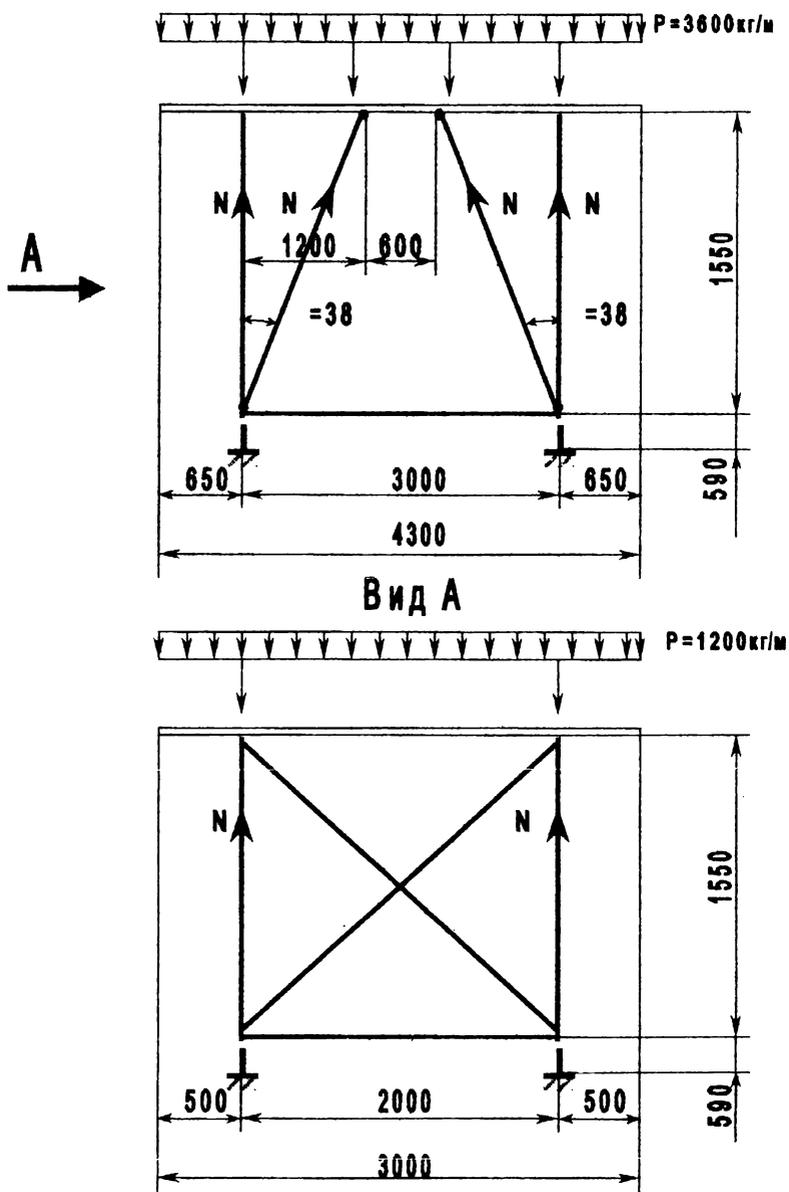


Рис.6.Расчетная схема опорной системы опалубки-стол.



Рис.7. Опорная система бапенного типа.

Одна из последних новинок опалубочной системы МОДОСТР – опалубка и опорная система для возведения монолитных участков сборного перекрытия, которая осваивается впервые в СУ-21 КПП «Минскпромстрой». Эта опалубка включает телескопические стойки, треноги, решетчатые балки новой конструкции, комбинированные облегченные щиты с деформируемым верхним слоем палубы, не имеющие аналогов.

Авторский коллектив работает также над созданием совершенно новой водостойкой пластиковой палубы с низкими антиадгезионными свойствами.

#### Литература

1. Стальные конструкции производственных зданий. Справочник / А.А.Пилов и др. – К.:Будивельник, 1986.-с.133-140.
2. Марковский М7Ф7 Новая опалубочная система: реальность и перспектива. //Современные конструктивно-технологические системы зданий и строительные материалы. -Минск.;БелНИИС,1997.-с.32-35.
3. Марковский М.Ф. и др. Технологические возможности системной опалубки для монолитного каркаса. – Там же, с. 36-40.
4. Марковский М.Ф. и др. Технологические аспекты создания и применения новой опалубочной системы // Инженерные проблемы современного бетона и железобетона /Технология сборного и монолитного бетона и железобетона.- Минск, 1997.- с. 154-164.

## УСИЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТОВ КОСТЕЛА СВ. ПЕТРА И ПАВЛА В ШКЛОВЕ

М.И. Никитенко, К.Э. Повколас, О.В. Попов, Г.Н. Протасов  
Строительный факультет, БГПА  
Минск, Республика Беларусь

В статье описывается пример использования инъекционной технологии для усиления и консервации фундаментов памятника архитектуры XVIII века — костела св. Петра и Павла в г. Шклове Могилевской области. Для проведения работ было применено специальное малогабаритное оборудование, позволявшее производить работы в стесненных условиях. Инъекция цементного раствора под подошву позволила укрепить выветренную кладку ленточного фундамента, стабилизировать осадки, а также предохранить стены от попадания грунтовой влаги. Некоторые технологические приемы были использованы впервые.

Ключевые слова: памятник архитектуры, реставрация, фундаменты, усиление основания, консервация, защита от влаги, выравнивание осадок, инъекционная технология.

Костел св. Петра и Павла в г. Шклове является памятником архитектуры XVIII в. В 1996 г. было решено начать его реставрацию. Среди работ по реконструкции здания особое место занимали усиление фундаментов и гидроизоляционные мероприятия. Неправильная вертикальная планировка местности привела к тому, что основание костела постоянно подтапливалось потоками поверхностных вод. Это вызвало неравномерную осадку здания, в результате чего в стенах образовались трещины значительной ширины. В дополнение к этому, вода способствовала разрушению материала ленточных фундаментов стен. Обследование производилось методом шурфования. Было выявлено, что в основании лежат супеси, а также пески средней крупности с примесью строительного мусора. Кладка фундаментов была выполнена внизу — из бутового камня, а сверху — из красного обожженного кирпича. Кирпич был сильно выветрен. Отсутствие горизонтальной гидроизоляции способствовало поднятию влаги по стенам на высоту до 3 м, в результате чего кладка стен была местами сильно выморожена. Специалистами кафедры “Геотехника и экология в строительстве” БГПА был предложен проект усиления и консервации фундаментов с приме-

нием инъекционной цементации. Применение инъекции было вызвано следующими факторами:

1. требованием минимальной интервенции в строительные конструкции костела;
2. необходимостью одновременно усиливать основание и кладку фундамента;
3. необходимостью производить работы в стесненных построечных условиях;
4. требованием минимального нарушения естественных грунтовых условий.

Проектом предусматривалось два варианта технологии инъекционной цементации. Согласно первому варианту инвентарный трубчатый инъектор, снабженный наконечником-монитором, должен был погружаться за счет подающейся под напором водяной струи. Сначала к инъектору должен был подключаться шланг насоса и нагнетаться вода под давлением около 1,0 МПа. Под действием водяной струи происходит размыв грунта и инъектор погружается до тех пор, пока монитор не попадет под центр подошвы фундамента. После погружения инъектора на проектную глубину подача воды прекращается, к инъектору подключается шланг растворонасоса и под минимально возможным давлением (не выше 1,0 МПа) закачивается цементный раствор. При этом инъектор должен был подниматься вверх до завершения закачки проектного объема цементного раствора. Давление инъекции, объем раствора и водоцементное отношение можно варьировать в зависимости от конкретных условий производства работ. При возникновении выброса раствора к устью скважины или вдоль боковой поверхности фундамента после закачки в объеме менее проектного водоцементное отношение раствора следует уменьшать, в случае же наступления отказа при неполном объеме закачки — напротив — увеличивать. Однако, вследствие затруднений, возникших в связи с невозможностью подачи больших объемов воды, а также в связи с наличием обломочных включений в толще насыпного грунта, что делало неприменимой струйную проходку, была применена технология производства работ по второму варианту. Она предусматривала предварительное вращательное бурение скважины диаметром 88 мм. В этом случае инъектор, установленный в скважину, засыпался послойно сухим песком с постоянным уплотнением за счет заливки воды.

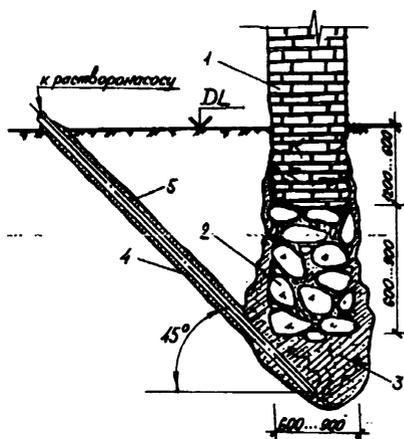


Рис. 1. Технологическая схема инъекционного усиления фундаментов костела св. Петра и Павла: 1 — кирпичная кладка стены; 2 — бутовая кладка нижней части фундамента; 3 — защитный чехол из цементного раствора; 4 — инъектор; 5 — тампонажный слой песка.

В процессе инъекции песок создавал тампонажную обойму, которая удерживалась относительно стенок скважины распорными напряжениями, возникшими за счет бокового давления в песке (рис. 1). Такой тампонаж при длине скважины 3 м был способен выдерживать давление раствора до 20 Атм. Последующие операции выполнялись аналогично технологии по первому варианту. Средний объем закачки составил около 250 литров на скважину при водоцементном отношении, равном 0,6 (оптимальное В/Ц для данных грунтовых условий). Всего было устроено 43 скважины по периметру здания. Из них 14 выполнялось изнутри помещения. Общий расход цемента составил около 25 тонн. Все работы проводились под непосредственным наблюдением и при участии сотрудников кафедры. Для создания надежной гидроизоляции и инъекционного упрочнения основания требовалось закачать достаточный объем раствора. Это условие выполняется при непрерывном режиме закачке. Раствор поступал в скважину под давлением 3...4 Атм. Даже после небольших технологических перерывов (порядка 15 мин.) наблюдался резкий рост давления инъекции, что в ряде случаев приводило к выбросам раствора в соседние скважины, по боковой поверхности фундамента или прорыву тампонажного слоя. Причина этого явления заключается в консолидации цементного раствора, время которой составляет по нашим данным 5...10 мин. Таким образом, при необходимости инъекции больших объемов раствора (укрепительная и гидроизоляционная инъекция) следует применять режим непрерывной закачки. И наоборот, если необходимо

большое остаточное давление (буроинъекционные сваи, анкеры и т.п.), становится эффективным режим ступенчатой инъекции.

Визуальные наблюдения за зданием в течение всего периода производства работ и впоследствии не обнаружили образования новых и раскрытия старых трещин.

## **ОЦЕНКА УСАДОЧНЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЕНОПЛАСТЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ**

В.И.Никитин

Строительный факультет БПИ

Брест, Беларусь

С помощью вычислительного эксперимента выполнен анализ напряжений, возникающих в пенопласте слоистых панелей при их изготовлении и эксплуатации от усадочных и температурных воздействий. Приведены инженерные формулы для оценки максимальных (минимальных) нормальных и касательных напряжений.

Для слоистых панелей, особенно с гофрированными обшивками, поперечные усадочные и температурные напряжения, формирующиеся в пенопласте на технологической стадии, и теоретически, и экспериментально изучены еще недостаточно. Отсутствие необходимой информации ограничивает возможности выработки обоснованных технологических решений, направленных на улучшение качества изготавливаемых изделий.

Необходимая информация собиралась путем вычислительного эксперимента на ЭВМ по программе, реализующей метод конечных элементов и позволяющей решать широкий круг задач. В вычислительном эксперименте принято, что в плоскости поперечного сечения панели напряжения отсутствуют (плоская задача), материалы панели линейно упруги, между обшивками и пенопластом обеспечиваются надежные адгезионные связи. Как свидетельствуют результаты испытаний образцов, адгезионная прочность соединений может превышать прочность пенопластов /1/ и принятое допущение вполне приемлемо. При изучении влияния технологической усадки пенопласта ее монотонное нарастание во времени, сопровождающееся механической релаксацией, не учитывалось и в расчеты закладывалась максимальная величина, достигаемая после завершения процесса отверждения материала. Это, ес-

тественно, приводило к получению верхних оценок напряжений в пенопласте.

Вначале выбиралась минимальная ширина панели, необходимая и достаточная для получения представления о напряженном состоянии пенопласта, возникающем в поперечном направлении от технологической усадки. Для этого в вычислительном эксперименте были сопоставлены двухслойные панели шириной равной длине одной и трех волн гофров.

Профилированная обшивка толщиной 1 мм имела прямоугольные гофры высотой 50 и шириной 125 мм, выполненные без сопряжения прямолинейных участков. Материал обшивок (сталь) наделялся следующими физико-механическими свойствами: модуль упругости  $E_{ст} = 2,1 \cdot 10^5$  МПа, модуль сдвига  $G_{ст} = 8,1 \cdot 10^4$  МПа и коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ . Высота слоя пенопласта в тонкой части панели составляла 100 мм. Следует отметить, что рассматриваемый профиль обшивки дает завышенные оценки напряжений в пенопласте у источников их концентрации по сравнению с обычно используемыми трапециевидными гофрами, у которых прямолинейные участки сопрягаются по плавным кривым. С точки зрения решаемой задачи главные напряжения  $\sigma_1$  можно учитывать в качестве основных, так как даже при испытаниях на сдвиг в подавляющем большинстве случаев они являются причиной разрушения образцов пенопластов /2/.

Установлено, что повторяющиеся участки профиля панелей имеют одинаковое напряженное состояние. Аналогичные выводы получены при изучении температурных напряжений в слоистых панелях поляризационно-оптическим методом /3/. Поэтому при последующем численном экспериментировании, в основном, рассматривались симметричные расчетные схемы панелей, имеющие ширину равную длине одной волны гофров. Отношение длин толстой и тонкой частей панели принималось постоянным и равным единице, так как его уменьшение или увеличение в реальном диапазоне практически не отражалось на величине напряжений у источников их концентрации /3/.

При изучении усадочных напряжений с помощью вычислительного эксперимента варьировали не только величину технологической усадки пенопласта  $\epsilon$ , но и значения его упругих характеристик ( $E$ ,  $G$ ,  $\mu$ ), толщину обшивок  $\delta$  и их число (одна или две), относительную высоту гофров и положение оси симметрии панели. Выяснилось, что варьирование коэффициента Пуассона  $\mu$  для пенопласта в реальном диапазоне изменения оказывает пренебрежимо малое

влияние на напряженно-деформированное состояние панелей. Это позволило в дальнейших расчетах зафиксировать его значение на уровне  $\mu=0,4$ .

Изменение внутренних напряжений в любой точке пенопласта прямо пропорционально изменению его технологической усадки. Следовательно, характер картины изолиний напряжений не зависит от варьирования величины  $\epsilon$ . Характер картины поля напряжений практически не меняется и при варьировании значениями модулей  $E$  и  $G$ . Увеличение или уменьшение величины  $E$  и  $G$  вызывает отклонения значений напряжений того же направления. Однако  $E$  влияет сильнее  $G$ .

Варьирование толщины металлических (сталь, алюминий) обшивок  $\delta$  в реальном диапазоне не вносит заметного изменения в напряженно-деформированное состояние пенопласта, так как его погонная жесткость при растяжении (сжатии) более чем в сто раз меньше таковой для обшивок. На этом основании в последующем вычислительном эксперименте рассматривались только стальные обшивки толщиной 1 мм.

Введение верхней плоской обшивки при достаточном слое пенопласта (в реальных изделиях вполне достаточно) практически не приводит к росту напряжений у источников их концентрации (углы обшивок), так как по мере удаления от этих источников напряжения быстро затухают. Для рассмотренных панелей уменьшение высоты гофров в два раза не дает существенного снижения значений напряжений в слоях пенопласта, примыкающих к нижней гофрированной обшивке. Только замена гофрированных обшивок на плоские устраняет опасные источники концентрации напряжений и ведет к заметному уменьшению их значений (величина максимальных нормальных напряжений  $\sigma_1$  снижается на четверть и более, а максимальных касательных напряжений  $\tau_m$  почти в двое). Это свидетельствует о том, что картина напряженного состояния пенопласта при наличии гофрированных обшивок в продольном направлении более благоприятна, чем в поперечном. Если ось симметрии площади поперечного сечения оказывается в тонкой части панели, то в наших примерах ее боковые части оканчиваются уширением. В этом случае напряжения  $\sigma_1$  у источника концентрации в боковой части панели заметно уменьшаются. На основе опытных данных авторы работы [3] пришли к такому же выводу, предлагая для смягчения краевой концентрации напряжений изготавливать панели так, чтобы их боковые свободные части кончались уширением.

На основании анализа данных, полученных с помощью вычислительного эксперимента, для определения значений усадочных напряжений по главным

площадкам в слоях пенопласта, примыкающих к углам обшивок, можно предложить аппроксимирующую формулу вида мультипликативной группы

$$\sigma_i = \sigma_i^0 k_\varepsilon k_E k_G, \quad (1)$$

где  $\sigma_i^0$  – значение базового напряжения в опасной точке, установленное по изолиниям соответствующих напряжений;  $k_\varepsilon$ ,  $k_E$ ,  $k_G$  – коэффициенты, учитывающие отклонения заданных значений усадки  $\varepsilon$ , модуля упругости  $E$  и модуля сдвига  $G$  рассматриваемого пенопласта от соответствующих значений для базового случая ( $\varepsilon^0$ ,  $E^0$ ,  $G^0$ ).

В качестве базового случая приняты изолинии усадочных напряжений возникающих в пенопласте трехслойной панели с верхней плоской обшивкой. Наличие такого случая позволяет находить оценки опасных напряжений в пенопласте слоистых панелей не только с гофрированными, но и с плоскими обшивками. На рис. 1 приведены изолинии главных напряжений  $\sigma_1^0$  для пенопласта, имеющего  $E^0 = 10$  МПа,  $G^0 = 4,8$  МПа,  $\mu = 0,4$  и  $\varepsilon^0 = 1,5\%$ . Размеры профилированной обшивки совпадают с теми, которые указаны выше.

В соответствии с формулой (1) и данными вычислительного эксперимента в реальной области факторного пространства у источников концентрации значения максимальных нормальных напряжений в пенопласте могут быть найдены из выражения

$$\sigma_1 = \sigma_1^0 (\varepsilon/\varepsilon^0) (E/E^0) [1 - 0,1(E/E^0)] [0,9 + 0,1(G/G^0)] \quad (2)$$

где  $\sigma_1^0$  – значение базового напряжения для опасной точки, выбираемое по изолиниям (рис. 1).

Аналогичное выражение предлагается и для определения значений минимальных нормальных напряжений в пенопласте около углов гофрированной обшивки

$$\sigma_2 = \sigma_2^0 (\varepsilon/\varepsilon^0) (E/E^0) [1,1 - 0,1(E/E^0)] [0,9 + 0,1(G/G^0)] \quad (3)$$

где  $\sigma_2^0$  – значение базового напряжения, принимаемое по изолиниям.

Для разномодульного пенопласта в формулу (2) и (3) значение модуля упругости  $E$  подставляются с учетом знака напряжения  $\sigma_i^0$  ( $i = 1, 2$ ). При положительном знаке  $\sigma_i^0$  используется значение модуля упругости  $E$  при растяжении, при отрицательном знаке  $\sigma_i^0$  берется величина  $E$  при сжатии. Поиск верхних

енки значений максимальных касательных напряжений  $\tau_m$  в опасной точке может быть выполнен двумя путями. Если имеются базовые изолинии для  $\tau_m^0$ ,

$$\tau_m = \tau_m^0 \left( \varepsilon / \varepsilon^0 \right) \left( E / E^0 \right) \left[ 1,2 - 0,2 \left( E / E^0 \right) \right] \left[ 0,8 + 0,2 \left( G / G^0 \right) \right], \quad (4)$$

где  $\tau_m^0$  – значение базового напряжения в опасной точке, устанавливаемое по изолиниям; значение  $E$  для разномодульного пенопласта находится как сумма модулей упругости при сжатии  $E_{сж}$  и растяжении  $E_p$ .

Можно обойтись и без изолиний для  $\tau_m^0$ , так как при плоском напряженном состоянии для любой точки

$$\tau_m = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2. \quad (5)$$

Исходя из (5), с помощью изолиний для  $\sigma_1^0$  и  $\sigma_2^0$  устанавливается положение опасной точки и для нее по (2) и (3) определяют  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , которые затем подставляются в (5).

Приведенные результаты вычислительного эксперимента пригодны и для оценки температурных напряжений, возникающих в пенопласте из-за различия коэффициентов линейного расширения материалов панели при ее охлаждении или нагревании. При охлаждении панели формулами (2), (3) и (4) следует пользоваться тогда, когда температурный коэффициент линейного расширения пенопласта превышает таковой материала обшивки. Если соотношение между этими коэффициентами противоположное, то формулы позволяют оценить последствия нагревания.

### Литература

- Чистяков А.М. Легкие многослойные ограждающие конструкции. – М.: Стройиздат, 1987. – 240 с.
- Козлов К.В. Оценка прочности пенопласта при сдвиге. Расчет конструкций с применением пластмасс. // Тр. ин-та / ЦНИИСК им. Кучеренко. – 1974. – С.36–39.
- Чаплинский И.А., Албаут Г.Н., Кон Ен Хва. Температурные напряжения в слоистых панелях с гофрированными обшивками трапециевидного профиля // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1979. – №6. – С.39–45.

## УТЕПЛЕНИЕ СТЕНОВЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОНОЛИТНОГО ПЕНОПОЛИУРЕТАНА

Т.Г. Оленина, А.И. Тамкович  
Строительный факультет, БГПА  
Минск, Республика Беларусь

В статье приведены основные положения технологии утепления стеновых ограждений жилых и общественных зданий с применением монолитного пенополиуретана, наносимого напылением а также заливкой в переставную или несъемную опалубку. Представлены также удельные показатели стоимости и трудоемкости различных вариантов утепления ограждающих конструкций зданий

Ключевые слова: тепловая защита, пенополиуретан, напыление, опалубка защитно-отделочный слой, штукатурные составы, мелкоштучные материалы

Одной из главных проблем выхода Республики Беларусь из кризиса на пути перехода к рынку является повышение энергоэффективности экономики и всех отраслях народного хозяйства. Крупнейшим потребителем топливно-энергетических ресурсов в Республике Беларусь является жилищно-коммунальный сектор, который потребляет более трети всей производимой республике тепловой энергии. Потенциал энергосбережения этого сектора по оценкам большинства как отечественных, так и зарубежных экспертов составляет 40-50% существующего уровня потребления.

Основной путь снижения энергозатрат - это повышение уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий и в первую очередь наружных стен с учетом применения эффективных теплоизоляционных материалов. Одним из перспективных для теплоизоляции материалов является пенополиуретан.

В качестве компонента теплоизоляционной системы он выбран в силу высокой теплоизолирующей и звукопоглощающей способности, высокой адгезии практически ко всем видам строительных материалов, низкому водопоглощению, низкой чувствительности к ультрафиолетовому излучению. Высокий процент механизации работ при устройстве утепления делает этот материал эффективным и выгодным по сравнению с другими утеплителями. Кроме того экономическая эффективность пенополиуретана определяется низкими транспортными и складскими расходами, так как его компоненты хранятся и поставляются не вспененными, а в жидком виде в герметичной таре.

Однако анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что многие аспекты использования пенополиуретана в строительстве требуют дальнейших исследований и детальной проработки. Потому БГПА совместно с ГП НИПТИС и ГП НИИСМ была проведена работа по исследованию применения пенополиуретана в качестве утеплителя для стеновых ограждающих конструкций жилых и общественных зданий.

Разработаны несколько вариантов основных конструктивных решений для зданий разных степеней огнестойкости с защитными слоями из штукатурки и из мелкоштучных каменных или бетонных материалов.

Утепление может устраиваться как методом напыления, так и методом заливки.

Работы по теплоизоляции поверхностей пенополиуретаном могут выполняться как с люлек, так и с лесов. Выбор средств подмащивания зависит от высоты здания и его конфигурации; оснащенности строительной организации; сроков проведения работ т.д.

До начала работ по утеплению зданий следует выполнить снятие подоконных отливов и очистку поверхностей фасада и утепление дверных и оконных откосов негорючим утеплителем. Напыление или заливка утеплителя выполняется при помощи пеногенераторов "Пена-9М" или "Пена-12" с применением пистолета-распылителя специальных насадок.

#### А) Вариант напыления

Напыление производится сверху вниз и по горизонтали вертикальными захватками шириной 4-6м и высотой, равной высоте здания. Второй слой наносится после напыления на весь участок захватки и одной-двух минут выдержки.

При использовании метода напыления, получается пенополиуретановое покрытие бугристой поверхности, и поэтому возникает необходимость в устройстве выравнивающего слоя. После него в зависимости от степени огнестойкости и толщины лицевого слоя в зданиях выполняют различные защитно-декоративные штукатурные слои, армированные металлической сеткой, усиленной при необходимости каркасом из арматурных стержней, который крепится специальными дюбелями. В углах оконных и дверных проемов устанавливают дополнительные укрепляющие сетки. Технология выполнения грунтовочных, шпатлевочных, штукатурных и окрасочных работ зависит от выбора защитно-отделочных слоев. Наносить составы слоев можно как вручную, так и механизированно.

#### Б) Вариант заливки в переставную опалубку

Для выполнения утепления методом заливки необходимо применять опалубку, которая отвечала бы антиадгезионным свойствам по отношению к пенополиуретану. Возможны специальные покрытия внутренней части опалубки полиэтиленовой пленкой или оцинкованной жстью, покрытия силиконовыми или другими составами (смесь мыла и талька, полиэтиленовый воск). Крепление щитов к стене фасада осуществляется специальными крепежными элементами. Высота щитов обеспечивает необходимую высоту вспенивания и принимается кратной для размеров фасадных плоскостей. Заливка пенообразующей массы в опалубку производится снизу - вверх.

Поверхность утеплителя, нанесенного таким способом, получается гладкой, это позволяет устраивать защитно-декоративное штукатурное покрытие без устройства выравнивающего слоя. Покрытие выполняется по технологии, аналогичной технологии для варианта напыления.

#### В) Вариант заливки в несъемную опалубку

Для выполнения утепления методом заливки необходимо установить два ряда мелкоштучных элементов, чтобы обеспечить доступность к любой точке утепляемой поверхности стены. Так же, как и для варианта заливки в переставную опалубку, работы ведутся снизу – вверх.

Важное значение для качественного выполнения работ с применением несъемной опалубки имеет точная разметка мест крепления защитных мелкоштучных материалов. Погрешности, допущенные при выполнении разметки, неизбежно приведут к существенным отклонениям качественных параметров конструкции. Метки выносятся на фасады с помощью оптических приборов и закрепляются несмываемой краской. При использовании строительных лесов разметка выполняется на всём фронте работ, при использовании локальных средств подмащивания – на каждой захватке по заранее вынесенным контрольным точкам.

Сверление отверстий под крепежные элементы производится ручной сверлильной машиной с комплектом насадок по нанесённым меткам.

Установка защитно-декоративных элементов осуществляется на опорные несущие профили с креплением гибкими связями, устанавливаемых порядно, которые, в свою очередь, крепятся к стене при помощи уголков и специальных дюбелей. В углах здания, местах примыкания, в первом и последнем рядах, в простенках используются фасонные элементы.

Все швы между элементами защитно-отделочного слоя заполняются раствором на всю глубину для создания сплошной огнезащитной преграды.

Вся плоскость стены должна быть разбита противопожарными отсечками на отсеки площадью не более  $15\text{ м}^2$ . Кроме того, сплошные защитно-отделочные слои должны иметь температурные швы расположенные не более чем через 50 м.

Срок службы теплоизоляции, выполненной в соответствии с данными рекомендациями соизмерим со сроком службы ограждающей конструкции.

Относительно невысокая стоимость утепления с применением пенополиуретана по сравнению с системами утепления, предлагаемыми отечественными и зарубежными фирмами делает его конкурентоспособным, а также сокращает сроки окупаемости тепловой реабилитации зданий.

Сравнение по трудоемкости и стоимости  $1\text{ м}^2$  различных вариантов утепления приведены в таблице.

Варианты утепления	Удельные показатели	
	Стоимость, $\$/\text{м}^2$	Трудоемкость, чел-ч/ $\text{м}^2$
Облицовка с последующим оштукатуриванием "Саратек"	25-30	2,5
Облицовка "На отnose" (утеплитель- минеральная вата)	30	1,9
Облицовка блоками "Теплоэффект"	25	1,5
Утепление монолитным пенополиуретаном со штукатурными защитно-декоративными слоями	7,26-11,2*	1,4-3*
Утепление монолитным пенополиуретаном с защитно-декоративным слоем из мелкоштучных элементов	18,75-8,13*	1,9-2,8*

\*В зависимости от защитно-декоративного слоя и выбора средств подмащивания.

### Литература

1. Теплоизоляционные материалы. Справочное пособие научно-технических достижений. НТД-89. ВНИИНГПИ. Москва, 1989.
2. Применение пенопластов для теплоизоляции зданий и сооружений. Обзорная информация. Москва, 1994г.
3. Шрейбер К.А., Немцын Л.К., Стригина А.Н. Технологическая карта на устройство наружной теплоизоляции жилых домов методом напыления пенополиуретана ППУ-17Н. Ордена Ленина Главмосстрой при Мосгорисполкоме. Москва, 1983г.

4. "Белорусский строительный рынок" №15/1997г Т. Г. Оленина, А. П. Пашков, К. Н. Нехайчик "Тепловая защита ограждающих конструкций зданий с применением литьевого пенополиуретана. Состояние и перспективы."

## **КОРРОЗИОННОЕ СОСТОЯНИЕ АРМАТУРЫ В ЯЧЕИСТОМ БЕТОНЕ**

Р.Ф.Осос, Н.Л.Полейко

Факультет дорожного строительства, БГПА

г. Минск, Беларусь

Рассмотрено коррозионное состояние арматурной стали в ячеистом бетоне автоклавного твердения. Дана оценка качества антикоррозионного защитного покрытия.

Ключевые слова: антикоррозионное покрытие, ячеистый бетон, коррозия стали.

В АО «Забудова» налажен выпуск изделий из автоклавного ячеистого бетона, армированных стальной арматурной проволокой, по немецкой технологии. Ячеистый бетон является агрессивной средой по отношению к стальной арматуре, так как водородный показатель среды ячеистого бетона составляет 7,5 - 9, в то время как для пассивации арматуры необходимо, чтобы водородный показатель составлял не менее 11,5. Не достаточные защитные свойства ячеистого бетона можно объяснить еще и тем, что он обладает большим объемом открытых пор, наличие которых создает условия для интенсивной коррозии арматуры в конструкциях. Помимо указанных факторов на коррозию арматуры влияет величина сцепления арматуры с ячеистым бетоном. Ячеистый бетон не обеспечивает должного сцепления с арматурой и тем самым облегчает доступ агрессивных веществ к поверхности арматуры и создает условия для более интенсивного развития процессов коррозии в приарматурной зоне.

Одним из способов защиты арматуры от коррозии в ячеистом бетоне является защита арматурных элементов антикоррозионным средством, годность и эффективность защиты, которого оценивается перед использованием в промышленном изготовлении конструкций.

Согласно технологического регламента производства конструкций из ячеистого бетона, защита арматуры производится водорастворимым лаком «Лезонал».

Оценку защитного покрытия предложено было осуществлять согласно методике по DIN 4223, которая предполагает изготовление или выпиливание образцов размером 400x400x100 мм и однократное нагружение их сосредоточенной нагрузкой в 100 кгс. После снятия нагрузки в течении одного года образцы выдерживаются при температуре 20 - 2 С и относительной влажности 95 %. По истечении этого срока арматура освобождается от бетона и визуально осматривалось ее коррозионное состояние. Если образцы арматуры не имеют ржавчины или имеют легкий налет ржавчины (без образования пластинок, чешуек) на не более 5% поверхности стержней арматуры, то антикоррозионное средство подходит для использования в ячеистом бетоне.

Существует также ускоренный метод оценки антикоррозионных свойств покрытия согласно DIN 4223. Сущность его в сравнении контрольных (не подвергшихся испытанию образцов) и основных образцов, испытанных по следующей программе: образцы выпиленные из плит подвергаются попеременному насыщению в течении 2 часов и высушиванию в течении 3 сут. в 3% растворе поваренной соли. После этого образцы освобождаются от бетона осматриваются и сравнивается поражение стержней ржавчиной. Если у образцов подвергнутых испытанию не обнаруживается более интенсивного образования ржавчины, чем у контрольных, то антикоррозионные средство подходит для данной конструкции. Если в результате испытаний образцы интенсивно покрылись ржавчиной, то для окончательной оценки должно быть проведено испытание по основному методу.

Вышеприведенные методики предусматривают длительное испытание образцов, что зачастую не удовлетворяет производителей изделий. Нами для оценки коррозионного состояния арматуры в ячеистом бетоне, был предложен метод изложенные в стандарте СТ СЭВ 4421-83 «Защита от коррозии в строительстве. Защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре. Электрохимический метод испытаний».

Метод испытания основывается на пассивации арматурной стали в щелочной среде и заключается в оценке защитного действия образца бетона по отношению к стальной арматуре путем сравнения данных, полученных при изменении плотности электрического тока в зависимости от изменения потенциала, пропускаемого через образец.

По этому методу из ячеистого бетона готовилась водная вытяжка, в которую помещаются защищенные водорастворимым лаком «Лезонал» образцы

стальной арматуры. После этого, по методике СТ СЭВ 4421 снимались потенциодинамические кривые, по плотности тока которых можно прогнозировать коррозионное состояние стали в данной среде. Для сравнения приведены исследования и не защищенных антикоррозионным покрытием образцов. Результаты испытаний представлены в таблице, из которых видно, что образцы арматурной стали с защитным покрытием «Лезонал» находятся в пассивном состоянии. Незащищенные образцы арматурной стали подвергаются интенсивной коррозии.

Преимущество данного метода оценки коррозионного состояния арматуры по сравнению с методиками стандартов DIN, заключается в следующем: результаты испытаний по этому методу позволяют прогнозировать коррозионное поведение стали в ячеистом бетоне и среде эксплуатации, сокращает время проведения испытаний, сокращается длительность и упрощается технология подготовки образцов.

Таблица

## Коррозионное состояние арматурной стали в ячеистом бетоне

№ п/п	Наименование объекта испытаний, показатели, технические требования и т.д.	Номер пункта НД, устанавливающего метод испытаний	Нормированное значение показателей установленных НД	Образцы с защитным слоем лака	Образцы незащищенные
1	Установившийся потенциал, мВ	СТ СЭВ 4421 п.6.1.	Не ниже -550	-300	-550
2	Потенциал пассивации, мВ	_____	Не ниже -450	-250	-490
3	Потенциал разрушения, мВ	_____	От 450 до 600	500	510
4	Плотность тока при потенциале +300 мВ мк А/см.кв	_____	до 10	0,79	32,0

## Литература:

1. Стандарт СЭВ 4421 «Защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре. Электрохимический метод испытаний».
2. Алексеев С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне. -М: Стройиздат, 1968.-231с
3. Стандарт DIN 4223.

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РАСШИРЯЮЩИХСЯ ВЯЖУЩИХ И БЕТОНОВ НА ИХ ОСНОВЕ

А.И.Панченко, ВНИИЖелезобетон, г.Москва

Г.В.Невструев, РГСУ, г.Ростов-на-Дону

Диапазон применения расширяющихся вяжущих сульфаломинатного типа довольно широк и зависит от целей, поставленных в каждом конкретном случае. Например, для разрушения горных пород невзрывным способом необходимо обеспечить возможно большую величину энергии химического расширения, а при двух- или трехосном натяжении арматуры (в трубах, цилиндрических резервуарах), а также при твердении в жесткоограниченных условиях (жестких стыках и др.) необходима хотя и высокая, но, тем не менее, нормированная величина энергии расширения и самонапряжения. Наиболее широкое и весьма эффективное использование расширяющихся вяжущих и, тем более, расширяющихся добавок к портландцементу, возможно в случае необходимости улучшения таких свойств бетона, как усадочная трещиностойкость, непроницаемость, а также стойкость к атмосферным воздействиям. В этом случае на первый план выходит согласованность процессов роста прочности и расширения. Однако в настоящее время очень трудно оценить с достаточной достоверностью степень указанной согласованности процессов, то есть отсутствует критерий, характеризующий эффективность того или иного расширяющегося цемента или расширяющей добавки в бетоне.

В настоящее время для расширяющихся и напрягающих цементов, используемых в конструкциях, твердеющих в свободных условиях (без ограничения деформаций) нормируется лишь величина их свободного расширения. Вместе с тем известно [1, 2], что бетоны с одной и той же величиной свободного расширения в одном случае могут иметь пониженную, а в другом повышенную прочность. В связи с этим величина свободного расширения не является достаточно надежным критерием эффективности РЦ или НЦ. Для напрягающих цементов в соответствии с ТУ 21-20-18-80 и ТУ 21-20-48-82 нормируется и величина самонапряжения (напряжение в бетоне при

ограничении его расширения устройством, эквивалентным 1% армирования).

Одним из параметров, влияющим на величину деформаций и прочность ПЦ и ПЦ по мнению многих ученых является соотношение оксидов алюминия и серы в цементе. Величина этого отношения, рекомендуемого различными авторами в качестве оптимального, колеблется в довольно широких пределах. Данных по исследованию морозостойкости в зависимости от соотношения этих оксидов в литературе не обнаружено.

Авторами проведены исследования морозостойкости бетонов, приготовленных на цементах с расширяющейся добавкой и напрягающих цементах с различным соотношением  $A/S$ , которое менялось от 1,5 до 3,2. В исследованиях были использованы цементы пяти различных заводов, а общее число экспериментальных данных составило 42. На рис. 1а представлены статистически обработанные результаты полученных данных по испытанию цементного камня на морозостойкость при температуре -50°C. Коэффициент корреляции, характеризующий разброс экспериментальных данных по сравнению с величинами, показанными на рис. 1а, как и ожидалось, оказался невелик - 0,66-0,69. Вместе с тем, значительное число экспериментальных данных и наличие явного оптимума на графике позволяют выделить интервал 1,6-1,9, на который нужно ориентироваться при подборе состава расширяющей добавки или расширяющегося (напрягающего) цемента с точки зрения получения структуры цементного камня повышенной морозостойкости.

Такое большое различие величин  $A/S$  (в среднем в 2,3 раза по данным разных авторов [1, 3], рекомендуемых в качестве оптимальных, обусловлено тем, что, используя лишь соотношение оксидов, весьма сложно прогнозировать свойства того или иного цемента с расширяющей добавкой. Причина в том, что твердение такого рода цемента есть результат взаимного влияния многих факторов: минералогического и химического состава, тонкости помола портландцемента, соотношение оксидов, минералогии, удельной плотности расширяющей добавки, ее количества, а также условий твердения. Причем каждый из перечисленных факторов по-своему влияет как на рост прочности, так и на процесс расширения. Например, увеличение количества  $C_3S$  в ПЦ-клинкере с одной стороны ускоряет набор прочности, а с другой - будет

увеличивать расширение из-за большего количества извести в жидкой фазе, образующейся в процессе гидратации и гидролиза трехкальциевого силиката. Как известно, увеличение тонкости помола расширяющегося цемента не только ведет к ускорению твердения, но и к снижению расширения, также как и тепловая обработка, ускоряя набор прочности снижает конечную величину расширения. В связи с этим необходим поиск иного критерия, который отражал бы влияние всех перечисленных факторов в совокупности на конечные свойства цементного камня и бетона.

В формировании свойств цементного камня и бетона в целом существенное значение имеет минералогический состав цемента. Что касается морозостойкости, то здесь особая роль принадлежит трехкальциевому алюминату ( $C_3A$ ). В настоящее время связь долговечности портландцементов с содержанием  $C_3A$  можно считать доказанной.

В отношении расширяющихся или напрягающих цементов таких данных практически нет. Однако морозостойкость бетона на основе расширяющегося или напрягающего цемента не может не зависеть от содержания  $C_3A$  в исходном ПЦ-клинкере хотя бы потому, что его количество составляет от 70 до 90% всей массы цемента.

Исследование морозостойкости и термоморозостойкости цементного камня, приготовленного на расширяющихся цементах с содержанием  $C_3A$  в ПЦ-клинкере от 0,3 до 10% и твердевших как при 20°C, так и при 60°C, показали (рис.16) прямую зависимость морозостойкости от количества  $C_3A$  в исходном цементе. Коэффициент корреляции в этом случае был выше, чем при исследовании влияния  $A/\bar{S}$  и составил 0,78-0,87. Из рис.16 видно, что для приготовления РЦ и НЦ и бетонов на их основе, обладающих повышенной морозостойкостью и термоморозостойкостью, необходимо использовать портландцементы с содержанием трехкальциевого алюмината не более 5-6%. При превышении этого предела морозо- и термоморозостойкость цементного камня (а значит и бетона при прочих равных условиях) существенно снижаются.

Структурообразование бетонов есть результат двух параллельно протекающих процессов: конструктивных (рост прочности структуры) и деструктивных (развитие напряжений и трещин). Первые обусловлены кристаллизацией продуктов гидратации, вторые - химической контракцией, влажностной усадкой. Это свойственно и для бе-

тонов на основе расширяющихся вяжущих, за исключением того, что на указанные выше процессы "накладывается" процесс образования этtringита и расширение твердеющего бетона, который так же может являться причиной как конструктивных, так и деструктивных явлений. Ранее автором предложено [ 4 ] разделять образующийся этtringит на "активный" и "пассивный" в зависимости от его морфологии. Образование пассивного этtringита приводит к увеличению твердой фазы и перераспределению напряжений в формирующейся поровой структуре, благоприятно влияя на прочность бетона. Положительное влияние на прочность структуры и контактной зоны оказывает и образование активного этtringита, но в том случае, если вызванное им расширение лишь компенсирует процессы контракции и усадки. Некоторое уплотнение структуры может иметь место и тогда, когда расширение, вызванное образованием активного этtringита, сопровождается возникновением напряжений, не превышающих прочности формирующейся структуры в каждый момент твердения бетона. В противном случае неизбежно образование трещин как в цементном камне, так и в контактной зоне, в местах наибольшего сближения зерен заполнителя [ 5 ].

Известно, что расширяющиеся цементы и бетоны, обладающие очень активным свободным расширением, при твердении в условиях упругого ограничения, не только не теряют прочность, а существенно ее повышают. То есть, налицо эффект самоуплотнения структуры из-за сдерживания деформаций за счет ограничения деформаций извне. При твердении в свободных условиях роль ограничителя химического расширения выполняет кристаллическая структура цементного камня, прочность которой растет во времени.

Величина свободного или связанного расширения - это внешние проявления химической энергии, которой обладает бетон определенного состава, приготовленный на расширяющемся вяжущем и твердевший в определенных температурно-влажностных условиях. При этом величина свободной деформации всегда будет больше, чем величина упругоограниченной деформации, так как любое внешнее усилие будет дополняющим к усилию со стороны структуры твердеющего бетона, сдерживающего химическое расширение бетона. Чем меньше будет разница между свободной и упругоограниченной деформацией того или иного расширяющегося цемента

или бетона, тем с большей эффективностью будет реализовано действие расширяющейся добавки. Поэтому предлагается использовать отношение  $\epsilon_c/\epsilon_y$ , где:  $\epsilon_c$  - деформация в свободном состоянии;  $\epsilon_y$  - деформация в упругоограниченном состоянии, эквивалентном 1% армирования - в качестве критерия оценки эффективности расширяющих и расширяющихся цементов, а так же бетонов на их основе. Вполне логично назвать отношение  $\epsilon_c/\epsilon_y$  показателем деформаций, который характеризует, насколько полно химическая энергия преобразуется в работу расширения в условиях упругого ограничения деформаций по сравнению со свободным расширением.

Таблица 1

Прочность и показатель деформаций бетона с расширяющей добавкой на портландцементе с разной тонкостью помола

Свойства	Удельная поверхность ПЦ, см <sup>2</sup> /г		
	2800	3700	4400
Показатель деформаций $\epsilon_c/\epsilon_y$	13,4	5,6	2,3
Прочность при сжатии, МПа	8,2	27,4	43,2

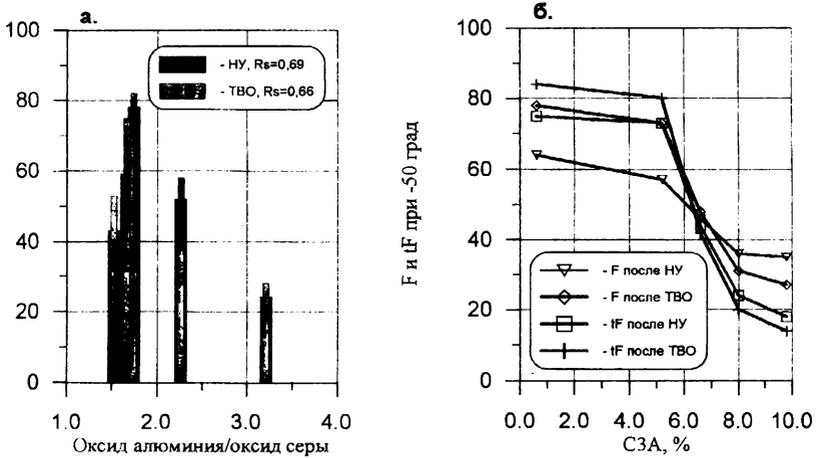
В таблице 1 показано изменение величины показателя деформаций. Как и следовало ожидать, с возрастанием показателя деформаций прочность цементно-песчанного раствора уменьшается. Были проведены специальные исследования зависимости прочности от величины показателя деформаций для бетонов различного вида (тяжелого и легкого) и различных составов. В исследованиях использовались расширяющие цементы и портландцементы с расширяющими добавками, самонапряжение которых колебалось в пределах 0,5-2,5 МПа, а свободное расширение доходило до 3,8%. Аналогичные исследования проводились и на цементном камне. Нетрудно заметить, что зависимость прочности при сжатии от величины показателя деформации бетона близка к линейной, а коэффициент корреляции  $R_s=0,92$ , что говорит о достаточно небольшом отличии экспериментальных данных от кривой, построенной после их статистической обработки. Нужно отметить, что на рис.2 показаны некоторые точки, рассчитанные по данным других авторов, которые хорошо согласуются с резуль-

татами, полученными автором. Из данных рис.2 видно, что максимальное превышение прочности бетона с расширяющей добавкой, по сравнению с аналогичным бетоном на основе портландцемента имеет место при значении показателя деформаций, приближающегося к единице и для практических целей может быть рекомендовано в диапазоне 1,0 - 2,5. Вторым важным выводом является возможность определения критической величины показателя деформаций, то есть того порога, выше которого бетон с расширяющей добавкой будет иметь прочность ниже, чем исходный, без добавки. Из рис.2 следует, что для прочности при сжатии  $(\epsilon_c/\epsilon_y)_{кр}$  не должно превышать 6-7. Иными словами, если бетон на основе РЦ или НЦ имеет величину показателя, меньшую, чем 6,0, то в синтезе прочности будут превалировать конструктивные явления, обусловленные присутствием расширяющей добавки. Проявление деструкции следует ожидать, если  $\epsilon_c/\epsilon_y > 7,0$ .

Известно, что прямой зависимости между прочностью и морозостойкостью нет. Одни и те же факторы по-разному могут влиять на эти свойства (например, воздухововлечение), поэтому вполне вероятно, что зависимость морозостойкости от показателя деформаций будет отличаться от таковой в отношении прочности. Сказанное выше, а так же необходимость иметь численное значение критерия эффективности расширяющегося вяжущего или бетона в практических целях для обеспечения необходимой морозостойкости, послужило основанием для проведения специального цикла исследований.

В исследованиях использовались напрягающие цементы различных заводов, а так же расширяющиеся портландцементы, приготовленные на основе глиноземистого шлака или японской расширяющей добавки DENKA. Во всех случаях сонапряжения цементов не превышало 2,5 МПа. Испытанию на морозостойкость подвергались как тяжелые, так и легкие бетоны с расходом цемента до  $350 \text{ кг/м}^3$ , твердевшие в кондукторах, обеспечивающих упругое ограничение деформаций, эквивалентное 1% армирования, а также бетоны свободного твердения.

Изменение морозостойкости керамзитобетона на основе различных цементов с разными величинами  $\epsilon_c/\epsilon_y$ , в зависимости от условий твердения можно проанализировать по данным, приведенным в таблице 2. Результаты испытаний показывают, что



Морозостойкость цементного камня из РЦ с различным содержанием оксида алюминия и серы (а) и трехкальцевого алюмината (б).

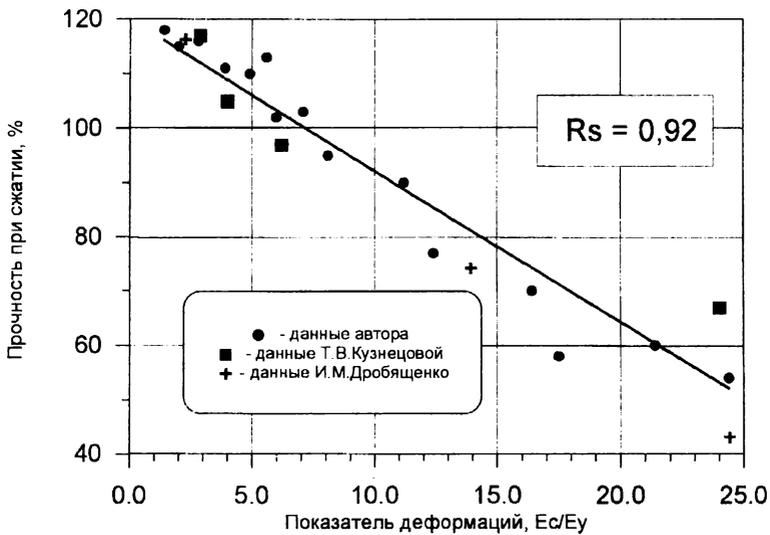


Рис. 2 Прочность при сжатии бетонов с различной величиной показателя деформаций  $E_s/E_y$ .

Морозостойкость и показатель деформаций керамзитобетонов, твердевших в различных условиях

Завод-изготовитель	Свойства цементов			Условия твердения керамзитобетона	F, циклы при -50°C
	R <sub>c</sub> , МПа	S <sub>p</sub> , МПа	ε <sub>c</sub> /ε <sub>y</sub>		
НЦ, Подольский завод	51,0	2,08	13,4	НУ, свободно	33
				НУ, ограничение	100
				ВВ, свободно	30
				ВВ, ограничение	95
				55°C, свободно	56
				55°C, ограничение	98
НЦ, Днепродзержинский завод	44,7	1,51	3,2	НУ, свободно	43
				НУ, ограничение	105
				ВВ, свободно	40
				ВВ, ограничение	102
				55°C, свободно	80
				55°C, ограничение	108
НЦ, Пашийский завод	52,5	1,25	1,64	НУ, свободно	83
				НУ, ограничение	103
				ВВ, свободно	98
				ВВ, ограничение	110
				55°C, свободно	65
				55°C, ограничение	95
ПЦ, Чечено-Ингушский	44,8	-	-	НУ, свободно	39
				55°C, свободно	34

В таблице приняты обозначения: R<sub>c</sub> - прочность при сжатии; S<sub>p</sub> - самоуплотнение; ε<sub>c</sub>/ε<sub>y</sub> - показатель деформаций; F - морозостойкость; НУ - нормальные условия твердения; ВВ - водное выдерживание при 20°C.

чем выше показатель деформаций напрягающего цемента, на основе которого изготовлен бетон, тем ниже его морозостойкость после твердения в свободных условиях.

Причем такая тенденция прослеживается для всех исследованных температурно-влажностных условий.

Аналогичная зависимость видна и между показателем деформаций бетонов и их морозостойкостью. Бетоны, твердевшие в условиях упругого ограничения, показали приблизительно одинаковую морозостойкость независимо от температурно-влажностных условий. Следует также отметить, что при малых значениях  $\epsilon_c/\epsilon_y$  морозостойкость бетона на НЦ, твердевшего в свободных условиях, превышает морозостойкость бетона на основе портландцемента более чем в 2 раза. Аналогичный вывод можно сделать и из данных рис.3. Из этого же рисунка видно, что для обеспечения высокой морозостойкости бетона на основе расширяющихся вяжущих, его показатель деформаций не должен превышать значение, равное двум, то есть  $\epsilon_c/\epsilon_y < 2,0$ .

Повышение значения показателя деформаций существенно увеличивает разницу морозостойкостей бетонов упругоограниченного и свободного твердения (рис.4). Достоверность данных, приведенных на рис.3 и 4 можно считать достаточно высокой, так как коэффициент корреляции  $R_s$  в обоих зависимостях не менее 0,9.

Сравнивая данные рисунков 2 и 3 можно констатировать, что при повышении значения показателя деформаций бетоны на расширяющихся вяжущих показывают существенно меньшую чувствительность по отношению к прочности, нежели к морозостойкости. При изменении  $\epsilon_c/\epsilon_y$  от 1,4-1,6 до 5,0 прочность снижается на 12-15%, а морозостойкость уменьшается вдвое при изменении показателя деформаций в этих же пределах. Происходит это, вероятно, потому, что появляющиеся в структуре микротрещины из-за несоответствия между процессами расширения и роста прочности, по-разному влияют на прочность и морозостойкость бетона. При сжатии бетона процесс его разрушения ускоряется лишь за счет той части от всего количества образовавшихся трещин, которая имеет ориентацию, близкую к направлению действующего усилия сжатия. При замораживании бетона каждая из трещин может быть дополнительным источником разрушения, если она заполнена водой, что весьма вероятно, так как испытание бетона проводится после его интенсивного водонасыщения.

Таким образом, необходимо целенаправленно регулировать процессы расширения и структурообразования расширяющихся или напрягающих цементов и бетонов

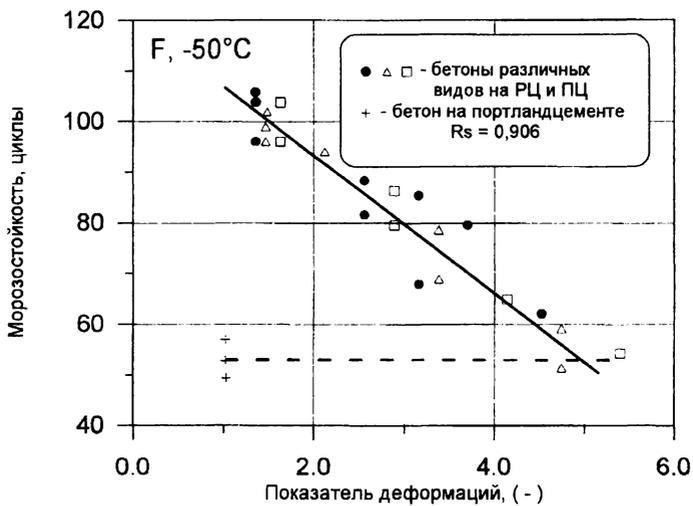


Рис. 3 Зависимость морозостойкости от показателя деформаций.

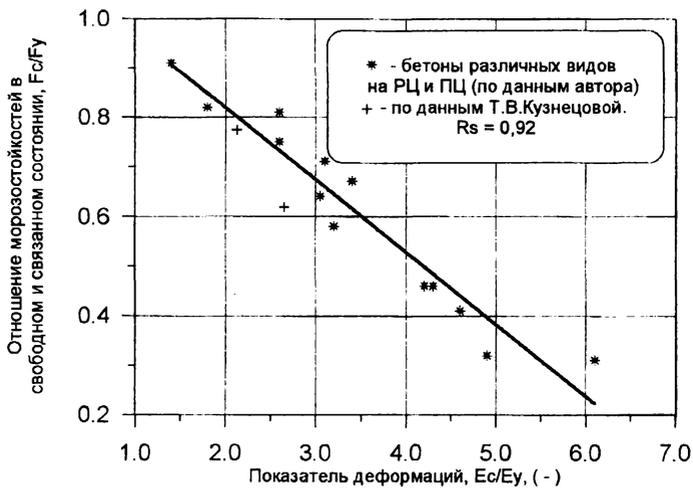


Рис. 4 Изменение морозостойкости бетонов, твердевших в свободном состоянии по сравнению с упругоограниченным в зависимости от показателя деформаций.

на их основе. Способы управления процессом расширения приведены в [ 5 ]. Рекомендованные соотношения оксидов алюминия и серы, а также количество  $C_3A$  в исходном портландцементе должны учитываться при первоначальном назначении вещественного состава расширяющегося или напрягающего цемента и уточняться экспериментально. В качестве критерия эффективности той или иной расширяющейся добавки, расширяющегося цемента или бетона на их основе целесообразно использовать показатель деформаций. Величина показателя деформаций  $\epsilon_s/\epsilon_c$  не должна превышать рекомендованных выше значений, обеспечивающих наибольшую морозостойкость и прирост прочности бетона.

#### Литература

1. Михайлов В.В., Литвер С.Л. Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные железобетонные конструкции. - М.: Стройиздат. 1974.- 312с.
2. Бейлина М.И. Напрягающий цемент на основе сульфаломинатного клинкера. // Исследование и применение напрягающего бетона и самонапряженных железобетонных конструкций. - М.: Стройиздат, 1984.- с.15-22.
3. Кузнецова Т.В. Химия и технология расширяющихся цементов. - Москва.: ВНИИ-ЭСМ. Серия I. Цементная промышленность. 1980.-60с.
4. Панченко А.И. Долговечность бетона на расширяющемся цементе. // 75 лет расширяющемуся цементу. - Веймар, Германия. 1995.- с.119-129.
5. Panchenko A.I. Control of Expansion and Structure Formation of Expansive Cement. // Cement and Concrete Research, vol.20, 1990.- pp 602-609.

## ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ФАКТОРА НА ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ И КОМПРЕССИОННЫЕ СВОЙСТВА НАМЫВНЫХ ГРУНТОВ

К.Н. Пироговский

Белорусский государственный университет транспорта  
г. Гомель, Республика Беларусь

В статье приведены некоторые результаты исследований влияния вибрации на фильтрационные свойства намывных грунтов и частоты и длительности вибрации на критическое ускорение и осадки штампа виброкомпрессионного прибора.

Ключевые слова: вибрация, грунт, фильтрация, ускорение, частота, пористость.

Для исследования влияния вибрации на фильтрационные свойства грунта использовался фильтрационный прибор ПВ, доработанный в лаборатории механики грунтов БелГУТа таким образом, что стало возможным приложение к нему динамических нагрузок.

Для возможности сравнения опыт проводился следующим образом. Прибор с образцом грунта устанавливался на вибростенд и подвергался вибродинамическому нагружению при частоте 50 Гц с ускорением 0,1g в течение 15 мин для уплотнения грунта и перераспределения частиц. Затем проводилось определение коэффициента фильтрации при действии вибрации. Затем стенд выключался и проводилось определение коэффициента фильтрации в статических условиях. Аналогичные циклы проведены для ускорений 0,3g; 0,5g; 0,7g; 0,9g.

Исходные данные для расчета коэффициентов фильтрации приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные значения для определения коэффициента пористости.

Начальный напор, $H_n$ , см	Конечный напор $H_k$ , см	Понижение уровня $H_n - H_k$ , см	Среднее значение напора $\bar{H} = \frac{H_n + H_k}{2}$	Гидравлический градиент $J = \bar{H} / l$	Расход воды $G = S(H_n - H_k)$
34,5	14,5	20	24,5	6,13	12,4

Результаты экспериментов приведены в виде графиков изменения коэффициентов фильтрации от ускорения, которые показаны на рис. 1.

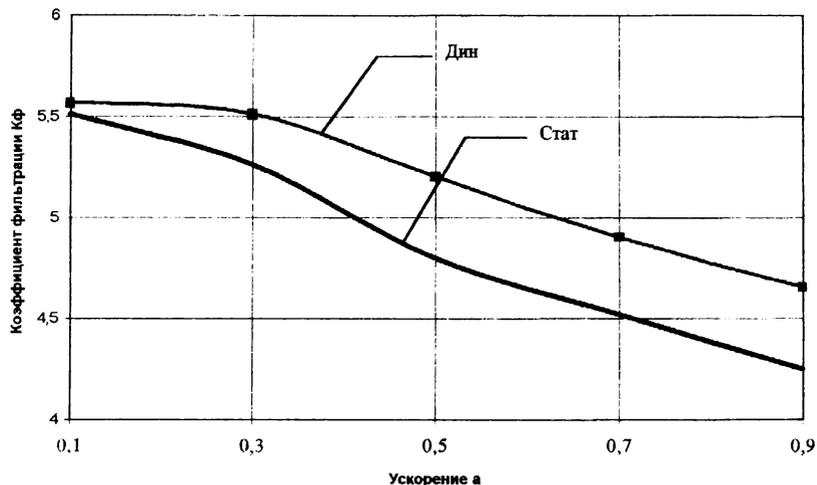


Рис. 1 – График изменения коэффициента фильтрации от ускорения

Работы по определению изменения пористости проводились на специально разработанном виброкомпрессионном приборе. По принципу работы он близок к обычному компрессионному прибору, но к образцу приложена вибродинамическая нагрузка. Схема прибора показана на рис. 2.

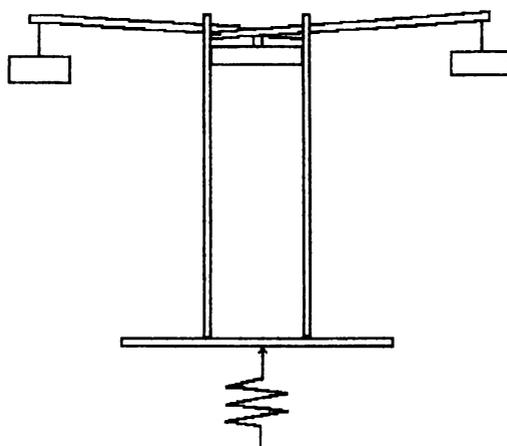


Рис. 2 – Схема виброкомпрессионного прибора

Испытывались грунты – песок крупный плотностью  $\rho=1,58 \text{ г/см}^3$ , с влажностью  $w=0,08$ , коэффициентом пористости  $e=0,835$  и песок средней крупности с аналогичными характеристиками.

Для данных грунтов определена величина критического ускорения (т.е. такого, при котором начинается осадка штампа) при давлении  $P=0,1; 0,2$  и  $0,3$  МПа. Критическое ускорение для данных уровней определялось при трех значениях частоты – 50, 100 и 150 Гц. Величина критического ускорения определялась путем постепенного увеличения амплитуды виброперемещений стола. Полученные в результате эксперимента зависимости приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что уровень критических ускорений для песков с одинаковыми характеристиками не остается постоянным, если изменяется частота вибрационного воздействия. На рис. 3 видно, что наибольшие критические ускорения отмечены на частоте 150 Гц. При этом рост частоты в 3 раза вызывает рост ускорения в 1,94 раза для крупных песков и в 1,24 – для песков средней крупности.

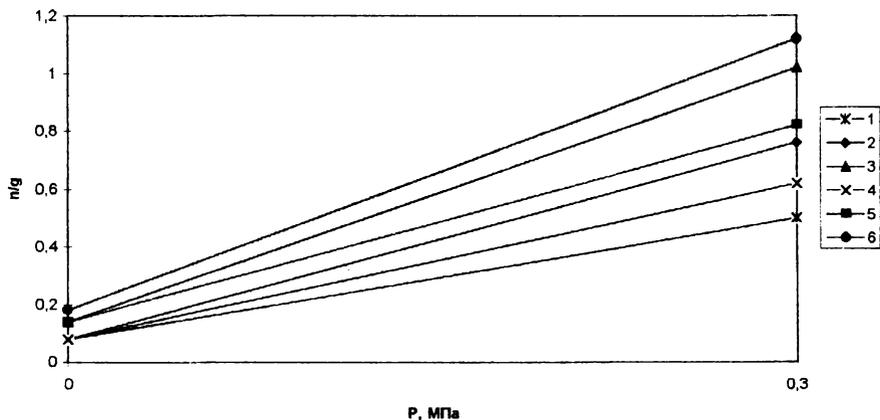


Рис. 3 – Зависимость критического ускорения от статического давления  $P$  для крупного песка при частоте 1–150, 2–100, 3–50 Гц; для песка средней крупности при частотах 4–150, 5–100, 6–50 Гц.

Таблица 2

Значения критических ускорений  $\eta_{кр}$  и величин осадки  $\Delta h$  N при различных частотах  $f$  и степени неоднородности  $C_v$  крупного песка

f, Гц	Показатель	$C_v = 2,6$		$C_v = 5,3$		$C_v = 8,6$	
		P=0	P=0,3	P=0	P=0,3	P=0	P=0,3
150	$\eta_{кр}$	1,33	10,11	1,46	11,71	1,58	12,11
100		1,03	7,4	1,21	7,93	1,35	8,42
50		0,89	5,21	1,06	5,81	1,17	6,11
150	$\Delta h$	4,27	5,11	4,49	5,27	4,68	5,37
100		4,63	5,53	4,85	5,81	5,07	6,01
50		4,97	6,55	5,13	6,71	5,31	6,95

Зависимость критического ускорения от статического давления удовлетворительно описывается корреляционным линейным выражением вида

$$\eta_{кр} = a_f P + \eta_n$$

где  $\eta_{кр}$  – критическое ускорение исследуемого грунта для определенной частоты;

P – давление, передаваемое поршнем на образец, МПа;

$a_f$  – коэффициент, учитывающий влияние частоты;

$\eta_n$  – начальное ускорение, характеризующее начало процесса уплотнения у ненагруженного образца при определенной частоте;

Выводы:

1. При воздействии вибрации происходит увеличение коэффициента фильтрации в среднем примерно на 10%.
2. Величина критического ускорения, при которой начинается виброуплотнение грунта, не является четко фиксированной, а есть функция от частоты колебаний.
3. Пески, имеющие большую крупность, начинают уплотняться при меньших значениях виброускорений, что можно объяснить меньшим числом точек контакта частиц и уменьшением, в свою очередь, сил внутреннего трения.
4. На критическое ускорение для песка наряду с его крупностью определенное влияние оказывает его неоднородность: чем больше неоднородность, тем больше критическое ускорение и количество циклов вибрации до полной стабилизации.

## Литература

1. Пироговский К.Н. Влияние подвижного состава на осадки зданий // XXIX СНТК вузов республик Прибалтики, Белоруссии и Молдавии: Тез. докл. конф. – Каунас, 1985.
2. Кудрявцев И.А., Пироговский К.Н. Влияние вибрации на свойства песчаных грунтов// XXVII НТК “Научно-технический прогресс в строительстве”: Тез. докл. конф. – Пенза, 1993.

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ГАЗОФОСФОГИПСОВЫЕ ПЛИТЫ**

В.Г.Повидайко, Г.Б.Скачкова  
Строительный факультет, БГПА  
г.Минск, Беларусь

Разработаны композиции и технологии производства теплоизоляционных газофосфогипсовых плит. Особенность технологии состоит в том, что предусматривается раздельное перемешивание сухих компонентов, водных растворов газообразователя и пенообразующей добавки и окончательное перемешивание всех компонентов. Это обеспечивает получение гомогенной смеси с высоким коэффициентом вспучивания и устойчивости. По предварительным технико-экономическим расчетам себестоимость газофосфогипсовых плит на 30 % ниже себестоимости газосиликатных теплоизоляционных плит.

Ключевые слова: газофосфогипс, теплоизоляционные плиты, средняя плотность, предел прочности при сжатии.

Недостаточное термическое сопротивление наружных ограждающих конструкций в зданиях и сооружениях приводит к повышенным теплопотерям в холодный период их эксплуатации. Увеличивается расход энергоресурсов на обогрев зданий и возрастает стоимость их эксплуатации. Для повышения термического сопротивления ограждающих конструкций целесообразно использовать эффективные теплоизоляционные материалы. На практике широко используют газосиликатные теплоизоляционные плиты, утеплитель из базальтового волокна, пенополистирольный и пенополиуретановый утеплители. Для производства газосиликатных плит требуются значительные энергозатраты при осуществлении автоклавной обработки изделий. Производство утеплителя из базальтового волокна связано с высокотемпературной обработкой сырья и переработкой расплава в волокно. Для производства утеплителей из пенополистиро-

ла и пенополиуретана применяются дорогостоящие и дефицитные компоненты. При использовании этих изделий требуется выполнить дополнительные мероприятия для соблюдения требований пожарной безопасности.

Для нужд широкого строительства требуются недорогие и недефицитные теплоизоляционные материалы. Такие материалы можно получить из фосфогипсовых отходов. Переработка фосфогипсовых отходов и получение из них кондиционной продукции будет способствовать решению экологических проблем и расширению сырьевой базы для производства строительных материалов.

В Межотраслевой научно-исследовательской лаборатории новых строительных материалов Белорусской государственной политехнической академии проведены исследования по разработке композиций и технологии производства газопоризованного фосфогипсового утеплителя на основе  $\alpha$ -вяжущего. Производство вяжущего  $\alpha$ -модификации Воскресенского ПО «Минудобрения» марки Г-10 В1, ГОСТ 125-79. Технические характеристики вяжущего: нормальная плотность – 32 %; сроки схватывания: начало – 35 мин., конец – 49.5 мин; предел прочности образцов в сухом состоянии: при сжатии – 29.4 МПа, при изгибе – 12.4 МПа; средняя плотность в сухом состоянии – 1670 кг/м<sup>3</sup>. Вяжущее характеризуется замедленными сроками схватывания и твердения, низкой водопотребностью и высокой плотностью. При длительном хранении (14 суток) в воздушно-сухих условиях образцы из этого вяжущего набирают высокую прочность – 29.4 МПа.

Опробованы различные виды газопорирующих добавок: сернокислый алюминий, серная кислота, алюминиевая пудра и др. Для повышения газоудерживающей способности фосфогипсовой смеси и регулирования процесса вспучивания использовали поверхностно-активные вещества: смолу древесную омыленную; сульфанол; смолу нейтрализованную воздухововлекающую и др. Для повышения устойчивости ячеистой структуры в начальный период гидратации газопоризованной фосфогипсовой смеси и ускорения ее схватывания использовали в качестве добавки быстросхватывающееся фосфогипсовое вяжущее Гомельского НТК «Вторресурс» марки Г-2 АП, имеющее сроки схватывания: начало – 2.5 мин, конец – 4.5 мин, нормальную плотность – 90 % и среднюю плотность образцов в сухом состоянии – 1050 кг/м<sup>3</sup>.

В опытах опробованы также другие виды добавок, оказывающие влияние на процесс поризации фосфогипсовой смеси: двуводный гипс, лигносульфонаты технические, поливинилацетная дисперсия и др.

Опыты показали, что при использовании серной кислоты в качестве газообразующей добавки фосфогипсовых смесей на основе  $\alpha$ -вяжущего можно получать образцы со средней плотностью  $700 \text{ кг/м}^3$  и выше. Изделия с такими показателями по плотности могут использоваться лишь в качестве конструкционно-теплоизоляционного материала. Процесс вспучивания фосфогипсовой смеси с добавкой серной кислоты протекает активно в течение первых 15–60 с, а затем объем вспученной смеси начинает активно уменьшаться. Это свидетельствует о том, что серную кислоту целесообразно применять для вспучивания смесей на основе быстрохватывающегося вяжущего, например фосфогипсового вяжущего Гомельского НТК «Вторресурс», которое начинает схватываться через 2.5 мин. Для медленно схватывающихся фосфогипсовых вяжущих  $\alpha$ -модификации эта газообразующая добавка малоэффективна.

Фосфогипсовые образцы, изготовленные с использованием в качестве газообразователя алюминиевую пудру, имели низкие показатели по прочности ( $0.05 \div 0.1 \text{ МПа}$ ). Материал с такими низкими прочностными характеристиками непригоден для применения в строительстве.

Наиболее рациональной газообразующей добавкой для вспучивания фосфогипсовых смесей на основе  $\alpha$ -вяжущего признана комплексная газообразующая добавка. Газопоризованные фосфогипсовые образцы, изготовленные с использованием этой добавки, имели среднюю плотность в сухом состоянии  $410..500 \text{ кг/м}^3$  (таблица 1). Поризованный материал с такими показателями по плотности может быть рекомендован для использования в строительстве в качестве утеплителя.

На экспериментальной базе БГА изготовлена и испытана опытная партия теплоизоляционных газифосфогипсовых плит. Определены оптимальные композиции и технологические параметры, позволяющие получить качественную продукцию со стабильными свойствами. Технологический процесс производства плит включает в себя подготовку исходного сырья, дозирование, предварительное смешивание компонентов, окончательное смешивание, формование изделий размером  $600 \times 400 \times 100 \text{ мм}$ , сушку и складирование готовой продукции. Особенность разработанной технологии состоит в том, что предусматривается раздельное перемешивание сухих компонентов, водных растворов газообразователя и пенообразующей добавки и кратковременное окончательное перемешивание всех компонентов. Это обеспечивает получение однородной газифосфогипсовой смеси с высоким коэффициентом вспучивания и устойчивости. Ис

Таблица 1

Физико-механические и теплотехнические показатели теплоизоляционных газосиликатных плит на основе  $\alpha$ -вяжущего

№ п/п	Состав, масс. %				Средняя плотность образцов в сухом со- стоянии	Предел прочности в сухом состоянии, МПа		Теплопровод- ность, Вт/(м·К)
	фосфогипсовое вяжущее $\alpha$ -модификации	комплексная га- зообразующая добавка	фосфогипсовое вя- жущее Гомельского НТК «Вторресурс»	Вода		при изгибе	при сжатии	
1	60.03	9.96	–	10.01	476	0.41	0.57	0.11
2	59.49	10.76	–	29.75	500	0.47	0.83	0.12
3	36.22	10.45	11.55	31.78	455	0.40	0.55	0.11
4	45.82	11.22	11.46	31.50	432	0.37	0.52	0.10
5	37.41	11.28	16.03	35.28	410	0.627	0.34	0.09

пытания готовых изделий показали, что они имеют среднюю плотность в сухом состоянии  $410 \div 455 \text{ кг/м}^3$  и теплопроводность  $0.09 \div 0.11 \text{ Вт(м·К)}$ . Изделия с такими показателями отвечают требованиям ГОСТ 16381-77 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные» и могут использоваться в качестве эффективного теплоизоляционного материала.

Предварительные технико-экономические расчеты показали, что себестоимость теплоизоляционных газифосфогипсовых плит на 30 % ниже себестоимости газосиликатных теплоизоляционных плит. Разработанная технология производства утеплителя позволяет получить недорогую и конкурентноспособную продукцию.

Для организации производства теплоизоляционных газифосфогипсовых плит разработана техническая и технологическая документация.

## **К ВОПРОСУ ОБ ОБОРУДОВАНИИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ БЕТОНА НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ**

Н.Л.Полейко, Р.Ф.Осос

Факультет дорожного строительства, БГПА

г. Минск, Беларусь

Показана не возможность применения бытовых морозильников для испытания бетона на морозостойкость. Установлены основные причины, по которым бытовые морозильники не обеспечивают требования стандарта на методы определения морозостойкости.

Ключевые слова: скорость замораживания, время цикла, температура.

Как известно, морозостойкость бетонов зависит от множества факторов. Среди этих факторов морозного разрушения немаловажное значение имеет методика определения морозостойкости бетона, т.е. скорость замораживания и оттаивания, продолжительность выдерживания при отрицательной температуре и т.д.

В настоящее время, все более широкое применения для испытания бетонов на морозостойкость находят бытовые морозильники, имеющие меньшую стоимости в сравнении с промышленными морозильными установками.

В работе авторы поднимают проблему возможности использования бытовых морозильников для испытания бетона. Согласно техническим данным морозиль-

ников, выпускаемых АО «АТЛАНТ» максимальная мощность замораживания составляет 20 кг материала в сутки, следовательно данные морозильники способны в сутки заморозить не более 20 кг бетона или 8 стандартных образцов-кубов с ребром 10 см. Согласно ГОСТ 10060.1-95 минимальное количество для испытания на морозостойкость составляет 18 шт, из них 6 контрольных и 12 основных, подвергаемых замораживанию. В стандарте, также регламентируется время проведения одного цикла испытаний, которое должно составлять не более 1 сут. Естественно, что при загрузке 12 образцов морозильник не сможет обеспечить достижение ни требуемой температуры в течении суток в рабочем объеме, ни скорости ее понижения. Кроме того, немаловажное значение имеет распределение температуры по объему камеры. Влияние данного фактора особенно опутимо при использовании бытовых морозильников поскольку в них, в отличии от промышленных установок, отсутствует принудительная вентиляция рабочего пространства камеры, что приводит к неравномерности охлаждения изделий, как по высоте морозильной камеры, так по ее длине и ширине. В частности после замера температуры по высоте камеры, разность температур составила 4 С, что уже не удовлетворяет требованиям стандарта (температура замораживания  $18 \pm 2$  С). Разность температур, замеренных в непосредственной близости от двери морозильника и противоположной стенки составила также 4 С.

Особое внимание следует уделить использованию морозильников для испытаний бетона по ускоренному методу при - 50 С. Согласно ГОСТ 10060.2-95 время охлаждения бетонных образцов от температуры - 10 С до температуры - 50 С должно составлять не более 2,5 часов. Такую скорость охлаждения бытовой морозильник обеспечить не в состоянии, в виду конструктивной особенности.

В виду того, что на заводах сборного железобетона номенклатура выпускаемых изделий составляет до нескольких десятков наименований, и испытания на морозостойкость проводятся раз в полгода, естественно, что загрузка камер при проведении испытаний осуществляется по максимальной вместимости морозильника. В данном случае, чтобы обеспечить достижение требуемой температуры в рабочем объеме камеры продолжительность одного цикла испытаний должна быть не менее 1 сут.

В заключение следует отметить, что основной причиной приведшей к использованию бытовых морозильников для испытания бетона на морозостойкость привело отсутствие в новом стандарте приложения по техническим характеристикам морозильных камер, используемых при проведении испытаний.

Из изложенного выше, можно сделать следующий вывод, что применяемые в настоящее время бытовые морозильники не пригодны для испытания бетона на морозостойкость по следующим основным причинам:

1. Не обеспечивается поддержание постоянной температуры по объему камеры.
2. Не обеспечивается требуемая скорость замораживания образцов.
3. Требуемое время проведения одного цикла испытаний не соответствует методике стандарта.

#### Литература

1. ГОСТ 10060.0-95 Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие требования.
2. ГОСТ 10060.1-95 Бетоны. Базовый метод определения морозостойкости.
3. ГОСТ 10060.2-95 Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости при многократном замораживании и оттаивании.
4. ГОСТ 10060-87 Бетоны. Методы контроля морозостойкости.
5. Руководство по эксплуатации морозильника МШ-154.

## **ОБЛЕГЧЕННЫЕ СТРОПОВОЧНЫЕ ПЕТЛИ ДЛЯ ПОДЪЕМА БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Н.А. Рак

Строительный факультет, БШПА

г. Минск, Беларусь

Рассмотрены результаты исследований облегченных строповочных петель, даны рекомендации по назначению массы изделия, приходящейся на одну петлю.

Ключевые слова: Стropовочные петли, бетонные и железобетонные изделия, монтаж, экспериментальные исследования, расчет, масса изделия, рекомендации.

### 1. Введение

Основным способом строповки бетонных и железобетонных изделий является захват за стальные петли, предварительно установленные в бетоне изделий. Расход стали на строповочные петли составляет 2-5 кг на м<sup>3</sup> бетона.

Одним из важнейших направлений снижения материалоемкости сборных железобетонных конструкций является уменьшение расхода стали на строповочные приспособления, необходимые только на стадии изготовления и монтажа.

Уменьшение диаметра сечения строповочных петель на один размер по сортаменту дает уменьшение расхода стали на них при сохранении других параметров петель (общей длины, длины заделки, величины заглубления и т.д.) на 25...40 %, что обеспечивает уменьшение общего расхода стали на изделие на 3...5 %.

## 2. Экспериментальные исследования

Согласно п.5.99 /3/ любые изменения конструкции петель должны быть обоснованы расчетом либо результатами специально проведенных исследований.

Исследование прочности строповочных петель диаметром 8, 10, 12, а также 6,5 мм с определением возможности повышения массы поднимаемых с их помощью железобетонных изделий были проведены Отраслевой научно исследовательской лабораторией строительных конструкций и кафедрой «Железобетонные и каменные конструкции» Белорусской государственной политехнической академии по заданию Предприятия «Центр научно-технических услуг в строительстве».

Для проведения испытаний были изготовлены опытные образцы железобетонных конструкций, в которых были размещены строповочные петли различных диаметров. Конструкция испытываемых петель отличалась от типовых петель только диаметром сечения петли. Испытания проводились при двух углах приложения нагрузки ( $45^\circ$  и  $90^\circ$ ) в следующей последовательности:

- пятикратный подъем нагрузки до величины трехкратной массы изделия, приходящейся на одну петлю;
- подъем нагрузки до разрушения петли.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что разрушение петель происходит в результате разрыва металла петли. Случаев выдергивания петель не зафиксировано т.е. анкеровка строповочной петли в бетоне оказалась надежной.

## 3. Предложения по определению допускаемой массы изделия

Первым этапом анализа результатов испытаний явилась статистическая обработка, которая производилась по отдельно каждому диаметру петель при ка-

ждом угле наклона. При обработке результатов испытаний при углах наклона  $45^\circ$  и  $90^\circ$  для неразрушенной петли принималась разрушающая нагрузка как для разрушенной петли. В результате обработки получены средние величины разрушающих нагрузок и коэффициенты их вариации.

Далее с использованием методов математической обработки результатов измерений были определены величины разрушающих нагрузок, гарантированные с обеспеченностью не ниже 95 %.

Полученные на первом этапе анализа данные показали, что коэффициент вариации разрушающих опытных нагрузок при угле наклона  $45^\circ$ , как правило, ниже, чем при угле  $90^\circ$ . При увеличении диаметра стержня разброс опытных значений нагрузок, характеризуемый коэффициентом вариации, значительно снижается.

На втором этапе анализа были определены величины коэффициента условий работы петли  $\gamma_p$ , равного отношению гарантированных с обеспеченностью 95 % разрушающих напряжений  $\sigma$  к фактическому физическому пределу текучести  $\sigma_y$  стали петель.

Проведенный анализ показал, что в предельном состоянии петли напряжения в ее металле могут быть как выше так и ниже предела текучести металла. Уровень напряжений в металле при достижении петель предельного состояния характеризуется коэффициентом условий ее работы, численно равным отношению напряжений в предельном состоянии петли к пределу текучести металла.

Величина коэффициента условий работы увеличивается с 0,7 для диаметра 6,5 мм до 1,1 для диаметра 12 мм.

Дальнейший анализ результатов испытаний был направлен на определение допускаемой на одну строповочную петлю массы изделия при угле наклона стропа  $45^\circ$ .

Допускаемая на одну строповочную петлю масса изделия  $M$  определялась при полученных опытных величинах коэффициента  $\gamma_p$  по формуле

$$M = \frac{R_{s,ser} A_s \gamma_p}{1.4 \gamma_a \gamma_{sd}}$$

где  $R_{s,ser}$  — расчетное сопротивление арматуры петли растяжению для предельных состояний второй группы принято равным 235 МПа по таблице 19 /2/;

$A_s$  — площадь сечения петли, определенная с учетом минусового допуска 0.5 мм по номинальному диаметру;

$\gamma_p$  – коэффициент условий работы строповочной петли, определенный опытным путем;

1,4 – коэффициент приведения нагрузки на петлю при угле наклона стропы  $45^\circ$  к массе изделия;

$\gamma_s$  – коэффициент надежности по материалу для стали принят равным 1,05 согласно таблице 21 /2/ для стали класса А-I;

$\gamma_f$  – коэффициент надежности по нагрузке принят согласно п.1.13 /3/ по таблице 1 /1/ равным 1,1;

$\gamma_d$  коэффициент динамичности к массе изделия, равный 1,4 согласно п.1.13. /2/.

Полученные по указанной выше формуле допустимая на одну петлю масса изделия оказалась равными 200, 375, 800 и 1175 кг, что выше допускаемой по /3/ на 25, 25, 14 и 7 % соответственно для диаметров 6,5, 8, 10 и 12 мм.

Указанные величины допускаемых нагрузок могут применяться для петель, в которых все остальные параметры петель (общая длины, длина заделки, величина заглабления, радиус закругления и т.д.) соответствуют петлям, имеющим больший на один типоразмер диаметр сечения по сортаменту, называемый базовым.

Повышенные величины допускаемых на одну строповочную петлю масс изделий можно применять только при гарантии пластических свойств стали петель. В связи с этим каждая партия стали, поступаемая на предприятие-изготовитель и предназначенная для изготовления строповочных петель, должна быть обязательно испытана на растяжение по ГОСТ 12004-81 и на загиб по ГОСТ 14019-80.

#### 4. Область и особенности применения облегченных петель

Учитывая повышенную ответственность работы строповочных петель, с целью обеспечения гарантий потребителя и осуществления должного контроля при переходе на уменьшенные диаметры петель было признано целесообразным разработать специальные "Рекомендации", в которых с учетом результатов проведенных экспериментальных исследований регламентировать порядок применения петель уменьшенного диаметра, предусмотрев, в том числе, проведение на предприятии-изготовителе соответствующих дополнительных организационных мероприятий.

Указанные выше "Рекомендации" разработаны кафедрой "Железобетонных конструкций" БГА и ЦНТУС и содержат указания по выбору облегченных строповочных петель, их испытанию и применению.

"Рекомендации" распространяются на петли бетонных и железобетонных изделий из тяжелого бетона объемной массой не менее  $2000 \text{ кг/м}^3$ , прочностью при первой строповке не менее 7 МПа.

Применение облегченных строповочных петель и использование настоящих "Рекомендаций" допускается только при консультации и с разрешения ЦНТУС.

«Рекомендациями» установлено, что массовому применению облегченных строповочных петель на предприятии-изготовителе бетонных и железобетонных изделий должно предшествовать проведение опытных подъемов не менее трех натуральных конструкций данной серии при соответствующем диаметре облегченных петель с передачей на петлю нагрузки, в три раза превышающей массу изделия, предусмотренную таблицей 1 на одну петлю.

Прочность бетона конструкций при опытных подъемах не должна превышать проектной отпускной прочности.

Испытания производятся при консультации и с участием разработчиков "Рекомендаций" с составлением по результатам испытаний соответствующих актов.

По результатам испытаний строповочных петель с участием разработчика "Рекомендаций" составляется акт, утверждаемый руководителем предприятия-изготовителя. На основании акта руководителем организации-изготовителя издается приказ о внедрении "Рекомендаций" с указанием срока действия, который не должен превышать 2 лет.

Применение строповочных петель должно сопровождаться периодическими испытаниями петель в объеме, предусмотренном в разделе «Испытания строповочных петель» «Рекомендаций». Периодичность проведения испытаний должна быть установлена в приказе о внедрении «Рекомендаций» в зависимости от объема внедрения, но не реже чем один раз в 12 мес.

Величины допускаемой на одну облегченную петлю массы стропуемого изделия могут быть откорректированы разработчиком «Рекомендаций» на основе опыта применения указанных петель при изготовлении сборных бетонных и железобетонных изделий на предприятиях-изготовителях.

## Литература

1. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. — 36 с.
2. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции/ Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. — 80 с.
3. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84)/ ЦНИИПромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. — 192 с.

**АДАПТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА  
АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ К НОВЫМ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ**

В.Н.Романюк, Я.Н.Ковалев

БГПА

г.Минск, Беларусь

Объект исследования. Ресурсосбережение в асфальтобетонном производстве Комитета по автомобильным дорогам Республики Беларусь.

Цель работы. Энергетический и эксергетический анализ асфальтобетонного производства. Оценка возможности увеличения термодинамической эффективности производства асфальтобетонной смеси и на ее основе снижение удельного расхода ресурсов.

Практическая ценность. Показана возможность снижения энергопотребления с нынешних  $5,6 \cdot 10^2$  МДж/т до  $1,2 \cdot 10^2$  МДж/т при потреблении энергии  $2,7 \cdot 10^2$  МДж/т на лучших заводах технически передовых стран. На базе полученных результатов ясны требования к вновь вводимым и реконструированным заводам.

Ресурсосбережение, система, термодинамический анализ, структура, энерготехнология.

Все существующие асфальтобетонные заводы (АБЗ) Республики Беларусь (РБ) спроектированы и введены в строй в период практически неограниченных поставок крайне дешевых энергоресурсов и такой же потребности в их продукции. Этими обстоятельствами объясняется то, что и структура, и технологический процесс, и оборудование АБЗ ориентированы на форсированный выпуск продукции, низкие капиталовложения за счет перерасхода энергоресурсов. И

поскольку 40% всех потерь закладываются на стадии эскизной проработки, 40% - на стадии проектирования и 20% приходится на эксплуатацию технической системы (ТС), понятна причина того, что энергопотребление на тонну асфальтобетонной смеси (АБС) на АБЗ Комитета по автомобильным дорогам (КАД) РБ составляет  $5,6 \cdot 10^2$  МДж, против  $2,7 \cdot 10^2$  -  $3,5 \cdot 10^2$  МДж, в зависимости от влажности минерального сырья в технически передовых странах. На АБЗ других ведомств ситуация осложняется еще большим износом оборудования и, если отличается, то в худшую сторону.

Нельзя не остановиться и на такой причине, как структура кадров специалистов АБЗ. Она находится в явном противоречии с характером производства. Последнее следует определить как теплотехнологическое, поскольку лишь 5-10% общего энергопотребления приходится на долю электроэнергии. Вместе с тем, ни на одном АБЗ РБ, ни в одной вышестоящей вертикали нет специалиста - промышленного теплоэнергетика. Это также сказалось на положении дел с энергопотреблением в производстве АБС.

Энергетическая составляющая себестоимости АБС оценивается в 20%, и это соответствует наиболее характерному положению дел в промышленности республики. Однако благодаря тому, что производство АБС является крупнотоннажным, его вклад в расходную часть энергобаланса РБ достаточно весом. При общем энергопотреблении  $6,7 \cdot 10^{14}$  кДж/год на долю АБЗ только КАД приходится  $1,0 \cdot 10^{12}$  кДж. Экстенсивное снижение энергопотребления отраслью неприемлемо, поскольку сегодня достигнут тот низший предел - 2,0 млн. тонн в год, позволяющий поддерживать дороги с твердым покрытием в нынешнем удовлетворительном состоянии. Пример Франции в 60-х годах показывает, к чему приводит на дорогах стратегия "ничего не делания" и какой перерасход средств требуется на исправление разрушенной дорожной сети. Нельзя забывать и той роли, которую призваны сыграть дороги РБ в экономике страны, учитывая ее геополитическое положение. Необходим поиск и реализация интенсивных путей снижения энергопотребления.

Из общего расхода энергии, связанного с асфальтобетонным покрытием, 2% приходится на укладку и укатку, 50-60% на доставку сырья и АБС, 50-40% на производство АБС. Доставка определяется типоразмерным рядом АБЗ, их сеткой на территории РБ и здесь не рассматривается. Остановимся на последней статье, непосредственно связанной с АБЗ.

Известны четыре основных пути энергосбережения: использование новых технологий; повышение к.п.д. отдельных агрегатов; использование вторичных энергоресурсов (ВЭР); рациональное построение теплоэнергетической системы (ТЭС) промпредприятия.

Несмотря на поиск новых технологий, в обозримом будущем технология использования горячей асфальтобетонной смеси останется основной в строительстве дорог с твердым покрытием. В этой связи актуальность энергетического аудита упомянутого производства очевидна.

Повысить к.п.д. основного теплотехнологического оборудования можно в связи с изменением концепции его использования. Энергетическая оптимизация линии подготовки минерального сырья позволяет получить до 20% экономии энергии. Еще 20-30% дает наведение элементарного порядка в работе линии подготовки битума. Ситуация с использованием битума наиболее тяжела. Ее характеризуют такие цифры: на подготовку тонны битума в США расходуется 8 МДж, в РБ - не менее  $7 \cdot 10^2$  МДж. Здесь, на взгляд авторов, требуется изменение подхода к процессу подготовки битума.

Основные резервы энергосбережения на АБЗ находятся на пути рационального построения их ТЭС. Этот путь на сегодняшний день практически не востребован и для АБЗ является "неподнятой целиной". Он связан с реструктуризацией схемы АБЗ, ведущей, с одной стороны, к повышению требований к квалификации персонала, с другой, - к упрощению производства АБС, повышению качества продукции, долговечности основного теплотехнологического оборудования. Снижение энергопотребления здесь достигается через повышение термодинамического совершенства схемы производства АБС. Последнее оценивается эксергетическим к.п.д. системы. Используемые в настоящее время технологии производства АБС характеризуются к.п.д. 4-7%. Для сравнения можно привести указанную величину для производства электроэнергии, где она составляет 24-48%.

Повысить эксергетический к.п.д. ТС и ее подсистем с учетом общих структурных связей на основе опыта применения эксергетического анализа можно, используя следующие принципы оптимизации систем: принцип интеграции (комбинирования), когда в одной ТС объединяются функции нескольких систем; принцип регенерации, предполагающий осуществление взаимодействия с обратными потоками; принцип снижения внешних потерь за счет использования отходящих потоков и принцип пересмотра параметров и состава входных потоков.

Объединение систем подготовки минеральных и битума, когда нагрев битума до температуры операции осуществляется за счет энергии перегретой песчано-гравийной смеси, не только улучшает энергетический и эксергетический показатели, но и существенно упрощает технологическую схему АБЗ за счет исключения из нее жаровых котлов - оборудования громоздкого и достаточно несовершенного. Кроме того, достигается повышение качества битума, поскольку исключается его контакт с перегретой поверхностью нагрева и также горячего битума с кислородом воздуха. Возможность получения в смесителе вспененного битума снижает потребность в последнем и повышает качество АБС.

Дальнейшее развитие энерготехнологии производства АБС неизбежно приводит к необходимости объединения с ним некой другой высокотемпературной технологии, характеризующейся высокими значениями эксергии побочных отходящих потоков. Последнее обусловлено тем, что технология АБЗ ограничивается температурами операций  $2,0 \cdot 10^2$  °С и использование первичной энергии топлива в ней объективно приводит к большим потерям эксергии.

Наиболее подходящим производством для объединения с производством АБС является получение электроэнергии. Оно легко вписывается в существующие компоновки АБЗ, несложен сбыт продукции, идеально стыкуется по параметрам связей с производством АБС. Возможно несколько схем интеграции, наиболее простая сводится к замене топки и камеры смешения газов, поступающих в сушильный барабан газотурбинной установки (ГТУ), производящей электроэнергию в количестве ~ 35%, оставшиеся 65% приходятся на отходящие дымовые газы (~ 55%) и прочие потери (~ 10%). Температура газов за ГТУ колеблется в диапазоне 400-600 °С, что соответствует реальным температурам сушильного агента на действующих АБЗ. Подобное комбинирование производства электроэнергии с другими технологическими процессами сегодня находит широкое применение в энергетике, химической промышленности, коммунальном хозяйстве и пр. Хорошо апробировано в передовых странах, что нашло отражение в гамме ГТУ, предлагаемых как Западными странами, так и Россией. Это решение отвечает конверсионным требованиям, сохраняя передовые технологии.

Непосредственно производству АБС оно дает увеличение эксергетического к.п.д. до 30%, а через него - снижение энергопотребления значительно ниже, чем  $2,7 \cdot 10^2$  МДж/т, - лучшего значения на АБЗ развитых стран, - и изменение представления о мобильности и автономности АБЗ. Последнее существенно изменит затраты на транспорт сырья на АБЗ и АБС до места укладки. Энерготех-

нология на АБЗ позволяет не только удовлетворить собственные нужды в электроэнергии, но и отпускать ее в энергосистему в количестве, определяемом совокупной мощностью 200 МВт для АБЗ Комитета по автомобильным дорогам РБ. Себестоимость электроэнергии соответствует расходу условного топлива 150 г/кВт · час при среднем расходе его в энергосистеме 310 г/кВт · час. Из других, более мелких эффектов, следует отметить снижение потерь в линиях электропередач и 10% - покрытие дневных пиков нагрузки энергосистемы.

Электроэнергия, характеризуемая расходом топлива 150 г/кВт · ч, по энергозатратам соответствует энергии теплоносителей от котельных, что позволяет отказаться от котельных на АБЗ за счет перехода на электронагрев. Этому способствует развитие основ его применения, проведенное в 70-е годы на ЭФ БГПА.

При другом принципе распределения затрат между электроэнергией и АБС, более понятном дорожникам, получаем такую картину. Удельное энергопотребление на производство АБС опускается до  $1,2 \cdot 10^2$  МДж/т при теоретически необходимой величине в раздельном производстве  $1,5 \cdot 10^2 - 2,0 \cdot 10^2$  МДж в зависимости от исходной влажности сырья.

Учитывая изложенное, а также необходимость замены парка АБЗ РБ, необходимо разработать комплекс требований к реконструкции АБЗ и к новым АБЗ с целью достижения качественно нового уровня энергоиспользования. Эта работа проводится под патронажем Комитета по автомобильным дорогам РБ. Вместе с тем, учитывая ее важность для отрасли, для энергетики и, следовательно, экономики РБ, необходима поддержка соответствующих государственных структур.

## **УПРОЧНЕНИЕ ГРУНТОВ ВО ВРЕМЕНИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗКИ ОТ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

В.Е.Сеськов, А.Н.Савинов

Отдел "Оснований и фундаментов", БелНИИС

г.Минск, Беларусь

В статье изложена методика и результаты лабораторных и полевых исследований по упрочнению грунтов при длительно действующих нагрузках. Полученные результаты следует учитывать при реконструкции и модернизации старых зданий и сооружений.

Ключевые слова: реконструкция, грунт, методика, упрочнение, исследование, несущая способность, физико-механические характеристики, предварительное уплотнение.

Несмотря на большой опыт реконструкции зданий, устройству мансард, надстройки дополнительных этажей, в настоящее время не существует республиканских норм и правил по проектированию оснований и фундаментов при реконструкции зданий. При реконструкции, как правило, возрастают нагрузки на фундаменты, а это требует увеличения их размеров. Однако анализ результатов лабораторных исследований выполненный авторами и материалов, приведенных в различных литературных источниках [1-4], свидетельствуют, что строительные свойства грунтов в большинстве основных случаев улучшаются. Это позволяет назначать повышенные по сравнению с расчетным (по СНиП) давлением, что в свою очередь позволяет уменьшать затраты на проведение строительных работ при реконструкции.

В БелНИИС были проведены исследования по изучению изменения физико-механических характеристик грунта во времени. Исследования проводились как в лабораторных, так и в натуральных условиях.

#### Методика исследований

Методика исследований упрочнения грунта во времени под нагрузкой в малом грунтовом лотке заключалась в следующем. На песчаный грунт влажностью 5-7% и с коэффициентом уплотнения  $K_{упл} = 0.93$  передавалась нагрузка со средним давлением  $P = 0.2$  МПа.

Замерялись деформации грунта и изменение его плотности при длительном действии нагрузки. Измерение деформаций проводились с интервалом: 15 сек., 30 сек., 20 мин., 30 мин., 1 час, 2 часа - в первый день нагружения и далее 1 раз каждый день в течение 2-х месяцев. Далее 4 раза в месяц. Измерение плотности производилось: в первый день после приложения нагрузки, далее - через неделю, месяц и два месяца. Плотность грунта в лотке определялась микропенетрометром МВ-2.

Методика лабораторных исследований изменения прочностных характеристик состояла в следующем.

Таблица 1

## Результаты обследования грунтов оснований существующих зданий

Наименование объекта	Время, t, год	Вид грунта основания	Физико-механические характеристики						Изменение физико- механических характеристик, %		
			до строительства			в момент обследования					
			φ, град. д.	с, МПа	Е, МПа	φ, град.	с, МПа	Е, МПа	φ	с	Е
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
80 кв. жил. дом по ул.Ибаррури 28,30 в г. Борисове	6	пески мелкие	33	0.0025	21	36	0.0025	36	9	0	71
Здание Белвнешэкономбанка по ул. Мясникова в г.Минске	18	супесь моренная	29	0.0075	25	29	0.0057	40	0	0	60
Водонапорная башня животноводческого Комплекса племсовхоза "Писаревщина" Могилевского р-на	1	супесь пластичная лессовидная	26	0.015	10	26.1	0.023	12	0	53	20
Жилой дом в д.Капочи Могилевского р-на	1	супесь пластичная лессовидная	26	0.015	10	26.6	0.019	10	2	27	0
Жил.дом №3 в м-не №17 в г.Гомеле	8	пески ср. крупности (намывные)	35	0.003	32	35	0.0055	33	0	80	3
Жил.дом по ул.Жарковского в г.Гомеле	40	супесь твердая супесь пластичная	27	0.042	37	29	0.057	45	7	36	22
			27	0.033	21	28	0.040	25	4	21	19

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Жил. дом по ул. 8-я Иногород- няя в г.Гомеле	5	суглинок туго- пласт.	23	0.026	22	27.5	0.025	28	20	-4	27
		Супесь твердая	23	0.040	17	24	0.050	18	4	25	6
Общежитие в г.Речица	35	песок пылева- тый	30	0.004	24	31	0.0043	30	3	7	25
		супесь моренная пластичная	29	0.030	22	31	0.045	31	7	50	41
		супесь моренная твердая	28	0.048	35	29	0.056	43	4	17	23
Жил.дом по ул Радости в г.Гомеле	34	песок пылева- тый	27	0.002	24	21	0.003	29	15	50	21
		песок мелкий	30	0.002	28	32	0.0025	35	7	25	25

Образцы грунта влажностью 5-7% уплотнялись на приборе стандартного уплотнения до коэффициента уплотнения 0.92, затем обжимались на приборе предварительного уплотнения при нагрузке 0.3 МПа. Далее эти образцы подвергались испытаниям на срез в приборе ГПП-30 в течение: первого дня загрузки, через 7 дней после загрузки, через 2 месяца, через 3 месяца, через 6 месяцев, через 1 год.

Задачей натурных испытаний являлась проверка правильности лабораторных и корректировка их результатов, а также уточнении расчетных характеристик метода "прогнозирование упрочнения грунта" во времени под нагрузкой.

Методика исследований заключалась в прямом определении характеристик оснований под фундаментами реальных зданий методами статической пенетрации грунтов, динамического зондирования и ультразвукового метода. Для определения степени уплотнения, а также прочностных и деформативных свойств грунтов использована модель ручного пенетрометра с конусным наконечником, ультразвуковой прибор УК-14ПМ и малый зонд плотномер.

#### Результаты исследований

Опыт обследования оснований реконструируемых жилых и общественных зданий, анализ результатов лабораторных исследований и материалов, приведенных в различных литературных источниках [1-4], свидетельствуют, что наибольшее влияние на увеличение несущей способности оснований длительно эксплуатируемых зданий оказывает изменение механических характеристик грунта оснований.

Результаты обследования оснований существующих зданий приведены в табл.1. Из анализа данных величин следует, что при постоянном аэрационном режиме эксплуатации зданий удельное сцепление в глинистых грунтах возрастает до 50%, в песчаных грунтах, в зависимости от крупности, до 30%. Угол внутреннего трения грунта в основании длительно эксплуатируемых при различных нагрузках зданий практически не меняется. Следует отметить, что в песчаных грунтах значительно возрастает модуль деформации до 40%, в глинистых менее - до 30%.

Анализ результатов лабораторных исследований проведенных на сдвиговых приборах марки ГПП-30 подтверждает выводы сделанные при обследовании грунтов оснований существующих зданий. Так по результатам, приведенным в табл. 2 видно, что угол внутреннего трения в супеси моренной и в песках средней крупности не изменяется от длительности действия нагрузки, в то вре-

мя как удельное сцепление в глинистых грунтах возрастает на 80%, в песчаных на 75. Данное явление можно объяснить тем, что на свойство грунтов под действием нагрузки начинают оказывать влияние процессы упрочнения, роль которых со временем все более увеличивается. Возникновение и рост структурных связей объясняется физико-механическими процессами взаимодействия между частицами. Исследования показали, что упрочнение песков возможно в следствие слипания кремнегелевых пленок, а также участия в процессе упрочнения железистых, глинистых и других соединений.

Таблица 2

## Результаты лабораторных исследований образцов грунтов

Вид грунта	Время выдерживания образца под нагрузкой, t, час	Сдвигающие усилия, кг/см <sup>2</sup>			tgφ	Угол внутреннего трения, φ, град.	Удельное сцепление, С, МПа
		τ <sub>1</sub>	τ <sub>2</sub>	τ <sub>3</sub>			
супесь моренная	1	3.1	6.3	8.0	0.525	28	0.0225
	24	3.2	6.0	8.0	0.538	28	0.0233
	720	3.4	6.2	8.2	0.533	28	0.0283
	4464	3.9	6.5	8.3	0.478	28	0.0450
Песок средней крупности	1	2.8	5.7	8.3	0.6875	35	0.0025
	24	3.0	5.8	8.7	0.7125	35	0.0033
	722	3.1	5.9	8.8	0.7125	35	0.0058
	4460	3.1	5.9	8.9	0.7125	35	0.0060

Кроме того видно, что упрочнение песчаных грунтов происходит во времени быстрее, чем в глинистых. Это объясняется тем, что в грунтах действуют капиллярные силы, которые возникают в частично заполненных водой мелких пустотах (порах) и связывают частицы между собой упругими связями. В результате создается так называемое кажущееся сцепление, которое тем сильнее, чем меньше размер частиц. В глинистых грунтах, кроме кажущегося сцепления, существует значительное реальное сцепление. Оно обусловлено молекулярными силами, действующими между очень мелкими частицами (<0.01 мм).

Из данных исследований видно, что прочность песков различной крупности находящихся под нагрузкой до 1 года различается, в то время как после одного года она практически для всех видов песков одинакова, т.е. процесс упрочнения песков после одного года можно считать завершившимся.

В глинистых грунтах процесс упрочнения можно считать завершившимся после пяти и более лет службы сооружений, в зависимости от вида и состояния грунта.

### Выводы

При длительном нагружении эксплуатационной нагрузкой песчаных и глинистых грунтов и отсутствии за время эксплуатации суффозионных явлений, недопустимых вибродинамических воздействий на эти грунты, а также каких-либо нарушений целостности их массива ниже подошвы фундаментов зданий, как правило, происходит улучшение свойств грунта с повышением их несущей способности. Это обстоятельство необходимо учитывать при реконструкции зданий для снижения затрат на строительные работы.

### Литература

1. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. - М.:Стройиздат., 1980. 134 стр.
2. Дворкин Ю.И. О назначении давления на песчаные основания при реконструкции зданий. - Основания , фундаменты и механика грунтов. 1982. №4 стр.23-24.
3. Коновалов П.А. К вопросу о допускаемом давлении на грунты оснований, обжатых длительно действующей нагрузкой. - Труды ВНИПИ и КТИ оснований и подземных сооружений имени Н.М.Герсеванова, выпуск 90. 1988.
4. Свайные фундаменты и заглубленные сооружения при реконструкции действующих предприятий/ Е.М.Перлей, В.Ф.Раюк, В.В.Беленькая, А.Н.Алмазов. - Л.: Стройиздат. 1989. 176 стр.

## **ВЫБОР СХЕМЫ ОПТИМАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫСОТЫ СООРУЖЕНИЯ**

Н.В.Синякина

Строительный факультет, БПИ

г.Брест Беларусь

Выполнены исследования геометрических условий определения высоты сооружения и даются рекомендации по выбору оптимальных схем измерений геодезическими методами.

При высокоточных определениях высоты сооружений башенного типа или передачи на них отметок широко применяется технический теодолит, который имеется во всех строительных организациях. Данные об оптимальных геометрических условиях при решении практической части этой задачи изучен не достаточно. Иногда рекомендуется устанавливать теодолит на расстоянии  $S$  не менее 1.5-2.0 высоты самого сооружения. Теоретически это не обосновывается. Рассмотрим вопрос более детально.

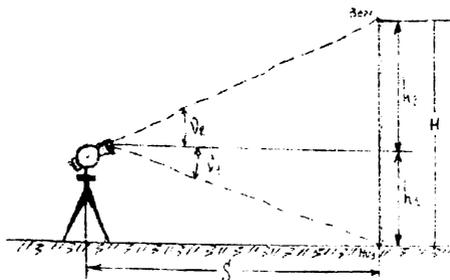


Рис. 2

Для тривиальной схемы измерений, приведенной на рисунке 1, высота сооружения  $H$  вычисляют по следующей формуле:

$$H = S \cdot (\operatorname{tg} V_1 + \operatorname{tg} V_2). \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что

$$m_H^2 = (\operatorname{tg} V_1 + \operatorname{tg} V_2)^2 \cdot m_s^2 + \frac{S^2 \cdot m_v^2}{\rho^2} \cdot \left( \frac{1}{\cos^4 V_1} + \frac{1}{\cos^4 V_2} \right). \quad (2)$$

Выразим значение  $\operatorname{tg} V$  и  $\cos V$ , входящие в правую часть формулы (2), через величины  $H$  и  $S$ . Приняв в качестве независимой переменной расстояние от теодолита до сооружения и проведя исследование на минимум, получим

$$S_0 = \sqrt[4]{\frac{H^2 \cdot \rho^2 \cdot m_s^2 + (h_1^4 + h_2^4) \cdot m_v^2}{2 \cdot m_v^2}}, \quad (3)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  - высота от горизонта теодолита соответственно до нижней и верхней точек сооружения.

Если горизонт теодолита расположен между точками "Верх" и "Низ" сооружения, то  $|h_1 + h_2| = H$ , если ниже точки "Низ" или выше точки "Верх", то  $|h_1 + h_2| > H$ . Это следует иметь в виду при вычислениях по формуле (3).

Исследуя левую часть формулы (3) на предел сначала при  $m \rightarrow 0$ , затем при  $m_v \rightarrow 0$ , можно заметить, что для схемы измерений, приведенной на рис.1, всегда  $0,5 H \leq S_0 \leq D$ .

На строительных и монтажных площадках теодолит приходится устанавливать на разных отметках, т.е. перемещать его по высоте. В такой связи рассмотрим, существует ли в пределах диапазона высоты сооружения такая точка, в которой ошибка  $m_n$  будет минимальной.

Принимая в качестве независимой переменной величину  $h_1$  и исследуя при этом условия правую часть формулы (2) на  $\min$ , находим  $h_1 = 0,5H$ . Таким образом, оптимальная точка располагается на горизонтальной линии, которая делит высоту сооружения пополам, значит, углы  $V_1$  и  $V_2$  должны быть одинаковые. Горизонтальное расстояние  $S_0$  от сооружения до этой точки может быть вычислено по формуле (3), в которой принимается  $h_1 = h_2 = 0,5H$ .

Расчетная точка, в которой должен быть установлен теодолит, не всегда может быть удобной или доступной для измерений. В связи с этим выясним, в какой мере на ошибку  $m_n$  будут влиять случайные или вынужденные отклонения действительных расстояний  $S$  от сооружения до теодолита от их предвычисленных значений  $S_0$ . По результатам геодезической практики студентов строительного факультета проанализирована интенсивность изменения ошибки  $m_n$ . С этой целью проведен сравнительный анализ формулы (2). Приняты следующие исходные данные:

$$\begin{aligned} H &= 1; \\ 0,5S_0 &\leq S_i \leq 2S_0; \\ 0 &\leq h_1 \leq 0,5H; \\ 0,0001H &\leq M_s \leq 0,01H; \\ 1'' &\leq M_v \leq 60''. \end{aligned}$$

Соотношение между  $m_s$  и  $m_v$  выразим коэффициентом

$$K = M_s \rho / (m_v H). \quad (4)$$

Измерения геодезисты проводят так, чтобы между линейными и угловыми измерениями соблюдалось приблизительное точное соответствие т.е.  $K \approx 1$ . Для таких условий  $\delta m_n \approx 30\%$ . Тогда такой ошибкой можно пренебречь.

Наибольшее влияние на ошибку  $m_n$  оказывает перемещение теодолита по высоте при небольших расстояниях до сооружения. По мере увеличения расстояния влияние рассматриваемого фактора уменьшается, а при  $S_i = D$  стано-

вится равным нулю. Таким образом, в большинстве случаев перемещение теодолита по высоте приводит к небольшому изменению ошибки  $m_n$  и лишь при  $k \leq 1$  оно может достигать  $60 \div 70\%$ .

Следует заметить, что утверждение справедливо при условии  $|h_1 + h_2| = H$ . При расположении горизонта теодолита ниже основания сооружения или выше его вершины влияние данного фактора на  $m_n$  возрастает, а при  $|h_1 + h_2| > H$  оно может стать определяющим. Формула (3) основана на принципе наименьших квадратов. Предложив в основу подобного расчета метод максимальных ошибок [1], аналогичным путем получим формулу для расчета оптимальных расстояний от сооружения до теодолита совсем в простом виде,

$$S'_0 = \sqrt{\frac{H \cdot \rho \cdot m_s + (h_1^2 + h_2^2) \cdot m_v}{2 \cdot m_v}}. \quad (3')$$

Сравнительный анализ формул (3) и (3') показал, что расстояние  $S_0$  и  $S'_0$  почти одинаковые, а относительная разность между ними при реальных значениях ошибок  $m_s$  и  $m_v$ , и любых их соотношениях не более 15%. Выше было показано, что такие отклонения расстояний от оптимальных значений приводят к весьма незначительным дополнительным ошибкам определения высоты сооружения. Поэтому на практике вместо строгой формулы (3) можно пользоваться приближенной формулой (3').

На основании выполненных исследований можно заключить следующее. Оптимальное расстояние от сооружения до теодолита зависит от соотношения между ошибками линейных и угловых измерений, представленными коэффициентом  $K$ . При заданных ошибках  $m_s$  и  $m_v$  оптимальное расстояние  $S_0$  может быть вычислено по строгой формуле (3), а с достаточной для практики точностью по приближенной формуле (3').

При  $1 \leq K \leq 15$  теодолит можно устанавливать от сооружения на расстоянии примерно  $2H$ . При этом высота сооружения будет определена с точностью, близкой к оптимальной.

С целью надежного и независимого контроля измерений их следует выполнять не менее чем с двух точек наблюдения.

#### Литература:

1. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М., Наука. 1970г., с.41

## ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ И ВОДОСТОЙКОСТИ МАГНЕЗИАЛЬНОГО ЦЕМЕНТА ОТ СПОСОБОВ УПЛОТНЕНИЯ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ

Н.С.Ступень, Б.С.Шевченко  
Биологический факультет, БрГУ  
Брест, Беларусь

В статье рассмотрены аспекты различных способов уплотнения формовочных смесей на основе магнезиального цемента. Прессование рассматривается как один из способов повышения прочности и водостойкости изделий из каустического магнезита. Прессование позволяет избежать появления высолов на поверхности изделий за счет уменьшения количества затворяющего раствора, а также улучшить поровую структуру магнезиального цемента, что способствует повышению прочности и водостойкости изделий. Прессованные изделия на основе магнезиального цемента обладают значительной прочностью, водостойкостью и высокими декоративными качествами.

Ключевые слова: каустический магнезит, микрокремнезем, бишофит, литье, вибрирование, прессование, оксихлориды магния, гидросиликаты магния из грушсы сепиолита и серпентина, контактно-конденсационное твердение.

Среди многочисленных способов уплотнения строительных смесей литье, вибрирование и прессование являются наиболее распространенными. В производстве изделий на основе каустического магнезита и доломита более распространенными являются литье и вибрирование. Прессование давлением 10-15 МПа применяют в производстве ксилолитовых и фибролитовых плит. Невысокое давление прессования в данном случае объясняется деформационными особенностями заполнителей - древесных опилок, стружек и волокон.

Как известно, магнезиальный цемент быстро твердеет, отличается высокой прочностью, способностью связывать органические и неорганические заполнители. Изделия из него имеют высокие декоративные качества, но характеризуются низкой водостойкостью. Анализ литературных данных показал, что все многообразные способы повышения водостойкости строительных изделий на основе магнезиального цемента реализуются путем защиты изделий от увлажнения, либо путем повышения водостойкости изделий за счет увеличения водостойкости вяжущих, модифицируя их различными гидравлическими добавками. Но наличие среди продуктов твердения труднорастворимых соединений не в

полной мере устраняет причину низкой водостойкости магнезиального цемента. В присутствии хлорид - ионов гидроксид и оксихлориды магния (продукты твердения магнезиального цемента) обладают повышенной растворимостью [1]. Кроме этого, одной из проблем получения качественных изделий из магнезиального цемента является устранение высолов на их поверхности, появление которых также связано с избыточной концентрацией хлорид - ионов при использовании магнезиальных вяжущих в литых или вибрированных смесях. Однако уменьшение количественного содержания хлорид-ионов путем снижения концентрации хлорида магния в растворе затворения приводит к снижению прочности и водостойкости изделий. Это связано с тем, что для обеспечения нормального твердения каустического магнезита необходима концентрация  $MgCl_2$  в растворе затворения не менее 15%. Если эту концентрацию сохранить и одновременно уменьшить количество раствора хлорида магния в смеси, растворимость гидроксида и оксихлоридов магния, а также возможность образования высолов уменьшается. Однако снижение содержания жидкости в формовочной смеси обуславливает ухудшение ее удобоукладываемости и необходимость применения более интенсивных способов уплотнения, в частности, прессования. В этом случае представляется возможным уменьшить содержание затворителя, с одной стороны, а с другой - увеличить плотность материала, что должно положительно сказаться на его прочности и водостойкости.

С целью оценки эффективности различных способов уплотнения формовочных смесей была выполнена серия экспериментов, в которой образцы изготавливали литьем вибрированием и прессованием различным по величине давлениями. В качестве вяжущего использовали каустический магнезит марки ГМК-75 Саткинского завода (Челябинской области).

Дозируемое количество бишофита подбирали в каждом отдельном случае в зависимости от способа уплотнения формовочной смеси. Подвижность литой смеси соответствовала нормальной консистенции по Вика. Вибрируемые смеси имели такое водосодержание, чтобы при принятом времени уплотнении (1 и 3 мин.) они не расслаивались. Влажность прессуемых смесей подбирали такой, чтобы при соответствующем давлении не происходило отжатие воды. Давление прессования изменяли в диапазоне от 10 до 60 МПа, с интервалом 10 МПа.

После 28 суток твердения в естественных условиях определяли прочность при сжатии образцов в сухом и водонасыщенном состоянии.

Результаты эксперимента показали, что уплотнение смесей из магнезиального цемента вибрированием по сравнению с литьем приводит к незначительному снижению прочности образцов в сухом и водонасыщенном состояниях (с 38 МПа до 26 МПа в сухом и с 21 до 14 МПа в водонасыщенном состоянии). Коэффициент размягчения при этом практически остается неизменным. При переходе к прессованию прочность при сжатии повышается и при давлении прессования 40 МПа достигает 42 МПа в сухом и 25 МПа в водонасыщенном состояниях. При увеличении давления прессования прочность и водостойкость магнезиального цемента уменьшаются. Такое изменение свойств магнезиального цемента связано с изменением величины соотношения  $MgCl_2/MgO$ . При переходе от литья к уплотнению формовочных смесей вибрированием наблюдается снижение величины  $MgCl_2/MgO$  от 0,25 при литье до 0,15 при вибрировании. Это обуславливает образование плохо закристаллизованных оксихлоридов, что отрицательно сказывается на прочности и водостойкости затвердевшего камня [2]. Эти выводы подтверждаются комплексными физико-химическими методами исследования. На рентгенограммах образцов, изготовленных вибрированием видны размытые пики небольшой интенсивности с  $d/n=3.88; 2.88; 2.72; 2.39 \text{ \AA}$ , что соответствует оксихлоридам типа  $3MgO \cdot MgCl_2 \cdot 11H_2O$  и  $5MgO \cdot MgCl_2 \cdot 13H_2O$ . Наблюдается преобладание аморфной и мелкокристаллической фазы.

Прессование позволяет получить более плотную мелкокристаллическую структуру материала, поэтому несмотря на дальнейшее уменьшение соотношения  $MgCl_2/MgO$ , прочность и водостойкость увеличивается (на рентгенограммах явное преобладание кристаллической фазы).

При стабилизации соотношения  $MgCl_2/MgO$ , можно более наглядно проследить зависимость свойств магнезиального цемента от содержания жидкой фазы формовочных смесей, а соответственно и от способа уплотнения. Для этого формовочные смеси затворяли бишофитом разной плотности (концентрации), сохраняя при этом постоянным соотношение  $MgCl_2/MgO$ , равным 0,072. Это то минимальное содержание хлорид-ионов, которое необходимо для обеспечения твердения магнезиального цемента с образованием оксихлоридов магния.

Анализ результатов эксперимента показал, что литые образцы при принятом соотношении  $MgCl_2/MgO$  обладают малой прочностью в сухом и водонасыщенном состояниях, очень низким коэффициентом размягчения - 0,48. При вибрировании смеси наблюдается незначительное улучшение свойств. Дальнейшее улучшение свойств наблюдается при прессовании смесей под давлени-

ем 10-40 МПа. При увеличении давления прессования до 60 МПа прочность образцов снижается, хотя коэффициент размягчения продолжает возрастать. Снижение прочности у сухих и водонасыщенных образцов, по-видимому, связано с явлением так называемой «перепрессовки» материала. Вероятно, при повышении давления происходит отжатие пленочной воды в поровое пространство. Избыточное давление приводит к состоянию системы, когда все поровое пространство заполняется водой. При этом дальнейшее сжатие системы сводится к упругой обратимой деформации частиц. Кроме этого, по мере уменьшения объема пор возрастает количество «запрессованного» воздуха, за счет заполнения водой воздухопроводящих каналов. Все эти процессы нарушают структурообразование, что ведет к ухудшению свойств затвердевшего цементного камня.

Выигрыш в прочности и водостойкости при переходе от литья к прессованию опцутим на образцах из магнезиального цемента, модифицированного микрокремнеземом (10% по массе).

На рентгенограммах прессованных образцов появляются рефлексы с  $d/n=4.53; 2.14 \text{ \AA}$  и с  $d/n=9.85; 4.31; 3.86; 2.58 \text{ \AA}$ , что соответствует гидросиликатам типа серпентина и сепиолита, которые придают материалу водостойкость. Кроме гидросиликатов магнезия удалось идентифицировать хорошо закристаллизованные оксихлориды магнезия типа  $3\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$  ( $d/n=3.88; 2.88 \text{ \AA}$ ) и  $5\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$  ( $d/n=2.72; 2.39 \text{ \AA}$ ). Данные рентгенофазового анализа согласуются с данными дифференциально-термического исследования. Эндотермические эффекты в области температур 90-220 относятся к дегидратации и частичному разложению выше названных оксихлоридов. Слабые экзотермические эффекты при 720-740 С и 840-860 С свидетельствуют о присутствии в системе сепиолита, который в температурном интервале 720-860 С превращается в хризотил. Рентгенофазовый и термический анализ образцов, изготовленных литьем показал отсутствие закристаллизованных гидросиликатов магнезия. Мелкокристаллическая фаза представлена лишь гидроксидом и гидроксохлоридом магнезия.

Тонкодисперсный микрокремнезем при прессовании способствует формированию более плотной упаковки материала, при этом увеличивается суммарная контактная поверхность, что обуславливает повышение прочности и водостойкости. Можно предположить, что уплотнение формовочных смесей прессованием создает предпосылки для контактно-конденсационного твердения [3], способствующего возникновению истинных фазовых контактов.

«Спекание частиц» может происходить как за счет самодиффузии гидратированных частиц в местах контакта, так и за счет растворения кристаллов в жидкой фазе и кристаллизации их в местах контакта. Такой тип твердения а сочетании с гидратационным твердением обеспечивает повышение прочности. Контактно-конденсационное твердение в большей степени характерно для вяжущего с добавкой микрокремнезема чем для чистой магнезиального цемента. Это связано с тем, что тонкодисперсные системы обладают избыточной поверхностной энергией, для них характерно самопроизвольное образование пространственных структур, что является одним из факторов улучшения структурно-механических свойств материала.

При переходе от литья к прессованию в значительной степени увеличивается показатель однородности пор и уменьшается показатель среднего размера пор.

При прессовании уменьшается содержание свободного хлорида магния в магнезиальном цементе, что приводит к повышению водостойкости за счет понижения растворимости, образующихся гидроксида и оксихлоридов магния. Уменьшение расхода затворителя исключает появлением высолов на поверхности изделий делает смеси более экономичными. Рациональная величина прес-сующих давлений находятся в области 30-50 Мпа. Такое давление прессования применимо и при изготовлении изделий из мелкозернистых бетонов на основе магнезиального цемента.

#### Литература

1. Сегалова Е.Е., Ребиндер П.А. Современные физико-химические представления о процессах твердения минеральных вяжущих веществ //Строительные материалы, М.- 1960.№1.-С.21-28.
2. Логвиненко А.Г. Образование оксихлоридов магния.- М.: Химия, 1968.
3. Вайвад А.Я. Магнезиальные вяжущие вещества.- Рига: Зинатне 1971.-331с.

## ТЕХНОЛОГИЯ НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА

А.С.Сушкевич

Лаборатория технологии модифицированного бетона, БелНИИС.

И.И.Тулупов,

Строительный факультет, БГПА

Минск, Беларусь

В статье представлены результаты научных исследований и опытно-промышленной апробации технологии получения неавтоклавных пенобетонов плотностью  $4001000 \text{ кг/м}^3$ .

Ключевые слова: неавтоклавный пенобетон, пенообразователь, химические модификаторы, стойкость пены, кратность пены.

В условиях экономического кризиса важное значение имеет внедрение прогрессивных технологий производства строительных изделий и конструкций. Мировая практика показала высокую техническую и экономическую эффективность ячеистых бетонов. Объемы их производства и применения целесообразно значительно увеличить.

В настоящее время в Республике Беларусь изготовление изделий из ячеистого бетона осуществляется, в основном, по автоклавной технологии, которая требует больших затрат энергии. Удельный расход пара в автоклаве составляет  $300\text{--}400 \text{ кг/м}^3$ , расход электроэнергии на домол заполнителей –  $40\text{--}50 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$ , что соответствует около 53 кг условного топлива.

В этой связи несомненный интерес представляют неавтоклавные пенобетоны, способные набирать прочность как в условиях обычной термообработки, так и в естественных условиях, а самой технологией не предъявляются столь высокие требования к компонентам бетона, допускается применение более грубодисперсного (не тонкого помола) заполнителя по сравнению с автоклавными бетонами. Таким образом, наряду с существенной экономией тепловой энергии, неавтоклавные пенобетоны более технологичны. Кроме того, сама по себе пенная технология и пенобетоны обладают рядом преимуществ по сравнению с газобетонами.

Ячеистая структура пенобетона формируется в более благоприятных условиях, в связи с чем она качественнее по сравнению с газобетоном: поры меньшего размера, отсутствуют контактные дырки и трещины в перегородках, поверхность пор плотная и гладкая.

К преимуществам пенной технологии относится возможность направленно регулировать объем и характер пористой структуры материала. Это достигается регулированием расхода ПАВ, изменением частоты вращения смесительного вала, применением мешалок с несколькими смесительными валами и другими гидродинамическими параметрами перемешивания [1].

Следовательно, получение ячеистой структуры бетона с помощью пенообразователей, является более технологичным и рациональным, чем за счет применения газообразователей.

В то же время технология изготовления пенобетонов не лишена недостатков. При смешивании пены с бетонной смесью происходит механическое разрушение части пены. Чтобы предотвратить это разрушение используют смеси с высоким водотвердым отношением (В/Т), однако это решение приводит к перерасходу материалов и ухудшению качества готовой продукции (усадка).

Разработки последних лет избавляют технологию получения пенобетонов от этих недостатков, например, использование новых пенообразователей (НЕОПОР, КОНФОАМ и др.), гарантирующих значительную пенообразующую способность и стабильность получаемых пен, технологии, основанные на применении метода сухой минерализации пены.

Лабораторией технологии модифицированного бетона совместно с ЗАО "Завод Промстройиндустрия" Производственной ассоциации "Белстройиндустрия" проведен комплекс работ по разработке и опытно-промышленной апробации технологии получения неавтоклавных пенобетонов.

Основными задачами исследований являлись:

- разработка оптимальных составов композиций для пенобетонов различной плотности (от 400 до 1000 кг/м<sup>3</sup>), обеспечивающих прочность при сжатии от 1,0 до 8,0 МПа;
- исследование эффективности использования отходов промышленных производств и попутных продуктов в качестве тонкодисперсного заполнителя и химических модификаторов бетона;
- обеспечение набора прочности и получения изделий без применения тепловой обработки;

Для разработки оптимальных составов пенобетонов потребовалось проведение экспериментальных исследований по изучению влияния на свойства бетона:

- содержания цемента;

- вида, содержания кремнеземистого компонента и соотношения "цемент: кремнеземистый компонент";
- водотвердого отношения;
- вида и содержания химических добавок - модификаторов;
- вида пенообразователя и его характеристик, обеспечивающих получение пены с требуемыми свойствами.

Изучение влияния вышеупомянутых факторов осуществляли в лабораторных условиях на смесителе объемом 25 л с частотой вращения смесительного вала 45 об/мин. и пеногенераторе рамочного типа объемом 35 л с числом оборотов рамки 350 об/мин.

В экспериментах использовали портландцемент ПЦ 400–Д0 и ПЦ 500- Д20 ПО "Волковыскцементношифер" с  $K_{нг}=0,28$  и три вида кремнеземистого компонента – Заславский песок с  $M_{кр}=2,2$ , молотый шлак БМЗ ТУоп РБ-05891370-34-94 с  $\rho_o^н=880 \text{ кг/м}^3$ ,  $S_{уд}=160 \text{ м}^2/\text{кг}$  и сланцевая зола Прибалтийской ГРЭС с  $\rho_o^н=1140 \text{ кг/м}^3$ ,  $S_{уд}=220 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Для приготовления пены использовали пенообразователь на основе СДО по ТУ 13-05-02-83.

В качестве химических модификаторов - ускорителей твердения бетона применяли суперпластификатор С-3, хлористый кальций и полиметаллический водный концентрат (ПВК), являющийся попутным продуктом нефтедобычи.

Содержание цемента варьировали в пределах  $280\text{--}400 \text{ кг/м}^3$ , значение В/Т – от 0,21 до 0,44, содержание пенообразователя – от 96 до  $150 \text{ кг/м}^3$ . Расход химических модификаторов бетона составлял: С-3 – 0,8%,  $\text{CaCl}_2$  – 1.2-5% от массы цемента, ПВК – 12% от количества воды затворения.

На рис. 1 представлены результаты экспериментов по установлению оптимального В/Т, обеспечивающего максимальную стойкость пены, на рис. 2 – кинетика набора прочности неавтоклавных пенобетонов исследованных составов.

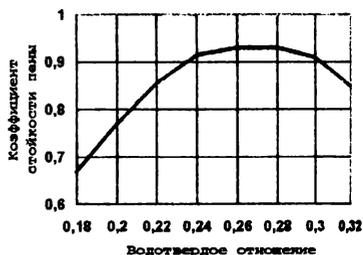


Рис.1 Влияние водотвердого отношения на стойкость пены

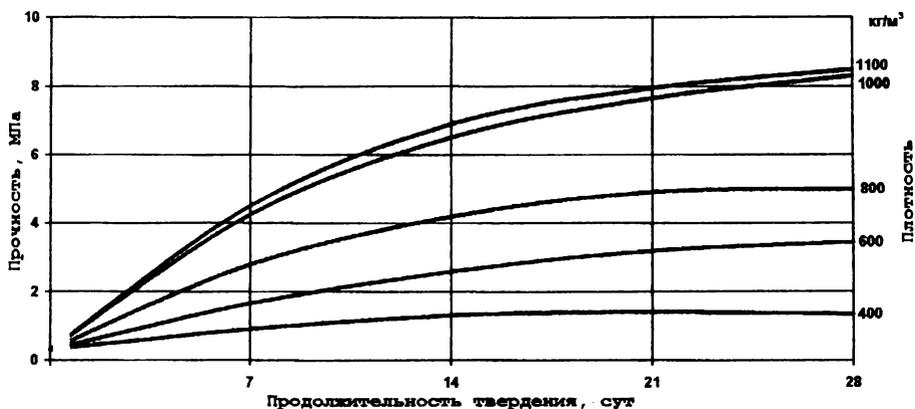


Рис. 2 Зависимость набора прочности пенобетона в естественных условиях ( $t=18-20\text{ C}$ )

Опытно-промышленную апробацию разработанных составов и технологических режимов получения неавтоклавного пенобетона различной плотности осуществляли на промышленной пеноустановке 1МН - 28 на производственной базе ЗАО "Завод Промстройиндустрия". Пенобетонную смесь приготавливали по двухстадийной технологии, после чего подавали в кассетные формы блоков. Через 18-24 ч производили распалубку изделий и их складирование на стеллажи для дальнейшего вызревания.

Опытно-промышленная апробация подтвердила результаты лабораторных экспериментальных исследований. Получены пенобетоны безавтоклавного твердения со средней плотностью от 400 до 1100 кг/м<sup>3</sup>, основные характеристики которых представлены в табл. 1.

На основании выполненных исследований разработаны "Технологический регламент на приготовление пенобетонной смеси для производства изделий и конструкций неавтоклавного твердения" и "Рекомендации по технологии изготовления изделий из неавтоклавного пенобетона".

#### Литература.

Меркин А.П., Кобидзе Т.Е. Особенности структуры и основы технологии получения эффективных пенобетонных материалов. //Строит. Материалы. 1988, №3, с. 16-18.

Основные характеристики неавтоклавных пенобетонов

№№ п/п	Наименование характеристик	Един. измер.	Величины характеристик для пенобетона				
			400	600	800	1000	
1.	Плотность в сухом состоянии	кг/м <sup>3</sup>	400	600	800	1000	
2.	Теплопроводность в сухом состоянии	Вт/м <sup>2</sup> С	0,1	0,14	0,2	0,25	
3.	Морозостойкость после 25 циклов	--	не разрушается				
4.	Прочность при сжатии в возрасте:	МПа					
			7 сут	0,7	1,4	2,5	4,1
			14 сут	0,9	3,0	4,1	6,2
			28 сут	1,2	3,7	5,1	8,1

### О ЕДИНОМ МЕТОДИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ ПРИ ОЦЕНКЕ СОБСТВЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В БЕТОНЕ НА ОСНОВЕ НАПРЯ- ГАЮЩЕГО ЦЕМЕНТА

В.В. Тур

Строительный факультет, БПИ

г. Брест, Беларусь

Совершенствование и развитие новых технологий привело к получению бетонов с классами по прочности до  $C^{100}/_{120}$ , характеризующихся высокими эксплуатационными показателями (т.н. «high performance concrete»). Однако и материалы нового поколения не лишены недостатков, присущих традиционным бетонам на основе портландцементного вяжущего. К ним в первую очередь следует отнести: а) неадекватный рост прочности на сжатие и растяжение, в результате чего бетон по-прежнему остается искусственным камнем, работающим главным образом на сжатие; б) реологические явления (усадка и ползучесть), приводящие в ряде случаев к существенному снижению эксплуатационных качеств железобетонной конструкции.

На протяжении целого ряда лет научная мысль была направлена на поиск средств и способов полного исключения или частичного снижения деформаций усадки до значений, не приводящих к трещинообразованию бетона. Как правило, большинство из этих попыток оказывались неудачными. Применяемые кон-

структивно-технологические мероприятия (установка соответствующего количества арматуры, устройство часто расположенных температурно-усадочных швов, уход за бетоном и т.д.) в практической деятельности оказываются малоэффективными и, кроме того, в ряде случаев приводят к снижению сроков службы конструкций.

Работы многих исследователей были направлены на получение вяжущего, применение которого не только компенсировало бы усадку, но и позволило бы достичь в процессе твердения положительного объемного расширения.

В своей монографии [1] И.Гийом писал «...Если будет достигнуто значительное расширение бетона, обеспечивающее надлежащее натяжение арматуры, несомненно мы получим совершенно новый способ предварительного напряжения балок».

Получение таких бетонов стало возможным благодаря работам проф. В.В.Михайлова [2] по созданию напрягающего цемента, бетона на его основе и самонапряженных конструкций.

Следует отметить, что до настоящего времени нет единства в терминологии, касающейся как напрягающих цементов, так и бетонов на их основе. Известен целый ряд классификаций, которые являются как достаточно подробными [3], так и предельно упрощенными. Наибольшее признание в мировой практике получила квалификация, предложенная в ASTM C 845[4]. Однако и она не лишена определенной односторонности.

С нашей точки зрения наиболее приемлемым является определение расширяющегося цемента, представленное в [3]. Согласно представлениям авторов [3] расширяющиеся цементы – это неорганические вяжущие вещества, которые показывают временное и пространственное управляемое увеличение объема.

В наших работах под напрягающими бетонами принято понимать бетоны на основе напрягающих цементов, марку по энергоактивности которых и расход в составе бетонной смеси назначают в зависимости от требуемой величины самонапряжения в бетоне конструкции с учетом потерь от длительных процессов и обеспеченной длительной прочности. Для таких бетонов в число обязательных нормируемых характеристик следует зачислять проектную (нормативную) марку по самонапряжению.

Обширными экспериментальными исследованиями установлено, что величина самонапряжения бетона в конструкции зависит от главных факторов: а) марки по энергоактивности (самонапряжению) напрягающего цемента и его

расхода в составе бетонной смеси; б) степени ограничения (стеснения) деформаций расширения; в) температурно-влажностных условий развития процесса расширения (хранения конструкции).

При прочих равных условиях фактором, определяющим образом влияющим и на величину самоупрężения, является степень ограничения деформаций расширения. В традиционном понимании [2] степень ограничения принято характеризовать через процент армирования сечения  $\rho_{l,s}$ . В связи с чем принят именно такой критерий? Во-первых, это опутимый физический показатель, который характеризует железобетонную конструкцию (степень насыщения сечения арматурой). При этом, изначально применение самоупрężающего бетона было направлено на получение преднапруженной конструкции при растяжении ограничивающей арматуры. Во-вторых, самоупрężение не могут быть описано пользуясь законами упругого деформирования (например законом Гука) и практически все расчетные зависимости, используемые в теории самоупрężенного железобетона получены экспериментальным путем. В опытах было достаточно просто и удобно оценивать величину несвободных деформаций расширения бетона, связывая их с переменным процентом армирования сечения. На основании результатов исследований в [ ] была предложена мультипликативная зависимость для определения величины самоупрężения:

$$\sigma_{CE} = f_{CE,d} k_p k_s k_e \quad (1)$$

где  $f_{CE,d}$  – расчетное значение самоупрężения, установленное в стандартных условиях при  $\rho_l = 1\%$  согласно [5];

$k_p, k_s, k_e$  – система коэффициентов, корректирующих отклонение условий расширения бетона в конструкции от стандартных [5].

В целом при симметричном расположении в сечении ограничивающих связей формула (1) дает хорошее совпадение с опытными данными, что дало основание в нормативном документе [5] принять гипотезу о равномерном распределении самоупрężения по сечению. Эта гипотеза была подвергнута критике в работе [6] и уточнялась в наших работах [7]. Исследованиями [7] установлены зависимости, с помощью которых стало возможным описать напряженно-деформированное состояние самоупрężенной конструкции при произвольном расположении ограничивающей арматуры в ее сечении. Таким образом удалось решить основные задачи по оценке величины самоупрężения железобетонных конструкций.

Эффективной областью применения напрягающего бетона являются сборно-монолитные конструкции. При этом, установлено [8], что расширение монолитного напрягающего бетона таких конструкций развивается в условиях, когда основным ограничением собственных деформаций являются, наряду с расположенной в нем арматурой, сборные элементы.

Экспериментальными исследованиями [8] установлено, что напряженно-деформируемое состояние от расширения напрягающего бетона оказывает существенное влияние на работу конструкции под нагрузкой. Для его оценки следует уметь рассчитывать связанные деформации и самонапряжения набетонки, а далее и всего составного сечения. Учитывая то обстоятельство, что исследованиями железобетонных конструкций [7] установлена взаимосвязь между самонапряжением, деформациями и степенью ограничения расширения, выраженной через процент армирования сечения, можно утверждать, что при прочих равных условиях установленного процента армирования сечения соответствует вполне определенная величина связанной деформации расширения, а ей в свою очередь – единственное значение самонапряжения. Или, другими словами, независимо каким способом обеспечено ограничение расширения, полученной величине связанной деформации соответствует единственное значение самонапряжения. Эта взаимосвязь в работе [2] выражена следующим образом:

$$\sigma_{CE} = k(f_{CE,d})^{1,25} \left( \frac{1}{\varepsilon_{cu,CE}} \right)^{0,25} \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{cu,CE}$  – связанная деформация бетона при расширении.

Таким образом для оценки величины самонапряжения в монолитном напрягающем бетоне любой конструкции может быть сформулирована следующая гипотеза.

При определении величины самонапряжения напрягающего бетона, расширение которого протекает в условиях ограничения деформаций внешним препятствием (упорами, сборными элементами т.д), ограничивающее влияние последнего следует учитывать путем введения некоторого условного армирования (квазиармирования), количество которого и положение в пределах сечения назначается таким образом, чтобы было полностью сохранено деформированное состояние напрягающего бетона в исходной конструкции. Пример такого перехода показан на рис. 1.

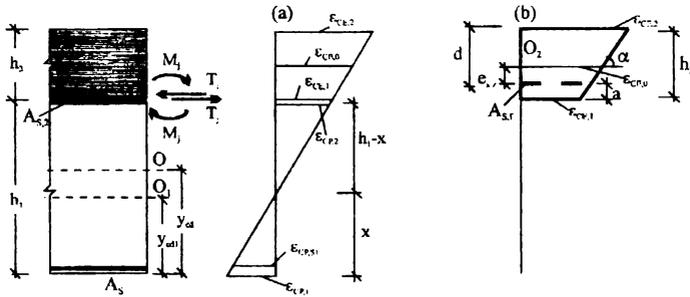


Рис. 1. Деформированное состояние исходного сборно-монолитного (а) и замещающего монолитного сечения с условным армированием  $A_{s,f}$  (б)

1 – сборный элемент; 2 – монолитный напрягающий бетон.

Как видно, используя критерий, характеризующий степень ограничения, для армированных элементов (процент армирования), появляется возможность с помощью дополнительно сформулированной гипотезы о условном армировании (квазиармировании) определять величину деформаций и самонапряжений при практически любом внешнем ограничении на базе одних и тех же расчетных зависимостей вида (1).

Площадь условного армирования ( $A_{s,f}$ , см. рис. 1) и его положение в пределах сечения следует определять для исходного конкретного случая конструктивного решения, в котором применен напрягающий бетон.

Такой подход позволяет использовать для расчета деформаций и самонапряжений в конструкции единую методику, применяемую для расчета железобетонных самонапряженных элементов.

### Литература

1. И.Гийом. Предварительно-напряженные конструкции (перевод и техн. Ред. В.В.Михайлова), М. Стройиздат, 1953 г., стр. 74.
2. В.В.Михайлов, С.Л.Литвер. Распиряющийся и напрягающий цемент и бетоны на его основе. М., Стройиздат, 1974.– с. 276.
3. И.Я.Харченко, Б.Щтарк. Распиряющиеся цементы// Mat. Научн. Конф. 75 Jahre Quellezement/ Weimar, Germany, 1995 – s. 3–10.
4. ACI Committee 233 Report. Expansive Cement Concretes -- Present State of Knowledge/ Journal of ACI,– June, 1972,– vol. 3.– p. 721–749.

5. Пособие по проектированию самонапряженных конструкций (к СНиП 2.03.01-84) – М. Стройиздат, 1989, с. 39.
6. Будюк В.Д., Никитин В.И. Экспериментально-теоретическое моделирование железобетонных элементов// Известия ВУЗов. Строительство и архитектура, 1979 – № 6 - с. 17-20.
7. Тур В.В., Басов В.С. К вопросу о влиянии эксцентриситета приложения ограничивающей связи на процессы развития самонапряжения/ Брест, 1997, с. 119-132.
8. Тур В.В. Прочность, жесткость и трещиностойкость самонапряженных ребристых плит перекрытий/ Дисс. канд. техн. наук/ Москва, НИИЖБ, 1989, 275 с.

## **НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

В.В. Тур, А.А. Кондратчик, В.А. Марчук  
Строительный факультет, БПИ  
г.Брест, Беларусь

В настоящее время применение расширяющихся цементов в строительстве свя-зано, главным образом, с улучшением эксплуатационных свойств конструкций. Основ-ная идея их создания была направлена на исключение неблагоприятных последствий усадки. Создание напрягающих цементов, имеющих так называемый "твердофазовый механизм расширения", позволило получить новый способ создания предварительного напряжения конструкций. При этом практически все исследовательские работы послед-них двух десятилетий были направлены как на изучение свойств самих расширяющихся и напрягающих цементов, так и на разработку практических методов оценки самона-пряжения бетона в конструкции. Значительно меньшее внимание исследователей уделя-ется еще одному важному вопросу, связанному с проектированием конструкций из на-прягающего бетона, а именно описание процесса развития собственных деформаций при самонапряжении конструкции. Это обусловлено тем, что в по-давляющем большин-стве случаев исследовались короткие элементы балочного типа с центральным положе-нием ограничивающих связей в сечении.

При исследованиях сборно-монолитных самонапряженных ребристых, а затем и безригельных перекрытий обратили внимание на тот факт, что плоская при изготов-лении конструкция, перекрывающая квадратную в плане ячейку, в

процессе расширения напрягающего бетона превращается в пологую оболочку положительной гауссовой кривизны [1]. Исследования неразрезных фрагментов [ ] перекрытия показали, что в процессе расширения, в зависимости от условий ограничения деформации, плоские конструкции перекрытий могут приобретать сложную геометрическую форму, в ряде случаев получая нежелательные прогибы. На основании выполненного расчетного анализа компьютерных моделей в работе [2] было показано, что форма поверхности плоской после бетонирования конструкции будет существенным образом зависеть от положения ограничивающих связей в пределах сечения контурных элементов и плиты. При этом установлены зависимости, позволяющие описать не только самонапряжение элементов перекрытия, но и определить деформированное состояние.

Таким образом, базируясь на обобщенных результатах последних работ лаборатории самонапряженных конструкций БИИ в области самонапрягаемых конструкций, можно сформулировать следующую гипотезу. Применение напрягающего бетона для изготовления конструкции позволяет получить не только начальное предварительное напряжение ее элементов, но и новую геометрическую форму, соответствующую замыслу проектировщика.

Обратившись к наиболее удачному, на наш взгляд, определению расширяющегося цемента, данному в [3], следует отметить, что такой подход удовлетворяет изначальной идее самого материала - способность претерпевать временное и пространственное управляемое изменение объема.

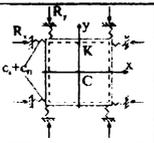
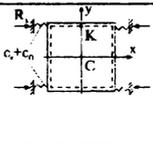
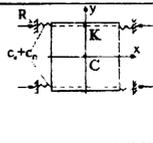
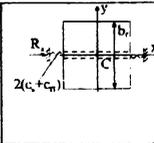
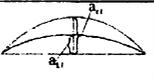
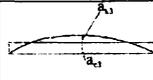
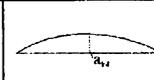
Изменение геометрической формы перекрытий при различных условиях ограничения деформаций контурных балок исследовали на компьютерных моделях. Программа эксперимента и результаты расчета представлены в таблице 1.

На основании проведенных исследований было установлено, что для описания поверхности оболочки, получаемой в результате расширения, следует установить деформированную схему контурных элементов. Обработка данных моделирования показала, что кривизна контурного элемента на стадии расширения может быть определена как для балки таврового сечения со свесами полок, равными  $e_s$  (где  $e_s$  - толщина плиты оболочки). При этом кривизна балки может быть установлена, пользуясь базовой зависимостью, полученной в работе [4]:

$$\psi_{CE} = \frac{f_{CE,d} \cdot k_{\rho} \cdot k_s}{\rho_1 \cdot E_s \cdot h} \left( \frac{e_s}{d} \right)^k \quad (1)$$

Таблица 1

Данные сравнительного анализа по вариантам компьютерного моделирования

Анализируемые параметры		Варианты моделирования			
					
Вертикальные деформации	в точке "С"	$a_{c1} = 2 \cdot a_{k1}$	$a_{c2} = a_{k2} = 0.5 \cdot f_{c1}$	$a_{c3} = 0.5 \cdot 1/K_1 \cdot a_{c1} = 1/K_1 \cdot a_{c2}$ $K_1 > 1$	$a_{c4} = a_{c3}$
	в точке "К"	$a_{k1}$	$a_{k2} = a_{k1}$	$a_{k3} = k_2 \cdot a_{k2} = 1/K_2 \cdot a_{k1}$ $K_2 > 1$	$a_{k4} = a_{k3}$
Реакция в ограничивающих связях		$R_{k1}$	$R_{k2} = R_{k1}$	$R_{k3} = 1/K_3 \cdot R_{k2} = 1/K_3 \cdot R_{k1}$ $K_3 < 1$	$R_{k4} = R_{k3} = 1/K_3 \cdot R_{k1}$
Схема вертикальных деформаций контурной балки					
<i>Примечание: в представленных зависимостях коэффициенты K1, K2, K3 – коэффициенты, учитывающие влияние торцевых контурных балок.</i>					

где:  $e_s$  – эксцентриситет ограничивающей связи относительно центра тяжести бетонного сечения контурной балки

$d$  – рабочая высота сечения

Из формулы (1) следует, что при прочих равных условиях кривизна контурного элемента, а следовательно и поверхности, получаемой в результате расширения напрягающего бетона, зависит, главным образом, от положения ограничивающей связи, что описывается эксцентриситетом  $e_s$  (см. рис. ). Меняя положение ограничивающей связи в пределах сечения появляется возможность управлять процессом формообразования конструкции. Для получения пространственной конструкции предложенным способом необходимо выполнить следующие элементарные технологические операции:

1. подготовить опалубку для бетонирования плоской конструкции;
2. забетонировать конструкцию напрягающим бетоном;
3. осуществить уход за бетоном в соответствии с назначенным технологическим регламентом.

Схема процесса формообразования оболочки положительной гауссовой кривизны показана на рис. 1.

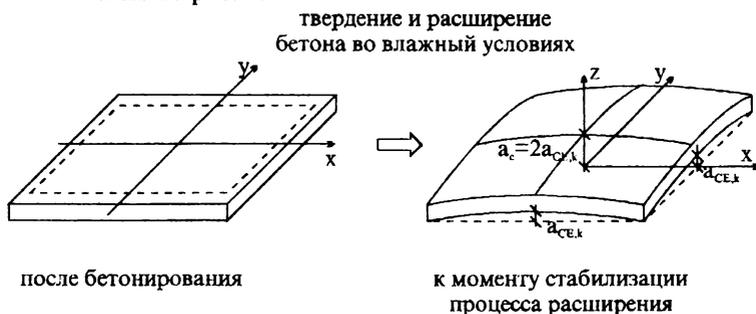


Рис. 1. Схема формообразования в случае оболочки положительной Гауссовой кривизны на стадии расширения напрягающего бетона (при  $\epsilon_s > 0$ ).

Изменяя величину эксцентриситета  $e_s$  для контурных балок различных направлений можно получать требуемую поверхность оболочки. Например, если балки по направлению X (см. рис. 2) имеют положительный эксцентриситет  $e_s > 0$ , а по направлению Y – отрицательный  $e_s < 0$  будет иметь место оболочка отрицательной гауссовой кривизны. При этом дополнительно можно варьировать и количеством ограничивающей арматуры, располагаемой в контурных балках (рис. 2).

В заключение следует ответить на один очень важный вопрос: сохраняется ли достигнутая форма оболочки во времени? Так опыты, проведенные с фрагментом перекрытия при его хранении в воздушно-сухих условиях (при  $t_{cp} = 20 \div 25^\circ\text{C}$ ,  $RH = 40 \div 50\%$ ) в течении около 4 лет не выявили сколько-нибудь значительных изменений в начальной геометрии, полученной на стадии расширения. Для объяснения этого явления следует обратиться к механизму и причинам расширения напрягающих цементов и бетонов, что является предметом отдельной статьи.

Несомненно, что в настоящей статье изложена только основная идея новой технологии получения пространственных конструкций. Ее доведение до промышленного использования потребует не только радикального изменения, в первую очередь культуры строительного производства, включая наличие опалубок механизмов для укладки бетонной смеси и т.д., но и работы над самим исходным материалом, определения области рациональных пролетов и нагрузок.

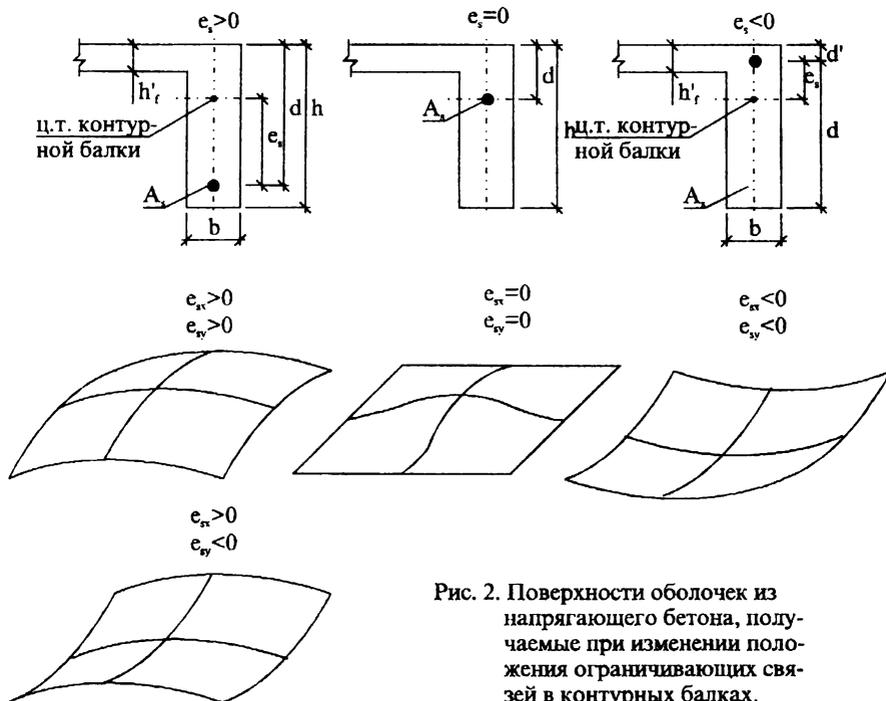


Рис. 2. Поверхности оболочек из напрягающего бетона, получаемые при изменении положения ограничивающих связей в контурных балках.

### Выводы

1. Применение напрягающего бетона для изготовления конструкций позволяет не только достигнуть самонапряжения конструктивных элементов, но и получить заранее заданную геометрическую поверхность, т.е. появляется новая технология изготовления пространственных конструкций.
2. Способом регулирования формообразования конструкции является лишь назначение соответствующего положения ограничивающих распирение связей в пределах сечений элементов перекрытий.

### Литература

1. Тур В.В. Прочность, жесткость и трещиностойкость самонапряженных ребристых плит перекрытий. / Дисс. канд. техн. наук., М. – НИИЖБ. – 1989 – 275 с

2. Басов В.С. Прочность, жесткость и трещиностойкость самонапряженных безригельных перекрытий./ Дисс. канд. техн. наук., Минск, - БГПА - 1998 - 216 с
3. Харченко И.Я., Штарк Б. Расширяющиеся цементы // Материалы научной конференции 75 Jahre Quellezement/ ,Germany,1995. - s.3 - 10.
4. Тур В.В., Басов В.С. К вопросу о влиянии эксцентриситета приложения ограничивающей связи на процессы развития самонапряжения // Брест, 1997. - с.119 -132.

## **ОРГАНИЗАЦИЯ ТРАНСФЕРА ТЕХНОЛОГИЙ В СФЕРЕ СТРОИТЕЛЬСТВА НА ПРИМЕРЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЦЕНТРА ТРАНСФЕРА ТЕХНОЛОГИЙ БРЕСТСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА**

А. В. Харитонович, А.Г. Проровский  
Центр трансфера технологий, БПИ  
г. Брест, Беларусь.

В статье освещаются вопросы, связанные с осуществлением деятельности в области трансфера технологий в сфере строительства между научным потенциалом и промышленностью, а также перспективы развития Центра трансфера технологий Брестского политехнического института.

Ключевые слова: трансфер технологий (англ. - transfer - передача; перенос; перевод) - комплекс мероприятий по взаимному обмену технологиями между разработчиком и производителем, то есть процесс внедрения опытно-конструкторских и опытно - технологических разработок в реальное производство.

Строительный комплекс Республики Беларусь, как и в целом экономика страны переживает кризисное состояние. Одной из основных проблем на сегодняшний день является проблема обновления морально и физически устаревших основных фондов предприятий строительной индустрии. Наряду с этим крайне острой и актуальной стала проблема замены малоэффективных трудо- и материалоемких технологий на соответствующие мировым стандартам высокотехнологичные и высокоэффективные решения, касающиеся как самого процесса строительного производства, так и инфраструктуры, его определяющей.

Как отмечают многие специалисты, Беларусь на сегодняшний день располагает большим научно-технологическим, технологическим, индустриальным и кадровым потенциалом, который способен обеспечить оперативное и оптимальное решение насущных проблем как строительной отрасли, так и не востребовавшего научного потенциала республики.

Для этого, в первую очередь, необходимо создание и развитие взаимовыгодной и эффективной системы взаимодействия между основными участниками процесса внедрения новых технологий.

Учитывая опыт ФРГ, столкнувшейся в своё время с аналогичной проблемой, наиболее приемлемым выходом из сложившейся ситуации является создание структур, способных упорядочить и наиболее эффективным образом организовать процесс внедрения инноваций научно-технологического потенциала в производство. Такие структуры были созданы в ФРГ уже более сорока лет назад и продолжают развиваться, организовавшись в целую сеть центров трансфера технологий. Имеет смысл создать и развивать подобную систему и у нас в республике, учитывая накопленный инновационный потенциал научных и внедренческих учреждений, по многим вопросам превосходящий мировой уровень разработок.

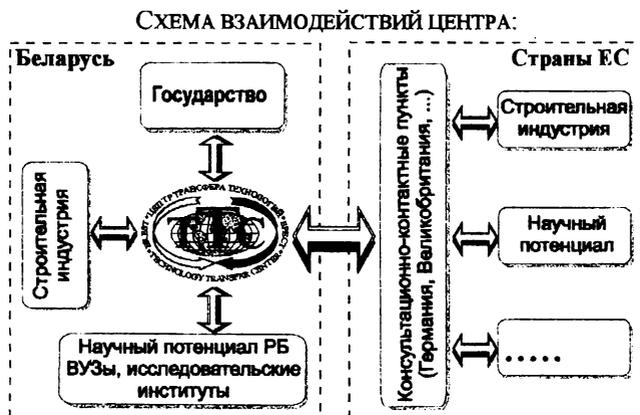
Брестский политехнический институт совместно с двумя зарубежными ВУЗами-партнерами, высшей профессиональной школой Биберах (Германия) и Ноттингемским Трент Университетом (Великобритания), участвует в осуществлении совместного компакт-проекта «Трансфер технологий между ВУЗами и промышленностью» в рамках трансъевропейской программы сотрудничества в сфере высшего образования ТЕМПУС-ТАСИС. Действие и финансирование проекта предусмотрено на срок с 1 января 1997 года по 30 июня 1998 года.

22 сентября 1997 года в рамках проекта совместно с высшей профессиональной школой Биберах (Германия) и Ноттингемским Трент университетом (Великобритания) в Брестском политехническом институте был открыт и приступил к работе Центр трансфера технологий.

В результате открытия Центра трансфера технологий была достигнута основная цель проекта - создание контактного бюро для осуществления трансфера технологий между ВУЗом и промышленностью как в Республике Беларусь, так и в странах Европейского Сообщества. Это первый центр не только в Республике Беларусь, но и в Европе, занимающийся трансфером технологий в области строительства.

Вторая часть проекта предусматривает активное развитие этого бюро, содержательное и функциональное его оформление и закрепление, а также начало осуществления непосредственной задачи - управление процессом обмена технологиями между научным потенциалом высшей школы и имеющими потребность в данных технологиях представителями промышленных предприятий Республики Беларусь и зарубежья.

Основная цель создания Центра - способствование развитию и прогрессу строительной отрасли Республики Беларусь на базе обеспечения непосредственных взаимовыгодных связей между государством, строительной индустрией и научным потенциалом Республики Беларусь и стран ЕС, в первую очередь Германии и Великобритании.



#### НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЦЕНТРА:

1. Технические консультации, маркетинг, контакты между специалистами, индустрией и научным потенциалом.
2. Научно-исследовательская деятельность с привлечением ведущих специалистов РБ и стран ЕС.
3. Сертификация строительной продукции и независимая оценка новых проектов.
4. Трансфер прогрессивных технологий в области строительства с квалифицированным техническим сопровождением.
5. Пропаганда и внедрение передовых достижений в области строительства и строительной науки (организация и проведение научно-технических конференций, семинаров, выставок, составление и публикация технических обзоров).

6. Поддержка прогрессивных проектов, диссертационных и дипломных работ.
7. Привлечение студентов и творческой молодежи к активной научно-исследовательской деятельности.

#### ПРЕИМУЩЕСТВА ЦЕНТРА:

1. Высококвалифицированный научный и инженерный потенциал.
2. Возможность непосредственных контактов со специалистами и учеными строительной индустрии в странах СНГ и ЕС (быстрота и гибкость решений).
3. Широкие возможности доступа к информации в области строительства.
4. Профессиональное знание проблем строительной отрасли и путей их решения с использованием передовых разработок в этой области.

Несмотря на достаточно малый срок своего существования, Центр трансфера технологий Брестского политехнического института уже организовал и успешно реализовал ряд мероприятий, предшествующих непосредственному трансферу инновационных научных и учебных разработок.

Среди таких мероприятий следует в первую очередь назвать международные научно-технические семинары-выставки «Армогрунтовые материалы и конструкции в строительстве» (23-24 сентября 1997) и «Реконструкция зданий, сооружений и транспортных объектов» (9-10 декабря 1997). 21-22 апреля 1998 года Центр организует проведение Второй Республиканской межвузовской конференции "Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений" и одновременно запланированной международной научно-технической выставки "Эффективные материалы и технологии в строительстве".

Все эти мероприятия проводятся на высоком уровне с обоюдной пользой как для участников, так и для организаторов, и имеют цель установления результативных деловых контактов между белорусскими и зарубежными (прежде всего германскими, английскими и польскими) учёными и промышленниками.

Центр трансфера технологий играет ключевую роль в данном процессе как контактное бюро, располагающее разносторонней и исчерпывающей информацией об имеющихся запросах и предложениях со стороны представителей промышленности и науки в сфере строительства, учитывая приоритетную специфику участвующих в проекте ВУЗов-партнёров.

Следующий этап проекта предполагает развитие научно-промышленных контактов при информационно-экспертном посредничестве Центра трансфера технологий и начало осуществления самих обменов технологиями и их внедрения.

В настоящее время Центр представляют опытные ученые и специалисты, прошедшие стажировку по вопросам организации деятельности в области трансфера технологий в Германии и Великобритании. Кроме того, Центр располагает самым современным оборудованием для информационного и телекоммуникационного обеспечения своей деятельности (компьютеризация, факсимильная связь, электронная почта), в том числе для организации научно-информационных мероприятий (семинаров, конференций, выставок), а также издательской деятельности.

На сегодняшний день особенно актуальной стала проблема доступа Центра к системе INTERNET, которая смогла бы обеспечить регулярный обмен информацией о самых современных инновационных технологиях в области строительства и возможностях их внедрения. В качестве одной из приоритетных и актуальных задач является на сегодня разработка многоцелевых справочно-информационных систем по созданию и потреблению научно-технической продукции, инновационных технологий и разработок для Западного региона Республики Беларусь. Этот проект предполагает:

1. Разработку баз данных о потенциальных потребителях и источниках предложения научно-технической продукции в сфере инновационной деятельности строительной отрасли.

2. Создание банка данных по научно-техническим разработкам, предлагаемым к внедрению на промышленных предприятиях Западного региона РБ и зарубежья.

3. Создание банка данных по проблемам строительной отрасли Западного региона РБ.

4. Создание WEB-сервера для размещения информации о спросе и предложении на научно-техническую продукцию и инновационные разработки в сети INTERNET.

За время своего существования Центр наладил эффективные международные связи и имеет достаточно богатый опыт международного сотрудничества в научной сфере.

В своей дальнейшей деятельности Центр трансфера технологий Брестского политехнического института будет придерживаться принципов самокупаемости и самообеспечения. Этому будут способствовать заказы и предложения, связанные с внедрением технологий и имеющие коммерческий характер. Предпосылками для такой направленности служат многочисленные и эффективные контакты Центра с белорусскими и зарубежными предприятиями, фирмами и информационными центрами, специализирующимися в сфере строительного производства.

В целом деятельность Центра трансфера технологий вызвала значительный интерес со стороны многих заинтересованных организаций и лиц. Центр принимал ряд официальных делегаций и представителей министерств и ведомств, позитивно оценивших его деятельность и настроенных на её всестороннюю поддержку.

Центр трансфера технологий Брестского политехнического института поддерживает идею создания при Государственном комитете по науке и технологиям РБ международного центра трансфера технологий (МЦТТ), который, судя по всему, будет являться головной структурой, координирующей деятельность подобных организаций в Республике Беларусь. В связи с этим Центр трансфера технологий изъявляет готовность вплотную сотрудничать с МЦТТ и, со своей стороны, способствовать его развитию, вплоть до открытия представительства МЦТТ на базе Центра трансфера технологий Брестского политехнического института с активным и плодотворным использованием результатов, достигнутых в ходе выполнения текущего проекта.

Это даст возможность поднять уровень научно-технологического потенциала высшей школы и промышленности, в частности, строительной индустрии республики и в полной мере осуществить поставленные перед Центром цели. Кроме того, это безусловно будет способствовать дальнейшему развитию научных и промышленных контактов Республики Беларусь с представителями стран Европейского Сообщества, и, как следствие, станет одним из важнейших факторов улучшения инвестиционного климата для широкого внедрения инновационных разработок в сфере строительства.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ И МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ

В.Н.Черноиван, В.Н.Плосконосов, Ю.П. Ивасюк

Строительный факультет, БПИ

г.Брест, Беларусь

В работе рассмотрены вопросы использования древесно-цементных композиций в качестве утеплителя перекрытий в малоэтажном строительстве.

Ключевые слова: древесные опилки, цемент, теплоизоляционная смесь, минерализатор.

Согласно действующих в Республике Беларусь нормативных документов [1], [2] требуемое сопротивление теплопередаче перекрытия над неотапливаемым подвалом без проемов должно быть не менее  $2 \text{ м}^2\text{С/Вт}$ . Существующие типовые решения конструкций полов над подвалом (по серии 2.144-1/88) не обеспечивает требуемого значения сопротивления теплопередаче  $R_{\text{пр}}$ .

В настоящее время для обеспечения требуемых теплотехнических характеристик пола над неотапливаемым подвалом используется следующее конструктивное решение: по железобетонной плите перекрытия укладывается слой утеплителя (плиты из пенопласта полистирольного толщиной 10 см), по утеплителю устраивается цементно-песчаная стяжка М150, толщиной 5 см, а по ней – пол.

Такое конструктивное решение является достаточно трудоемким и дорогостоящим, так как устройство теплоизоляционного слоя производится из отдельных плит размером  $2 \times 1 \text{ м}$ , а стоимость  $1 \text{ м}^3$  плит из пенопласта полистирольного составляет 1.4 млн.руб. Высокая стоимость полистирольных плит и принятая технология производства работ приводит к существенному удорожанию  $1 \text{ м}^2$  пола.

В связи с этим, по предложению ПМК-6 «Брестоблсельстроя» на кафедре ТСП БПИ были проведены поисковые исследования по подбору состава на основе отходов деревообработки (опилок) и минерального вяжущего для устройства теплоизоляционной подготовки под полы.

Предлагаемое решение направлено на замену утеплителя из плитного пенополистирола, укладываемого вручную, теплоизоляционной смесью на основе опилок и местного вяжущего, транспортируемой к месту укладки по трубопроводу при

помощи пневмонагнетателя, что позволит удешевить и механизировать процесс устройства теплой подготовки под полы.

В результате поисковых исследований были определены некоторые физико-механические характеристики и теплотехнические параметры предлагаемого материала на цементном вяжущем с использованием в качестве минерализатора галитовых отходов (г. Солигорск). Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	Состав цемент-опилки (по массе)	Содержание добавки в % от массы цемента	Водоцементное отношение В/Ц	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности на сжатие, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/м <sup>2</sup> °С
1	1:0.5	0	2.50	581	0.34	0.124
2	1:0.5	5	2.41	602	0.52	0.127
3	1:0.5	10	2.32	621	0.55	0.138
4	1:0.5	15	2.19	643	0.61	0.151
5	1:0.5	30	2.07	664	0.68	0.167

На основе результатов исследований и данных о стоимости материалов, предоставленных ПТО ПМК-6 «Брестоблсельстроя» выполнен сравнительный расчет стоимости 1м<sup>2</sup> пола для типового и предлагаемого вариантов:

– типовой вариант :  $C_1 = 0.1 \cdot 1400000 + 0.05 \cdot 900000 = 171000 \text{ руб/м}^2$ ;

– предлагаемый вариант:

$$C_2 = 0.21 \cdot 1300000 - 0.172 + 0.03 \cdot 900000 = 94600 \text{ руб/м}^2.$$

Предполагаемый экономический эффект

$$Э = (171000 - 94600) / 171000 \cdot 100\% = 44\%.$$

На сегодня деревоцементные композитные материалы не нашли широкого применения в практике строительства в виду:

- отрицательного влияния на процессы гидратации цемента экстрактивных веществ древесины;
- значительных объемных влажностных деформаций материала;
- значительной упругости при уплотнении смеси и др.

Из всех специфических особенностей древесных заполнителей наиболее хорошо изучена их агрессивность к клинкерному тесту [6].

Гемиллюлозная часть древесины представляет собой полисахариды, способные в цементном растворе гидролизироваться и переходить в водорастворимые сахара, которые осаждаются на поверхности частичек минералов цемента

образуют тончайшие оболочки, способные изолировать частицы цемента от воды, замедляя ход процессов гидролиза и гидратации цемента.

Для уменьшения отрицательного влияния водорастворимых экстрактивных веществ древесины предложены различные способы и технологические приемы, сущность которых заключается в частичном удалении этих веществ из древесного заполнителя, в переводе простейших сахаров в нерастворимые или безвредные для цемента соединения, в ускорении твердения портландцемента и т.д. [6].

В частности, нами предполагается использовать в качестве минерализатора древесины отходы добычи калийных удобрений, так называемые галитовые отходы, запасы которых в г.Солигорске весьма значительны. В указанных отходах по предварительным данным содержится значительная концентрация хлористых солей Na, K и Mg, а также  $\text{CaSO}_4$ . В качестве химической добавки в образцах 2-5 использовались галитовые отходы (г.Солигорск) следующего химического состава: NaCl - 95.5%, KCl - 3%,  $\text{MgCl}_2$  - 0.2%,  $\text{CaSO}_4$  - 1%, глина и нерастворимые остатки - 2.5%. Влажность отходов 2...3 %.

Использование предлагаемого варианта теплоизоляционной подготовки под полы улучшит санитарно-экологическое состояние помещений, снизит пожарную опасность при производстве работ, позволит механизировать процесс устройства теплоизоляционной подготовки под полы.

В настоящее время на кафедре ТСП БПИ проводятся исследования по подбору состава материала, позволяющего перекачивать его по трубопроводам. Для этого проводятся работы по определению истинной и насыпной плотности, пористости и водопоглощения древесных опилок, возможности их использования с учетом срока хранения и ряда других параметров.

Дальнейшие исследования по перекачке смеси по трубопроводам предполагается производить совместно с Научно-исследовательским и экспериментально-проектным предприятием «Институт БелНИИС» на оборудовании, разработанном к.т.н. Марковским М.Ф.

#### Литература

1. СНБ 2.01.01-93 «Строительная теплотехника».
2. Постановление Министерства строительства РБ №03/355 «О нормативе сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий» от 29 апреля 1992 года.

3. ГОСТ 19222-84 «Арболит и изделия из него».
4. СН 549-82 «Инструкция по проектированию, приготовлению и применению конструкций и изделий из арболита».
5. Типовые конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений. Серия 2.144-1/88. Узлы полов жилых зданий.
6. Наназашвили И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции. -Л.: Стройиздат, 1990.

**Научное издание**

**ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ, СТРОИТЕЛЬСТВА  
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

**Сборник статей II Межвузовской Научно-технической Конференции**

**Часть 1**

**Ответственный за выпуск Тур В.В.**

**Редактор Строкач Т.В.**

**Компьютерный дизайн и верстка Малыха В.В.**

---

Подписано к печати 13.04.98 г. Формат 60×84<sub>8</sub>. Бумага Uni Paper. Усл. п. л. 14.58. Уч. изд. л. 15.69. Заказ № 211. Тираж 75 экз. Отпечатано на ризографе Брестского политехнического института. 224017, г.Брест, ул. Московская, 267.