

УДК 691.33 (043.3)

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЛЕГКОГО БЕТОНА НА СМЕШАННОМ ВЯЖУЩЕМ И ОТХОДАХ ДЕРЕВООБРАБОТКИ НА ЕГО ПРОЧНОСТЬ И ПЛОТНОСТЬ**

*канд. техн. наук М.С. БИБИК, канд. техн. наук И.И. ТУЛУПОВ  
(ОАО «Завод сборного железобетона № 1», Минск)*

*Представлены результаты исследования влияния вида и соотношения составляющих легких бетонов на смешанном вяжущем и отходах деревообработки на их основные физико-механические характеристики: среднюю плотность и прочность на сжатие. Исследованы составы бетонов с применением цементно-известкового вяжущего и смешанного вяжущего, состоящего из цемента и тонкодисперсной минеральной добавки – утяжелителя доломитового, с использованием в качестве минеральных мелких заполнителей природного песка и отвальной торфяной золы, в качестве органических заполнителей – древесных опилок и стружки. Для оценки сложного механизма влияния состава бетона на исследуемые характеристики сформулированы теоретические предпосылки и предложены критерии плотности и прочности на сжатие и аналитические зависимости для их определения, связывающие эти критерии с характеристиками используемых составляющих и их содержанием в бетоне. На основании выполненного с применением методов математической статистики анализа полученных экспериментальных данных и функциональной зависимости средней плотности и прочности на сжатие исследуемых бетонов от расчетных критериев плотности и прочности были получены аналитические зависимости для расчетного определения этих свойств. Приведены результаты испытаний на сжатие мелкоштучных пустотных стеновых блоков опытной партии, выпущенной из бетонов исследованных составов. На основании обработки и анализа полученных данных установлена величина коэффициента перехода от прочности бетона к прочности пустотного блока, изготовленного из этого бетона.*

**Введение.** Известно, что основные физико-механические и эксплуатационные характеристики бетонов предопределяются видом, свойствами и соотношением используемых составляющих. Для легких бетонов на древесных заполнителях – отходах деревообработки (дробленка, опилки, стружка) – цементном или смешанном вяжущем влияние этих факторов проявляется еще сильнее, что обусловлено присутствием материалов минерального и органического происхождения.

Исследованиями, проведенными авторами ранее, была установлена возможность получения конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона на цементно-известковом вяжущем и отходах деревообработки [1]. В результате проведенных исследований был установлен характер и выполнена количественная оценка изменения влажности бетона в процессе его твердения, предложена расчетная зависимость для ее определения в различном возрасте в диапазоне 1...28 суток воздушного твердения (при температуре воздуха 18...20 °С и относительной влажности 60...70 %). С использованием полученных результатов и формулы Б.Н. Кауфмана [2] была выполнена количественная оценка изменения во времени коэффициента теплопроводности исследуемого материала в зависимости от его влажности, что позволило осуществлять прогнозирование теплозащитных характеристик данного материала в процессе его твердения [3].

Рассмотрим результаты исследований основных физико-механических характеристик – средней плотности и прочности на сжатие легких бетонов на смешанном вяжущем и отходах деревообработки.

**Теоретические предпосылки.** Различная природа составляющих древесно-цементных композиций – органический (древесный) заполнитель и минеральная связка из цемента, тонкодисперсных добавок-микронаполнителей и песка – резко увеличивает число факторов, оказывающих влияние на основные физико-механические характеристики подобных бетонов. Этим обусловлены значительные трудности в установлении закономерностей и разработке аналитических зависимостей, связывающих исследуемые характеристики бетонов на древесных заполнителях с влияющими факторами.

Среди работ, посвященных данной проблеме, известны исследования Г.Я. Кунноса [4], И.Х. Наназашвили [5], А.С. Щербаква [6], В.А. Цапаева [7] и др., в которых рассмотрено влияние состава подобных древесно-цементных композиций (арболита, опилкобетона и т.п.) на их физико-механические свойства. Вместе с тем результаты вышеупомянутых исследований получены для определенных конкретных материалов и условий и носят частный характер.

Наиболее полно была раскрыта взаимосвязь прочности на сжатие и средней плотности с особенностями структуры для арболита с тонкодисперсными минеральными добавками и разработаны критерии оценки и эмпирические зависимости для их расчета в исследованиях, выполненных в Белорусском национальном техническом университете под руководством Н.П. Блещика [8, 9]. На основании анализа структурных особенностей данного бетона и анализа экспериментальных данных были разработаны кри-

терии оценки этих характеристик, эмпирические зависимости для расчета этих критериев и расчетные зависимости для определения плотности и прочности на сжатие арболита. Однако данные зависимости были разработаны для бетонов, не содержащих песка, и с применением конкретного минерализатора древесных отходов – добавки полиметаллического водного концентрата (ПВК) [10].

В данной работе был рассмотрен более широкий спектр составляющих бетона; в ряде композиций были использованы песок и отвальная торфяная зола, в качестве смешанного вяжущего применялись цементно-известковое вяжущее и вяжущее, состоящее из цемента и утяжелителя доломитового (УД) [9], а в качестве минерализатора древесных заполнителей применялся, наряду с ПВК, хлористый кальций [11]. С учетом вышесказанного нами была предпринята попытка, используя основные критерии, положения методики, предложенной в [8, 9], и результаты собственных исследований, расширить область ее применения.

Для оценки плотности бетона, по аналогии с [8, 9], был принят критерий плотности, определяемый как отношение абсолютного объема древесного заполнителя  $V_{д.з.}$  к объему связки камня из вяжущего. Однако при наличии в бетоне наряду с вяжущим песка или другого вида мелкого заполнителя в состав связки камня нами включены и их объемы –  $V_{м.з.}$ , т.е.

$$K_p = \frac{V_{д.з.}}{V_{с.в.}} \cdot \frac{V_{д.з.}}{V_{св.вяж.} + V_{м.з.}} \quad (1)$$

Абсолютный объем древесного заполнителя зависит от его массы и плотности древесной породы  $\rho_d$ :

$$V_{д.з.} = \frac{D}{\rho_d} \quad (2)$$

Среднее значение плотности древесной породы для отходов деревообработки из смешанных пород древесины может быть принято равным  $1540 \text{ кг/м}^3$  (по данным ряда авторов оно колеблется в пределах от  $1499$  до  $1564 \text{ кг/м}^3$  [12]).

Объем связки камня, состоящего из вяжущего (цемента и минеральной добавки-микронаполнителя) и мелкого заполнителя (песка и т.п.), приближенно может быть представлен в виде:

$$V_{св} = \frac{Ц(1-\alpha)}{\rho_ц} + \frac{Ц\alpha + Ц\alpha\omega}{\rho_г} + \frac{МД}{\rho_{МД}} + \frac{МЗ}{\rho_{МЗ}}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – степень гидратации цемента;  $\omega$  – относительное количество воды, химически связанной с цементом;  $\rho_ц$  – плотность цемента;  $\rho_г$  – средняя плотность геля, которая при низких значениях водоцементного отношения ( $B/C$ ) может быть принята равной  $1600 \text{ кг/м}^3$  [13];  $Ц$ ,  $МД$ ,  $МЗ$  – соответственно массовое содержание цемента, тонкодисперсной минеральной добавки и мелкого заполнителя (песка, отвальной золы и т.п.) в единице объема бетона;  $\rho_{МД}$ ,  $\rho_{МЗ}$  – плотность тонкодисперсной минеральной добавки и мелкого заполнителя соответственно.

С учетом (2) и (3) после преобразования критерий плотности легкого бетона на смешанном вяжущем и отходах деревообработки может быть представлен в виде:

$$K_p = \frac{\frac{D}{\rho_d} \cdot \rho_ц}{1 - \alpha + \alpha(1 + \omega) \frac{\rho_ц}{\rho_г} \cdot \frac{МД}{Ц} \cdot \frac{\rho_ц}{\rho_{МД}} \cdot \frac{МЗ}{Ц} \cdot \frac{\rho_ц}{\rho_{МЗ}}} \quad (4)$$

Степень гидратации цемента ( $\alpha$ ) зависит от минералогического состава цемента,  $B/C$ , наличия химических добавок, условий твердения. Методика расчета ее значений приведена в [14]. Применительно к древесно-цементным композициям и цементам белорусских заводов среднее значение  $\alpha$  в 28-суточном возрасте может быть принято равным  $0,6$ , среднее относительное количество химически связанной воды по данным [14] – равным  $0,2$ , а среднее значение плотности цемента может быть принято равным  $3200 \text{ кг/м}^3$  [14].

Учитывая, что числитель в зависимости (4) представляет собой отношение абсолютных объемов древесного заполнителя и цемента, а два последних члена в знаменателе – отношение объемов тонкодисперсной минеральной добавки – наполнителя и мелкого заполнителя к объему цемента, примем для них следующее обозначение:

$$K_{в.д} = \frac{D\rho_ц}{Ц\rho_d}; \quad (5)$$

$$K_{V.MD} = \frac{MD \cdot \rho_{ц}}{Ц \cdot \rho_{MD}}; \quad (6)$$

$$K_{V.MZ} = \frac{MZ \cdot \rho_{ц}}{Ц \cdot \rho_{MZ}}. \quad (7)$$

Тогда зависимость (4) запишется в виде:

$$K_p = \frac{K_{V.D}}{1 - \alpha + \alpha(1 + \omega) \frac{\rho_{ц}}{\rho_2} + K_{V.MD}^* + K_{V.MZ}^*}, \quad (8)$$

а с учетом принятых средних значений характеристик связки камня из смешанного вяжущего – в виде:

$$K_p = \frac{2,08 \frac{D}{Ц}}{1,84 + K_{V.MD} + K_{V.MZ}}. \quad (9)$$

Для легкого бетона на цементно-известковом вяжущем и отходах деревообработки критерий плотности определяется по формуле:

$$K_p = \frac{2,08 \frac{D}{Ц}}{1,84 + \frac{ИР}{Ц} \cdot \frac{\rho_{ц}}{\rho_{ИР}}}, \quad (10)$$

где  $ИР$ ,  $\rho_{ИР}$  – соответственно массовое содержание известкового раствора в единице объема бетона и усредненное значение его плотности.

Для составов бетона, содержащего тонкодисперсную минеральную добавку УД, песок или их смесь, критерий плотности определяется по формулам:

- при использовании в бетоне только УД или песка (П):

$$K_p = \frac{2,08 \frac{D}{Ц}}{1,84 + \frac{УД}{Ц} \cdot \frac{\rho_{ц}}{\rho_{УД}}}, \quad (11)$$

$$K_p = \frac{2,08 \frac{D}{Ц}}{1,84 + \frac{П}{Ц} \cdot \frac{\rho_{ц}}{\rho_{П}}}, \quad (12)$$

- при использовании смеси УД и песка:

$$K_p = \frac{2,08 \frac{D}{Ц}}{1,84 + \frac{УД}{Ц} \cdot \frac{\rho_{ц}}{\rho_{УД}} + \frac{П}{Ц} \cdot \frac{\rho_{ц}}{\rho_{П}}}. \quad (13)$$

В качестве критерия прочности исследуемых бетонов была предложена зависимость<sup>1</sup>, связывающая эту характеристику с основными влияющими факторами: водоцементным отношением, соотношением содержания древесного заполнителя и вяжущего и степенью сцепления древесного заполнителя с матрицей:

<sup>1</sup> Зависимость (14) получена на основе формулы И.Х. Наназашвили [5], в которой вместо эмпирических коэффициентов введены характеристики бетона, имеющие физический смысл.

$$K_R = \left[ F \cdot \frac{Ц}{Д} \left( W - \frac{В}{Ц} \right) \right]^{\frac{Ц}{В}}, \quad (14)$$

где  $F$  – показатель, характеризующий степень сцепления древесного заполнителя с растворной матрицей, зависящей от способа его минерализации, при обработке древесного заполнителя хлористым кальцием или раствором ПВК ( $F = 0,218$ );  $W$  – установленная авторами эмпирическая величина, равная 1,5 при значениях  $В/Ц$ , меньших или равных 1,45; равная 1,59 при значениях  $В/Ц$ , больших 1,45.

**Характеристика материалов и составов бетона.** При проведении экспериментов были использованы следующие материалы:

- портландцемент ПЦ 500-Д20 ОАО «Красносельскстройматериалы»;
- известковый раствор ОАО «Минскжелезобетон» (марка по прочности М4, плотность – 2600 кг/м<sup>3</sup>);
- утяжелитель доломитовый (УД) ОАО «Доломит» (плотность 2720 кг/м<sup>3</sup>);
- отвальная торфяная зола (плотность 2600 кг/м<sup>3</sup>);
- песок природный карьера «Крапужино» (плотность 2650 кг/м<sup>3</sup>);
- отходы деревообработки (древесные опилки, стружка, их смесь при содержании стружки 27 %, среднее значение плотности – 1540 кг/м<sup>3</sup>);
- химические добавки – минерализаторы древесных отходов, являющиеся одновременно и ускорителями твердения, – полиметаллический водный концентрат и хлористый кальций.

В таблице 1 приведены составы бетона на смешанном цементно-известковом вяжущем и древесных опилках. Водоцементное отношение исследуемых составов бетона находилось в пределах 1,08...1,53; водовязущее отношение – в диапазоне 0,305...0,696. Содержание цемента колебалось от 180 до 386 кг, вяжущего – от 680 до 918 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона. Отношение расхода цемента к расходу древесных заполнителей по массе (Ц/Д) колебалась от 1,35 до 2,866.

Таблица 1

Составы легкого бетона на цементно-известковом вяжущем и отходах деревообработки (древесных опилках)

Номер состава	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона								$\frac{В}{Ц}$	$\frac{В}{В + И}$	$\frac{Ц}{Д}$
	Цемент, (Ц), кг	Известковый раствор			Древесный заполнитель (Д) – опилки, кг/м <sup>3</sup>	Химические добавки, % от МЦ		Вода, л			
		Всего, кг	в том числе: известь (И), кг	песок (П), кг		ПВК	CaCl <sub>2</sub>				
1	386	386	58	328	$\frac{136}{0,96}$	–	5,2	418	1,083	0,541	2,838
2	378	540	80	460	$\frac{157}{1,08}$	2,8	–	449	1,19	0,489	2,41
3	375	375	56	320	$\frac{133}{0,94}$	1,46	–	451	1,20	0,601	2,82
4	367	400	60	340	$\frac{183}{1,0}$	1,33	–	412	1,12	0,537	2,00
5	340	340	51	289	$\frac{137}{0,97}$	–	2,35	473	1,391	0,696	2,48
6	180	726	108	618	$\frac{133}{0,902}$	2,95	–	276	1,53	0,305	1,35

В таблице 2 приведены составы древесно-цементных бетонов на других видах смешанного вяжущего: бетоны составов № 1, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12 приготовлены на вяжущем, состоящем из цемента и утяжелителя доломитового; бетоны составов № 6, 9, 13 – 17 – на вяжущем, состоящем из цемента и торфяной золы; бетоны остальных составов – на цементном вяжущем. В бетонах составов № 1 – 6, 8, 9, 14 – 17 был использован природный песок. В качестве древесных заполнителей в бетонах составов № 1 – 6 были использованы опилки, в бетонах остальных составов – стружка.

Водоцементное отношение в бетонах этой группы составов колебалось от 0,511 до 0,865, водовязущее отношение – от 0,329 до 0,686. Расход цемента варьировали от 320 до 431 кг, вяжущего – от 391 до 645 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона, величину Ц/Д изменяли от 1,466 до 2,866.

Таблица 2

Составы легкого бетона на смешанном вяжущем и отходах деревообработки

Номер состава	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> вибропрессованного бетона								$\frac{B}{C}$	$\frac{B}{Вяж.}$
	Цемент, кг	Минеральные наполнители и заполнители			Древесный наполнитель (Д), кг/м <sup>3</sup>	ПВК		Вода, л		
		песок	УД	торфяная отвальная зола		сухое вещество, % от МЦ	29 % раствор, л/кг			
1	320	169	258	–	$\frac{219}{0,84}$	7,8	$\frac{70}{87}$	227	0,708	0,393
2	336	626	–	–	$\frac{176}{0,68}$	12,2	$\frac{116}{144}$	230	0,686	0,686
3	372	346	246	–	$\frac{195}{0,75}$	12,76	$\frac{128}{159}$	242	0,650	0,392
4	366	309	220	–	$\frac{174}{0,67}$	11,56	$\frac{115}{142}$	217	0,593	0,370
5	352	297	211	–	$\frac{167}{0,64}$	12,95	$\frac{123}{153}$	198	0,562	0,352
6	372	314	–	158	$\frac{177}{0,68}$	12,95	$\frac{130}{161}$	209	0,562	0,562
7	431	–	214	–	$\frac{161}{1,34}$	11,49	$\frac{134}{166}$	373	0,865	0,578
8	386	657	–	–	$\frac{135}{1,13}$	11,56	$\frac{121}{150}$	214	0,554	0,554
9	407	346	–	173	$\frac{142}{1,19}$	12,95	$\frac{142}{177}$	249	0,612	0,429
10	403	–	224	–	$\frac{168}{1,4}$	14,39	$\frac{157}{194}$	206	0,511	0,329
11	322	–	241	–	$\frac{151}{1,26}$	16,19	$\frac{141}{175}$	206	0,640	0,366
12	389	–	216	–	$\frac{162}{1,35}$	14,39	$\frac{151}{187}$	220	0,566	0,364
13	369	–	–	154	$\frac{154}{1,28}$	14,39	$\frac{144}{187}$	190	0,515	0,363
14	373	110	–	42	$\frac{156}{1,30}$	14,39	$\frac{145}{180}$	222	0,595	0,535
15	379	125	–	66	$\frac{177}{1,48}$	16,19	$\frac{166}{205}$	230	0,607	0,517
16	351	164	–	40	$\frac{164}{1,37}$	16,19	$\frac{153}{190}$	203	0,578	0,519
17	328	266	–	37	$\frac{154}{1,28}$	23,13	$\frac{205}{254}$	182	0,555	0,499

**Анализ результатов исследований.** Оценку исследуемых свойств опилкобетона на цементно-известковом вяжущем, составы которого приведены в таблице 1, осуществляли по результатам испытания контрольных образцов-кубов с размером ребра 10 см в возрасте 28 суток твердения в воздушных условиях (при температуре 18...20 °С и относительной влажности воздуха 60...70 %). Среднюю плотность бетона в сухом состоянии определяли на кубах в соответствии с ГОСТ 12730.1-78 [15], прочность на сжатие контрольных кубов – по ГОСТ 10180-90 [16] и ГОСТ 18105.1-86 [17]. Результаты испытаний представлены в таблице 3. Из данных таблицы видно, что подобранные составы обеспечивают получение легкого бетона на известково-цементном вяжущем и древесных опилках с прочностью на сжатие в пределах 1,456...4,688 МПа и средней плотностью 896...1048 кг/м<sup>3</sup>. При этом коэффициент конструктивного каче-

ства для четырех из шести исследованных составов находился в пределах 0,0366...0,0454, что значительно выше его значений для опилкобетона таких же марок по прочности и плотности, рассчитанных нами по данным [18, 19] и находящихся в пределах 0,013...0,0217.

Таблица 3

Основные физико-механические характеристики легкого бетона на цементно-известковом вяжущем и отходах деревообработки

Номер состава	Расход, кг на 1 м <sup>3</sup> бетона			$\frac{Ц}{Д}$	$\frac{В}{Ц}$	$\frac{В}{Ц+И}$	$\rho_{бет}^{28}$ , кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие бетона в возрасте 28 сут, $R_{сж.}^{28}$ , МПа	$KKK = \frac{R_{сж.}^{28}}{\rho_{бет}}$ , кгс/см <sup>2</sup> / кг/м <sup>3</sup>
	Цемент, (Ц)	Извести, (И)	Древесного заполнителя – опилок, (Д)						
1	386	58	$\frac{136}{0,96}$	2,838	1,083	0,541	1033	4,688	0,0454
2	378	80	$\frac{157}{1,08}$	2,41	1,19	0,489	1048	3,95	0,0377
3	375	56	$\frac{133}{0,94}$	2,82	1,20	0,601	945	3,819	0,0404
4	367	60	$\frac{183}{1,0}$	2,00	1,12	0,537	896	3,276	0,0366
5	340	51	$\frac{183}{1,0}$	2,48	1,391	0,696	926	2,384	0,0257
6	180	108	$\frac{133}{0,902}$	1,35	1,53	0,305	1020	1,456	0,0143

Составы бетонов, приведенные в таблице 2, были опробованы в процессе изготовления мелкоштучных пустотных вибропрессованных стеновых блоков размером 190×188×395 мм и пустотностью 34 %. Отформованные на вибропрессе блоки хранились до достижения возраста 28 суток в воздушных условиях при температуре 18...20 °С и относительной влажности 60...70 %, после чего их испытывали на сжатие в соответствии с СТБ 1008-95 [19]. Параллельно с блоками изготавливали контрольные кубы размером 10×10×10 см, которые после выдерживания в воздушных условиях до достижения возраста 28 суток высушивали до постоянной массы, после чего определялась их средняя плотность. Результаты испытаний представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты испытаний легкого бетона на смешанном вяжущем и отходах деревообработки

Номер состава	Расход, кг на 1 м <sup>3</sup> бетона:					$\frac{В}{Ц}$	$\frac{В}{Вяж.}$	Средняя плотность бетона ( $\rho_{бет}^{28}$ ), г/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие блока в возрасте 28 сут, $R_{сж.бл.}^{28}$ , МПа
	цемент (Ц), кг	УД	торфяная отвальная зола	песок (П)	древесный заполнитель (Д), кг/м <sup>3</sup>				
1	320	258	–	169	219	0,708	0,393	1055	0,908
2	336	–	–	626	176	0,686	0,686	1246	1,166
3	372	246	–	346	195	0,650	0,392	1275	1,200
4	366	220	–	309	174	0,593	0,370	1182	1,293
5	352	211	–	297	167	0,562	0,352	1138	1,040
6	372	–	158	314	177	0,562	0,562	1140	1,323
7	431	214	–	–	161	0,865	0,578	939	0,680
8	386	–	–	657	135	0,554	0,554	1297	0,887
9	407	–	173	346	142	0,612	0,429	1199	0,959
10	403	224	–	–	168	0,511	0,329	931	0,843
11	322	241	–	–	151	0,640	0,366	826	0,731
12	389	216	–	–	162	0,566	0,364	898	0,705
13	369	–	154	–	154	0,515	0,363	800	0,153
14	373	–	42	110	156	0,595	0,535	807	0,746
15	379	–	66	125	177	0,607	0,517	880	0,693
16	351	–	40	164	164	0,578	0,519	842	0,623
17	328	–	37	266	154	0,555	0,499	923	0,564

Примечание. В составах № 1 – 6 использованы древесные опилки, в остальных – стружка.

Из приведенных данных видно, что бетоны подобранных составов обеспечивают получение блоков с прочностью на сжатие 0,908...1,323 МПа и средней плотностью в состоянии естественной влажности 11...13,6 %, равной 648...1097 кг/м<sup>3</sup>, при использовании в бетонах древесных опилок и соответственно 0,623...0,959 МПа и 508...749 кг/м<sup>3</sup> при использовании стружки.

**Математические зависимости плотности и прочности бетона.** На основе анализа структурных особенностей исследуемых легких бетонов на смешанном вяжущем и отходах деревообработки были получены аналитические зависимости для определения комплексных критериев оценки исследуемых характеристик – критерия плотности  $K_p$  и критерия прочности  $K_R$ , позволяющих оценить влияние вида и соотношения компонентов бетона на его плотность и прочность на сжатие.

Для вывода математических зависимостей плотности бетона были рассчитаны величины критериев  $K_p$  для составов, приведенных в таблицах 1 и 2, при значениях истинной плотности компонентов бетона (цемента – 3200 кг/м<sup>3</sup>; цементно-известкового раствора – 2600 кг/м<sup>3</sup>; утяжелителя доломитового – 2720 кг/м<sup>3</sup>; песка – 2650 кг/м<sup>3</sup>; древесного заполнителя – 1540 кг/м<sup>3</sup>) и выполнен с применением методов математической статистики анализ функциональной зависимости плотности исследуемых бетонов от критерия плотности. На основании проведенного анализа были получены аналитические зависимости для определения плотности легких бетонов на смешанном вяжущем и отходах деревообработки:

- для составов бетона на цементно-известковом вяжущем и древесных опилках:

$$\rho = (1,76 - 3,07K_p) \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3; \quad (15)$$

- для составов, содержащих УД, песок, отвальную торфяную золу и т.п. или их смесь, при использовании древесных опилок:

$$\rho = (1,06 - 1,35K_p) \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3; \quad (16)$$

- при использовании стружки:

$$\rho = (1,7 - 2,38K_p) \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3. \quad (17)$$

Степень корреляции опытных данных плотности бетонов исследуемых составов с расчетными значениями представлены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5

Сравнение расчетных и экспериментальных значений средней плотности и прочности на сжатие легкого бетона на цементно-известковом вяжущем и отходах деревообработки (древесных опилках)

Номер состава	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>				Прочность при сжатии в возрасте 28 сут, МПа			
	экспериментальные значения	расчетные значения			экспериментальные значения	расчетные значения		
		$K_p$	$\rho_{расч.}$	$\Delta (\pm), \%$		$K_p$	$R_{сж.}^{расч.}$	$\Delta (\pm), \%$
1	1033	0,238	1030	-0,3	4,688	0,287	4,53	-3,37
2	1048	0,240	1024	-2,3	3,95	0,217	3,53	-10,6
3	945	0,240	1024	+8,36	3,819	0,245	3,93	+2,88
4	896	0,326	759	-15,0	3,276	0,201	3,3	+0,7
5	926	0,273	922	-0,4	2,384	0,131	2,3	-3,52
6	1020	0,227	1064	+4,31	1,456	0,073	1,48	+1,65

Как видно из приведенных данных, максимальные отклонения расчетных значений от экспериментальных данных составили (+8,74 %) и (-13,9 %), что для таких сложных композиционных материалов можно считать вполне приемлемым; предложенные зависимости позволяют выполнить расчетную оценку плотности подобных бетонов с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Аналогично, по зависимости (14) были рассчитаны критерии прочности  $K_R$  для составов опилкобетона на цементно-известковом вяжущем (см. табл. 5).

В результате анализа и математической обработки экспериментальных данных была получена аналитическая зависимость для определения прочности на сжатие опилкобетона на цементно-известковом вяжущем:

$$R_{сж.бет.}^{28} = 14,3K_R + 0,43. \quad (18)$$

Сравнение расчетных значений с опытными данными показало удовлетворительную их сходимость: максимальные отклонения находились в пределах от (+0,7 %) до (-10,6 %).

По аналогии с опилкобетоном на цементно-известковом вяжущем были рассчитаны по формуле (14) значения  $K_R$  для легких бетонов на смешанном вяжущем и отходах деревообработки (см. табл. 6). Значения прочности бетона для этих составов были определены по значениям прочности пустотных вибропрессованных блоков, изготовленных из бетонов этих составов с использованием расчетной зависимости, предложенной в работах [8, 9]:

$$R_{\text{бл.}}^{28} = 0,6(1 - P_{\text{бл.}})R_{\text{бет.}}^{28}, \quad (19)$$

где  $R_{\text{бл.}}^{28}$ ,  $R_{\text{бет.}}^{28}$  – соответственно значения прочности на сжатие блока и бетона, из которого изготовлен блок, МПа;  $P_{\text{бл.}}$  – пустотность блока в относительных единицах.

Таблица 6

Сравнение расчетных и экспериментальных значений средней плотности бетона на смешанном вяжущем и отходах деревообработки и прочности на сжатие блоков

Номер состава	Средняя плотность кубов, кг/м <sup>3</sup>				Прочность на сжатие в возрасте 28 сут, МПа				
	Расчетные значения		$\rho_{\text{экс.}}$	$\Delta (\pm), \%$	кубы		блоки		
	$K_R$	$\rho_{\text{расч.}}$			$K_R$	$R_{\text{сж.бет.расч.}}^{28}$	$R_{\text{сж.бет.расч.}}^{28}$	$R_{\text{сж.бет.экс.}}^{28}$	$\Delta (\pm), \%$
1	0,398	1063	1055	+0,76	0,143	2,323	0,920	0,908	+1,31
2	0,266	1241	1246	-0,40	0,207	3,027	1,199	1,166	+2,80
3	0,283	1218	1275	-4,47	0,202	2,972	1,177	1,152	+2,16
4	0,277	1226	1182	+3,72	0,228	3,258	1,290	1,293	-0,23
5	0,278	1222	1138	+7,38	0,224	2,686	1,064	1,040	+2,27
6	0,293	1204	1140	+5,61	0,223	3,203	1,268	1,323	-4,16
7	0,303	979	939	+4,26	0,320	1,975	0,782	0,680	+15,0
8	0,187	1255	1297	-0,24	0,385	2,422	0,959	0,887	+8,12
9	0,214	1191	1199	-0,67	0,382	2,402	0,951	0,959	-0,83
10	0,348	872	931	-6,34	0,275	-	-	0,843	-13,4
11	0,359	846	826	+2,42	0,239	1,601	0,634	0,731	-13,3
12	0,347	874	898	-2,67	0,281	1,754	0,695	0,705	-1,42
13	0,368	824	800	+3,00	0,276	1,722	0,682	0,653	+4,43
14	0,372	815	807	+1,00	0,283	1,767	0,700	0,746	-6,17
15	0,396	758	880	-13,90	0,237	1,588	0,629	0,693	-9,24
16	0,382	791	842	-6,06	0,233	1,446	0,573	0,623	-8,03
17	0,331	912	923	-1,19	0,226	1,401	0,555	0,564	-1,60

В результате математической обработки и анализа данных были получены следующие аналитические зависимости для определения прочности на сжатие бетонов на смешанном вяжущем и отходах деревообработки:

- для бетонов с применением УД, песка или их смеси и древесных опилок:

$$R_{\text{сж.бет.}}^{28} = 11K_R + 0,75; \quad (20)$$

- для таких же бетонов с применением древесной стружки:

$$R_{\text{сж.бет.}}^{28} = 6,42K_R + 0,05. \quad (21)$$

Для проверки достоверности результатов, полученных по зависимости (20) и (21), были рассчитаны по формуле (19) значения прочности на сжатие кубиков, изготовленных из бетонов, составы которых приведены в таблице 2.

Сравнение расчетных значений с экспериментальными данными, приведенное в таблице 6, показывает их удовлетворительную сходимость: максимальные отклонения находились в пределах (+15 %) ... (-13,4 %). Это свидетельствует о том, что предложенные зависимости позволяют с достаточной для инженерных расчетов точностью рассчитывать значения прочности легкого бетона на смешанном вяжущем и отходах деревообработки.

Одновременно полученные результаты подтверждают достоверность эмпирического коэффициента перехода ( $K_{\text{пер}} = 0,6$ ) от прочности бетона к прочности блока, выполненного из этого бетона.



**Заключение**

1. Исследовано влияние состава легких бетонов на смешанном вяжущем и отходах деревообработки на их основные физико-механические характеристики – среднюю плотность и прочность при сжатии.
2. На основании полученных результатов предложены критерии плотности и прочности при сжатии, связывающие эти характеристики бетонов с влияющими факторами, и расчетные зависимости для определения этих критериев и исследуемых характеристик бетонов.
3. Достоверность результатов, полученных с использованием предложенных расчетных зависимостей, подтверждена результатами испытания контрольных образцов и пустотных мелкоштучных стеновых блоков.
4. Предложенные зависимости позволяют еще на стадии проектирования составов бетона прогнозировать значения его основных физико-механических характеристик – средней плотности и прочности при сжатии, что является весьма важным их достоинством.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Бибик, М.С. Возможности получения легкого бетона на цементно-известковом вяжущем и отходах деревообработки / М.С. Бибик, И.И. Тулупов // Строительная наука и техника. – 2005. – № 3. – С. 23 – 25.
2. Кауфман, Б.Н. Теплопроводность строительных материалов / Б.Н. Кауфман. – М.: Стройиздат, 1955.
3. Бибик, М.С. Влияние состава легкого бетона на цементно-известковом вяжущем и отходах деревообработки на его влажность в различном возрасте / М.С. Бибик, И.И. Тулупов // Строительная наука и техника. – 2006. – № 5. – С. 70 – 77.
4. Куннос, Г.Я. Опилкобетон / Г.Я. Куннос. – Рига: АН Латв.ССР, 1960. – 25 с.
5. Наназашвили, И.Х. Строительные материалы из древесно-цементных композиций / И.Х. Наназашвили. – Л.: Стройиздат, 1990. – 415 с.
6. Щербаков, А.С. Технология композиционных древесных материалов / А.С. Щербаков, И.А. Гамова, Л.В. Мельникова. – М.: Экология, 1992. – 192 с.
7. Цепасев, В.А. Легкие конструкционные бетоны на древесных заполнителях / В.А. Цепасев, А.К. Яворский, Ф.И. Хадонова. – Орджоникидзе: ИР, 1990. – С. 33.
8. Борвонов, В.А. Структура, плотность и прочность арболита с тонкодисперсными минеральными добавками / В.А. Борвонов, Н.П. Блещик, И.И. Тулупов // Архитектура и строительство. – 2003. – № 5. – С. 54 – 56.
9. Провести исследования, разработать и внедрить рекомендации по применению в строительстве вторичных продуктов промышленных предприятий Беларуси: отчет о НИР (заключ.) / Белорус. нац. ун-т; рук. темы Н.П. Блещик. – № ГР 19983900. – Минск, 2002. – 439 с.
10. Полиметаллический водный концентрат для бетонов и строительных растворов. Технические условия: СТБ 1113-98.
11. Кальций хлористый кальцинированный. Технические условия: ГОСТ 450-77 с изм.
12. Арболит / под ред. Г.А. Бужевича. – М.: Изд-во лит. по строительству, 1968. – 244 с.
13. Исследовать, разработать и внедрить энергосберегающую интенсивную технологию возведения монолитных каркасных зданий и сооружений из высокопрочного бетона: отчет по НИР (заключ.) / БелНИИС; рук. темы Н.П. Блещик. – Минск, 2003. – 615 с.
14. Блещик, Н.П. Математические модели кинетики гидратации цемента / Н.П. Блещик, Н.С. Протько, М.Н. Рыскин // Инженерные проблемы современного бетона и железобетона. Технология сборного и монолитного бетона и железобетона: материалы междунар. конф. – Минск, 1997. – Т. 2. – С. 25 – 36.
15. Бетоны. Методы определения плотности: ГОСТ 12730.1-78.
16. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-90. Бетоны.
17. Бетоны. Правила контроля прочности: ГОСТ 18105.1-86.
18. Ибрагимов, Ж.А. Производство мелкоштучных стеновых блоков для индивидуального строительства: справ. пособие / Ж.А. Ибрагимов. – М.: Стройиздат, 1999. – С. 93.
19. Камни бетонные стеновые. Общие технические условия: СТБ 1008-95.

*Поступила 14.05.2007*