

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СВОЙСТВ ШТУКАТУРОК ИЗ СУХИХ СМЕСЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫЕ ВОЛОКНА TECHNOCEL®

Антонюк Н.Р., Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. (*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*)

Айзман Б.П., Карапузов Е.К., Спектор Ю.П. (*Ассоциация производителей сухих строительных смесей Украины – АПСССУ, г. Киев*)

Введение. За счет дисперсного распределения армирующих компонентов в хрупких матрицах решен широкий комплекс инженерных задач, в том числе в строительстве. У строительных композитов, в частности, улучшаются деформативные свойства, повышается способность к сопротивлению циклическим и ударным нагрузкам и т.п. Большинство исследований и технических решений находится в области прочных и высокопрочных хрупких матриц на основе технических силикатов. В то же время для строительных композитов с хрупкими матрицами низкой прочности аналогичные проблемы, в частности повышения трещиностойкости, стоят не менее остро, причем прямой перенос научных результатов из сферы высокопрочных матриц не всегда представляется правомерным.

Такие композиты – штукатурки для объектов, требующих гарантированного уровня качества защитно-декоративных покрытий. Здесь полезными оказываются волокна целлюлозы, использование которых в виде суспензий известно давно. Но сухие строительные полимеро-минеральные смеси, являющиеся основой современных эффективных технологий отделочных работ, могут включать только сухие волокна. Специальные фракционированные целлюлозные волокна Technocel® длиной 220-2500 мкм (средний диаметр около 25 мкм) выпускает из природного сырья фирма CFF (Cellulose-Fullstoff-Fabrik). Эти волокна существенно влияют и на реологию системы «сухая смесь + вода» [1, 2] и на физико-механические показатели затвердевшего композита [3]. Предмет анализируемого этапа исследований – влияние целлюлозных волокон на свойства композитов в первые сроки твердения, когда появление сетки трещин на штукатурке приводит к некондиционным результатам.

Особенности натурального эксперимента и результаты моделирования. Базовый состав принят по рекомендации АПСССУ. В эксперименте оставались постоянными (на 100 м. ч. сухой смеси): портландцемент – 30, известь – 4, общее количество минерального наполнителя – 61, полимерный редиспергируемый порошок Vinnapas RI 551Z – 2,

суперпластификатор Melment – 0.2, антивспениватель – 0.02.

По оптимальному плану из 18 точек варьировалось 4 фактора:

- для управления жестким каркасом изменялось количество тонкомолотого FG (350 м²/кг) кварцевого песка $X_1 = 18.3 \pm 6.1$; поскольку общая масса трехкомпонентного минерального наполнителя постоянна (61 м.ч.), то при сохранении соотношения (1: 0.22) между кварцевым стекольным песком и омиакарбом (450 м²/кг) суммарное количество этих ингредиентов с ростом FG уменьшалось от 48.8 до 36.6 м.ч.;

- X_2 – доля длинных (номинал 2500 мкм) волокон LF в смеси с мелкими (номинал 220 мкм) изменялась от 0 до 100%; основываясь на реологических испытаниях волокон в суспензиях [1], в смеси ожидалось проявления синергетических эффектов;

- основной исследуемый фактор $X_3 = 0.35 \pm 0.15$ – количество целлюлозных волокон FC, вводимых в сухую смесь;

- добавка метилцеллюлозы MC, необходимой для стабилизации системы «сухая смесь + вода» (но увеличивающей ее водопотребность при условии постоянства вязкости), изменялась в диапазоне $0.1 \leq X_4 \leq 0.25$; условная молекулярная масса MC – 10000 [1].

Факторы стандартно нормализованы как $x_i = (X_i - X_{i,0})/\Delta X_i$.

Свойства затвердевшего композита определялись при количестве воды, соответствующем равной эффективной вязкости η системы «сухая смесь + вода». При малых градиентах скорости деформаций $\dot{\gamma}' = 0.1 \text{ с}^{-1}$ уровень вязкости должен быть $\eta = 1500 \text{ Па}\cdot\text{с}$. При этом сначала кривые вязкости описывались моделью Оствальда-Вейля, а потом использовались логарифмические модели $V/\dot{\gamma}' = a_0 + a_1 \cdot \ln \eta_{01}$ по методике, описанной в [2].

Построен комплекс экспериментально-статистических моделей (ЭСМ), в которых оставлены только значимые ($\alpha = 0.1$) оценки коэффициентов. Фрагмент этого комплекса приведен в табл. 1.

Для анализа результатов привлечены методы концепции полей свойств материалов [4]. В соответствии с целями исследования локальные поля образованы при градиентных факторах x_3 (FC – фибра целлюлозная) и x_4 (MC – метилцеллюлоза); изменяющие факторы x_1 (FG – тонкомолотый кварц) и x_2 (LF – доля длинных волокон). Описания локальных полей получены при подстановке соответствующих уровней x_1 и x_2 в описания полных полей (табл. 1).

Влияние факторов состава на прочность композита. Наибольший инженерный интерес представлял уровень предела прочности на растяжение при изгибе $R_{\text{вгб.з}}$, который из всех анализируемых показателей должен быть наиболее тесно связан с трещиностойкостью штукатурки в раннем возрасте.

Таблица 1. Фрагмент комплекса четырехфакторных ЭСМ

	R_{btb3} , МПа	R_{b3} , МПа	R_{b28} , МПа	W, %	W_c , %	В/Ц
b_0	2.03	6.21	16.96	7.44	4.13	0.774
b_1	-0.05	-0.15	0	0.33	0	0.025
b_2	0	0.31	0	0	-0.61	-0.003
b_3	0	0	-1	0	0	0.020
b_4	0	0.12	-0.34	0.57	0	0.010
b_{11}	-0.15	0	0	0	0.54	-0.015
b_{22}	0.14	0.14	0.91	-0.54	0	0
b_{33}	0.08	0.54	1.11	0.40	-0.56	-0.017
b_{44}	0	0	-1.53	1.58	0	0.046
b_{12}	0.04	0.31	-0.33	0	-0.41	0
b_{13}	0.12	0.50	0.46	-0.86	-0.39	-0.01
b_{14}	0	0.24	0.44	0	0	0
b_{23}	0.06	0.46	0	-0.38	-0.54	0
b_{24}	0.05	0.45	0	0	-0.40	0.008
b_{34}	0.09	0.60	0	0	-0.22	0

Локальные поля прочности $R_{btb.3}(x_3, x_4)$ показаны на рис.1. Под влиянием изменяющих факторов поле свойства трансформируется достаточно сильно. При среднем количестве тонкомолотого кварца ($x_1 = 0$ или $FG = 18.3$ м.ч.) диапазон изменения прочности в пределах полей узок (0.2-0.3 МПа), и затруднительно отдать предпочтение каким-либо составам, судя по форме поверхности. Если доля FG увеличивается до верхнего уровня, то проявляется тенденция к росту прочности при одновременном повышенном содержании и целлюлозных волокон и метилцеллюлозы ($x_3 = x_4 = +1$).

Для количественной оценки влияния волокон Technocel использованы два обобщающих показателя полей свойств, которые определены исходя их целей исследования. Предложено [5] учитывать уровни свойства Y композита состава A , при максимальной дозировке метилцеллюлозы MC и волокон FC , и состава B , при минимальной их дозировке (рис. 1, поле в верхнем правом углу). Поскольку дозировка метилцеллюлозы определяется необходимостью повышения водоудерживающей способности системы «сухая смесь + вода», то учтен уровень свойства при третьем составе C , когда MC на верхнем уровне ($x_2 = +1$), а волокон мало ($x_1 = -1$).

Первый симплекс $E\{Y\} = Y_A/Y_B$ – эффективность введения волокон при минимальной дозировке MC . Вторым $e\{Y\} = Y_A/Y_C$ – эффектив-

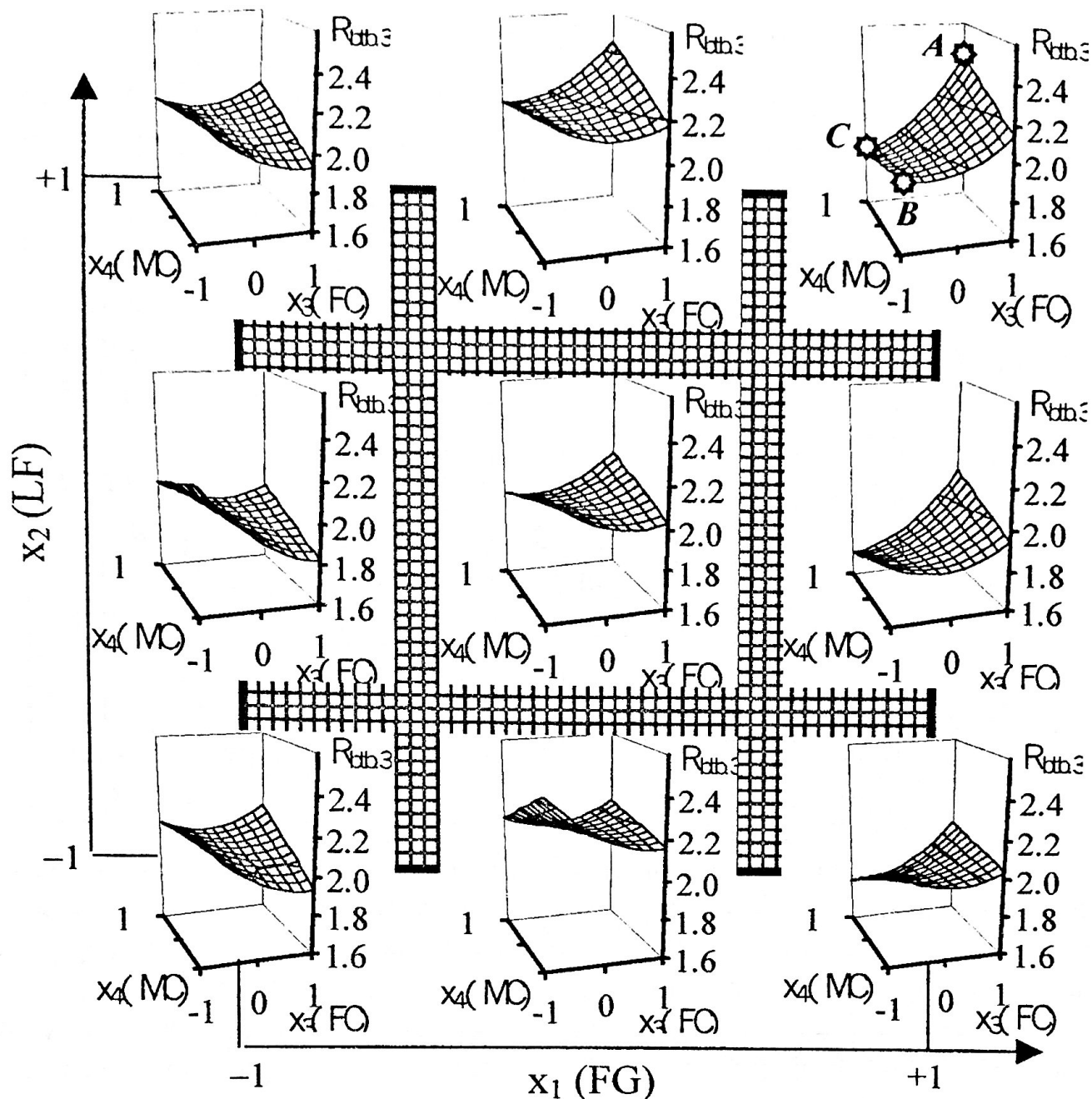


Рис. 1. Девять локальных полей предела прочности $R_{btb.3}$ в координатах количества целлюлозных волокон (FG) и метилцеллюлозы (MC)

ность при ее максимальном уровне. Влияние изменяющих факторов – количества тонкомолотого кварца $x_1(FG)$ и доли длинных волокон $x_2(LF)$ на эти критерии эффективности описано комплексом вторичных неполных кубических ЭСМ.

Так, для критерия $E\{R_{btb.3}\}$ получена модель с 3 значимыми ($\alpha=0.1$) коэффициентами $E\{R_{btb.3}\} = 1.01 + 0.11x_1 + 0.09x_2 + 0.01x_1x_2$.

Изолинии критерия эффективности $E\{R_{btb.3}\} \geq 1$ и критерия $e\{R_{btb.3}\} \geq 1$ показаны на рис. 2.а. Там же приведены максимальные и минимальные уровни в пределах факторного пространства $\{x_3, x_4\}$ критериев $E\{R_{btb.3}\}$ (над чертой) и $e\{R_{btb.3}\}$ (под чертой).

Результаты позволяют сделать ряд существенных заключений:

⇒ Technocel повышает (примерно на 20%) предел прочности $R_{\text{btb.3}}$, а следовательно увеличивает трещиностойкость штукатурки в раннем возрасте, при выполнении ряда условий – при одновременном введении достаточного количества длинных целлюлозных волокон и оптимального количества тонкомолотого кварца (более 20 м.ч.);

⇒ рост эффективности происходит интенсивно именно в той области $\{x_3, x_4\}$, где у системы «сухая смесь + вода» повышена водопотребность; рост содержания и трубчатых целлюлозных волокон и метилцеллюлозы увеличивают В/Ц при постоянной вязкости, что отражается коэффициентами соответствующей модели в табл. 1;

⇒ в «слабых» матрицах с низким модулем упругости длинные целлюлозные волокна, защемленные между зернами минерального каркаса, могут на участках, ориентированных вдоль растягивающих усилий, перераспределять напряжения и тем самым повышать несущую способность композита.

Эти заключения об эффективности волокон Technocel в ранние сроки твердения подтверждаются и полями $E\{R_{\text{btb.3}}\}$ и $e\{R_{\text{btb.3}}\}$ на рис. 2.б. Но увеличение предела прочности на сжатие объясняется не только перераспределением нормальных напряжений, но и тем, что объемная «сеть» из многократно изогнутых волокон задерживает сдвигающие деформации в «слабой» матрице.

При твердении композита возрастают его прочность и упругость; при этом положительная роль целлюлозных волокон постепенно уменьшается. Трубочатые волокна в прочной матрице не могут работать как дисперсное армирование – они становятся дополнительными полостями-дефектами. Для композитов с лучшими результатами в раннем

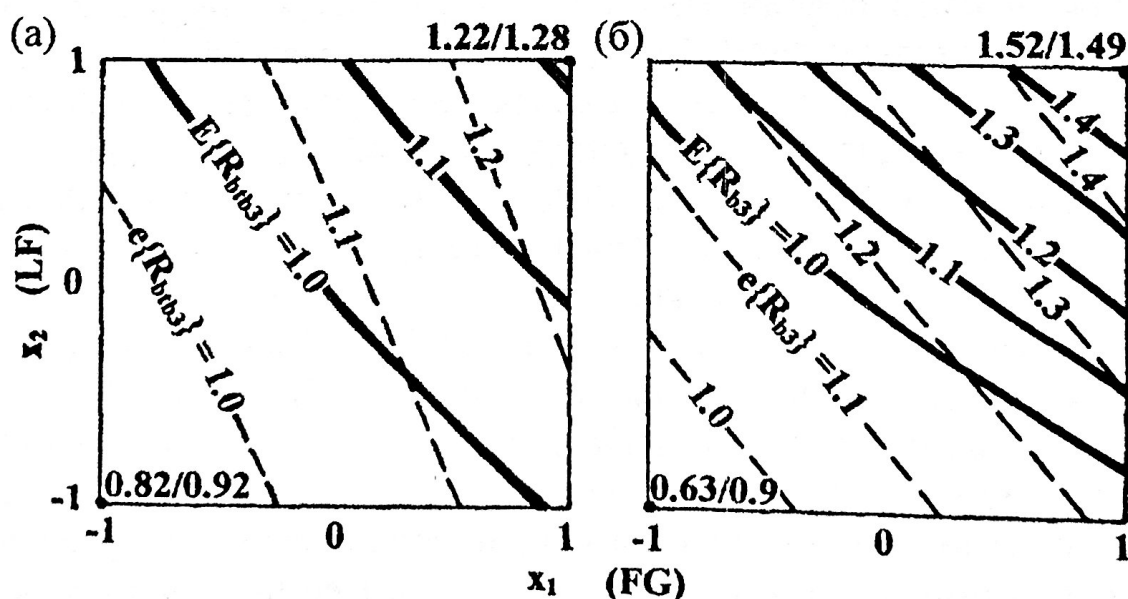


Рис. 2. Поля критериев эффективности $E\{R_{\text{btb.3}}\}$ (сплошные линии) и $e\{R_{\text{btb.3}}\}$ (штриховые линии) введения в сухие смеси волокон Technocel для пределов прочности на растяжение при изгибе (а) и при сжатии (б)

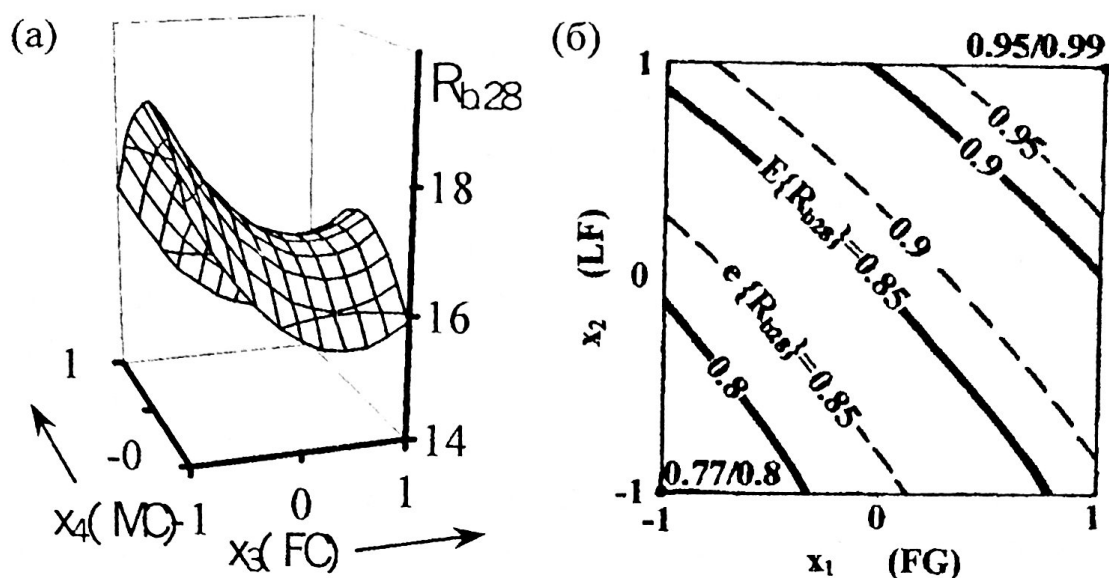


Рис. 3. Поле $R_{b,28}$ при $x_1=x_2=+1$ после 28 суток твердения композита (а) и изолинии критериев эффективности волокон (б) с уровнями ниже 1

возрасте на рис. 3.а. показано поле предела прочности при сжатии после 28 суток твердения. При любом содержании метилцеллюлозы увеличение дозировки длинных волокон снижает прочность – коэффициенты эффективности (рис. 3.б) находятся в пределах менее 1, а при коротких волокнах опускаются до 0.77.

Влияние факторов состава на водопоглощение композита и капиллярный подсос. Введение целлюлозных волокон, если предварительно судить по массовому водопоглощению W и капиллярному подсосу W_c , существенно меняет поровую структуру композита. На рис. 4 представлены поля эффективности волокон по показателям W и W_c (приводятся только изолинии с уровнем менее 1).

Целлюлозные волокна в сочетании с оптимальным зерновым составом минерального наполнителя уменьшают общую открытую пористость приблизительно на 10-15% (рис. 4.а) вне зависимости от длины волокон. Однако длина волокна оказывается существенным фактором для величины капиллярного подсоса (рис. 4.б). Введение длинных волокон снижает его почти вдвое – при прочих равных условиях увеличивается доля капилляров большого диаметра, что улучшает эксплуатационные свойства штукатурки.

Заключение. Целлюлозные волокна Technosel являются полезным компонентом сухих строительных смесей, предназначенных для высококачественных штукатурных работ. Несмотря на увеличение водопотребности системы «сухая смесь + вода», длинные волокна повышают пределы прочности композитов в ранние сроки твердения, увеличивают трещиностойкость штукатурки, регулируют ее поровую структуру, снижая водопоглощение и капиллярный подсос.

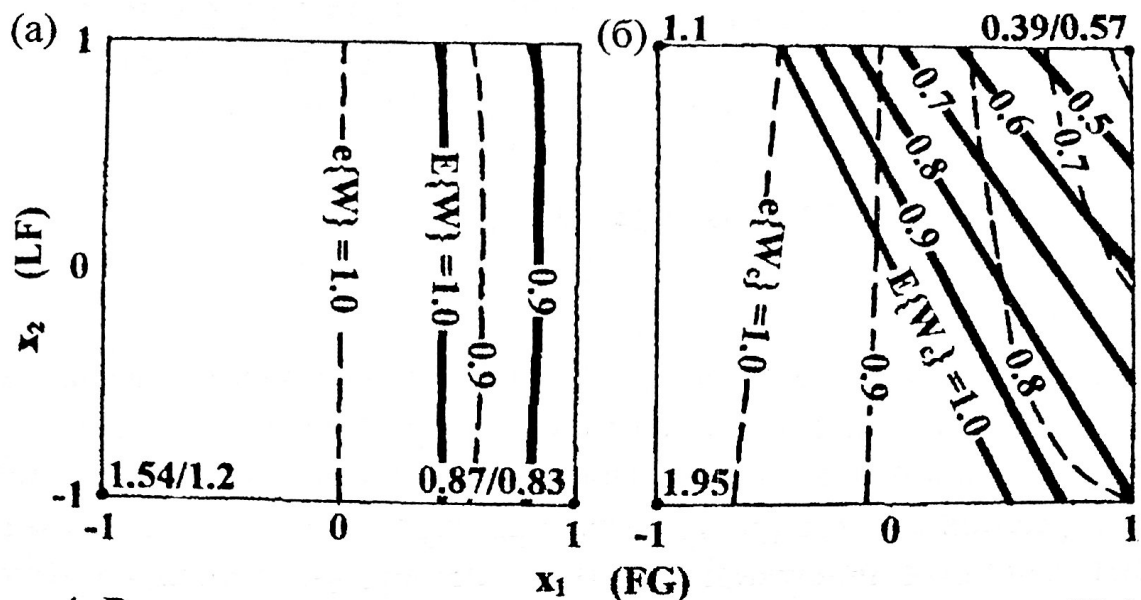


Рис. 4. Влияние целлюлозных волокон на водопоглощение W (а) и капиллярный подсос W_c (б) композита в возрасте 28 суток

Литература

1. Моделирование и анализ реологических показателей системы «известь – вода – целлюлозные волокна» / Т.В. Ляшенко, В.А. Вознесенский, Н.Р. Антонюк, Е.К. Карапузов // Композиційні матеріали для будівництва. Вісник ДДАБА, 2002-1 (32). – Макіївка, 2002. – С. 93-98.
2. Моделирования влияния системы «целлюлозные волокна – метилцеллюлоза – суперпластификатор» на водопотребность сухих строительных смесей / Н.Р. Антонюк, В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Е.К. Карапузов, В.Г. Соха // Композиційні матеріали для будівництва. Вісник ДДАБА, 2003-1. – Макіївка, 2003.
3. Антонюк Н.Р. Свойства штукатурных композитов из сухих строительных смесей, содержащих целлюлозное волокно / Структура и свойства искусственных конгломератов: Междунар. сб. науч. тр.: – Новосибирск: НГАУ, 2002. – С. 59-61.
4. Ляшенко Т.В. Поля свойств строительных материалов (концепция, анализ, оптимизация). Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.05 / ОГАСА. – Одесса, 2003. – 34 с.
5. Антонюк Н.Р., Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. Специальные обобщающие показатели полей свойств дисперсно армированных композитов // Моделирование и оптимизация композитов: Мат-лы междунар. сем. МОК'42. – Одесса, 2003.