

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.327:666.973:539.4

А.П. ПИЧУГИН, В.Ф. ХРИТАНКОВ, О.Е. СМИРНОВА, М.А. ПИЧУГИН

ПРОЧНОСТЬ ГРАНУЛ КРУПНОГО ПОРИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ В ЛЕГКОМ БЕТОНЕ

При решении задачи получения и исследования легких крупнопористых бетонов на основе растительных сырьевых ресурсов были изучены физико-механические свойства нового материала и подтверждена возможность его использования в качестве крупного заполнителя. Разработаны рациональные составы материала и защитной композиции для гранул из соломы, камыша, торфа, коры и пр., способствующие повышению прочностных параметров. Дальнейшее изучение свойств потребовало провести комплекс исследований по эксплуатационной стойкости легкого бетона под нагрузкой и определить максимально допустимые напряжения как в самом бетоне, так и в гранулах из растительного сырья до образования трещин. Испытания и расчеты показали, что наиболее уязвимым местом в крупнопористом легком бетоне является контактная зона между крупным заполнителем и цементной матрицей.

Ключевые слова: легкий бетон, гранулы из растительного сырья, внешние и внутренние напряжения, цементная матрица, трещинообразование, контактная зона крупного заполнителя.

DOI 10.32683/0536-1052-2020-743-11-28-41

Важными характеристиками легкого бетона на пористом органическом заполнителе являются его прочностные показатели, которые определяются свойствами поверхности крупного заполнителя и адгезионными качествами цементного вяжущего. Известно, что повышению прочности контактной зоны заполнителя с цементным камнем способствует ряд различных рецептурных и технологических факторов, в том числе прочность самих гранул и количество цементного теста, приходящегося на единицу площади заполнителя.

Необходимость в пористых заполнителях в последние годы увеличилась почти в 2 раза и достигает десятки миллионов кубических метров в год. Производство пористых заполнителей не всегда удовлетворяет нуждам современного строительства не только по объему, но и по цене и качеству. Расширение производства пористых заполнителей может быть организовано за счет переработки органических отходов промышленности и местного сырья, а также отходов деревообработки, коры, соломы, льна, камыша, торфа и др.

© Пичугин А.П., Хриτανков В.Ф., Смирнова О.Е., Пичугин М.А., 2020

Запасы бросовых сырьевых ресурсов оцениваются миллионами тонн практически во всех регионах страны.

Ранее авторами была разработана рецептура и технология производства легкого бетона на пористых органических заполнителях с защитой гранул полимерсиликатной композицией. Выбор целесообразного направления производства пористого крупного заполнителя зависит от объемов сырьевой базы, технологических особенностей, трудовых затрат, энергопотребления, направлений использования легких бетонов, качественных характеристик получаемого материала. Оценка рациональности осуществляется на основе сравнительного технико-экономического анализа производства и применения пористых заполнителей в условиях региона, основным инструментом которого служат удельные капитальные вложения и себестоимость [1, 2].

На наш взгляд, одним из определяющих факторов обеспечения качества и эффективности крупного пористого заполнителя являются его физико-механические и эксплуатационные свойства, важнейшими из которых можно считать прочность и насыпную плотность или пористость. Получение из растительного сырья высококачественного заполнителя может быть организовано путем гранулирования и обеспечения требуемых характеристик в заданных пределах. Анализ напряженного состояния при изготовлении гранулированного заполнителя из растительного сырья и отходов показал, что процесс формирования гранул при прохождении растительной массы (соломы, торфа, камыша, коры, отходов лесопиления и деревообработки) через фильтры можно представить в виде последовательности следующих основных операций. Прессовочная масса заполняет свободные полости и подвергается сжатию плунжером. По мере сжатия прессовочной массы до величины превышения сил упругости над силами трения растительных частиц о стенки канала формируется достаточно прочная агрегатная структура, плотность и связность которой зависят от вида исходного сырья, его дисперсности, влажности и температуры разогрева прессовочной массы. При этом требуется отметить, что плотность гранул не должна быть высокой, но гранулы должны обладать определенной прочностью [3–8].

Рассматривая элементарный цикл продвижения гранулы по каналу, можно представить продвижение формирующей агрегатной структуры и приращение ее длины на величину Δ , которую условно назовем подачей, а сам слой, образованный за один рабочий цикл, – элементарным. Если провести сечение вдоль оси канала, формирующего гранулу, то на расстоянии L от линии предыдущего слоя можно рассмотреть несколько зон напряженного состояния [8–12].

Напряжение сжатия в сечении будет σ , а в сечении, отстоящем на dL , равно $\sigma + d\sigma$. На слой плиты толщиной dL действуют сила прессования с напряжением σ_x , сила бокового распора с напряжением σ_y и сила трения с напряжением τ , которые связаны между собой следующими зависимостями:

$$\sigma_y = \mu\sigma_x, \quad (1)$$

$$\tau = f\mu\sigma_x, \quad (2)$$

где μ – коэффициент бокового распора;

f – коэффициент трения пресс-массы о стенки канала пресса.

В момент равновесия между усилием прессования и внутренним сопротивлением пресс-массы

$$d\sigma_x \omega - \mu f \sigma_x dLU = 0, \quad (3)$$

где U – периметр сечения канала пресса;

ω – площадь сечения канала пресса.

После интегрирования и потенцирования уравнения (3) получим:

$$\sigma_B = \sigma_c e^{\alpha \Delta}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\mu f U}{\omega}, \quad (5)$$

где e – основание натурального логарифма.

Допустим, что σ_c является подвижным упором, предназначенным для формирования гранулы. Также можно предположить, что упругость растительных частиц для определенного вида сырья при перемещении по каналу пресса элементарного слоя не меняется, а сам канал является идеально жестким и высота его по всей длине одинакова ($\delta = \text{const}$).

В момент холостого хода плунжера часть запрессованных слоев на некотором участке за счет упругости растительных частиц распрессуется. По мере перемещения элементарного слоя по каналу пресса амплитуда распрессовки уменьшается вследствие тормозящего влияния сил трения вышележащих слоев. В какой-то определенной точке между силами упругости и силами трения наступит равновесие, и величина элементарного слоя Δ с этого момента будет постоянной. Под действием температуры и давления упругие силы растительных частиц уменьшаются за счет перерождения упругих деформаций в пластические. Релаксация напряжения начинается уже в зоне формирования и фактическое изменение текущего напряжения бокового распора можно представить в виде:

$$\sigma_0 = \sigma_k e^{-\beta t}, \quad (6)$$

$$\sigma_F = \sigma_k e^{-\alpha(l_1+h)}, \quad (7)$$

где β – коэффициент релаксации напряжения;

t – время перемещения элементарного слоя по каналу пресса на элементарном участке;

l_1 – длина участка распрессовки;

h – величина упругой распрессовки формирующегося участка.

В момент рабочего хода напряжение на торце плунжера вначале достигает значения σ'_B , которое соответствует вторичному сжатию распрессовавшихся частиц (слоев), а затем возрастает до σ''_B :

$$\sigma''_B = \sigma_0 e^{\alpha l} \quad (8)$$

или

$$\sigma''_B = \sigma_0 e^{\alpha l - \beta t}. \quad (9)$$

Прологарифмировав выражение (9) по основанию натурального логарифма, получим

$$\ln \frac{\sigma''_B}{\sigma_k} = \alpha l - \beta t. \quad (10)$$

Установившийся процесс экструзии определяется условием

$$\alpha l - \beta t = \text{const} \quad (11)$$

или, поскольку $t = \frac{l}{v}$,

$$\alpha l - \beta t = \left(\alpha - \frac{\beta}{v} \right) l = \text{const}, \quad (12)$$

где v – скорость перемещения элементарного слоя формируемой гранулы по каналу пресса, м/с (см/мин).

Выражение (12) можно считать основным критерием процесса формирования гранулы из растительного сырья. Поскольку $\frac{U}{\omega}$ для определенного типа гранул есть величина постоянная, $\alpha l = \text{const}$ может быть соблюдено при $\mu f = \text{const}$. Действительно, если $\mu f \rightarrow 0$, то $\sigma''_B \rightarrow \sigma_N$, плотность гранулы уменьшается и, наоборот, с $\mu f \rightarrow \infty$, плотность гранул увеличивается. Постоянство βt достигается при постоянной скорости прессования. Таким образом, установившийся процесс экструзии при формировании гранул из растительного сырья можно характеризовать так:

$$\gamma = \text{const}, \quad v = \text{const}, \quad (13)$$

где γ – плотность экструзионной гранулы;

v – скорость выхода гранулы из пресса.

При постоянной средней плотности гранул l является функцией $\frac{U}{\omega}$, в этом случае при других равных условиях

$$l_\alpha = \text{const} \quad (14)$$

или

$$\frac{U}{\omega} l = \text{const}. \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что при постоянных параметрах пресс-массы и условиях прессования длина l формирующей части канала пресса определяется конфигурацией гранул и их размерами. При равных l плотность гранул тем больше, чем выше $\frac{U}{\omega}$, а при постоянной плотности гранул из растительного сырья и древесных отходов $\frac{U}{\omega}$ с ростом l уменьшается. Кроме того, на плотность и прочность гранул оказывает влияние наличие лигнина в растительной массе, который выделяется при повышении температуры и склеивает частицы пресс-массы воедино.

Важной характеристикой гранулированного заполнителя из растительного сырья является пористость, величина которой обуславливает теплофизические свойства материала. Поэтому в качестве еще одного регламентируемого параметра гранулированного заполнителя был принят средний диаметр пор, отвечающий за минимальный размер, находящийся в пределах 100–600 мкм. Для регулирования показателей прочности и пористости при изготовлении гранулированного заполнителя для легких бетонов на основе

растительного сырья необходимо введение поливинилацетатной дисперсии в количестве 0,5–1,5 %, способствующей обеспечению адгезии растительных волокон и достижению требуемой прочности при оптимальной пористости.

Проводимая для устранения вредного влияния экстрактивных веществ органического заполнителя грануляция осуществляется с целью уменьшения его удельной поверхности и, следовательно, площади контакта с цементным камнем. Однако большинство качественных характеристик гранулированного заполнителя зависят от давления гранулятора на исходную массу. В целях обеспечения интенсификации и высокой производительности гранулятора сырьевая масса подвергалась увлажнению, что улучшало ее пластические свойства и формуемость. Опытным путем были определены параметры давления для каждого вида растительного сырья. В среднем они находились в интервалах от 5 до 20 МПа для торфа; от 15 до 35 МПа для соломы, костры и камыша [4–7].

При определенных режимах в процессе грануляции сырья растительного происхождения на поверхности гранул может образовываться защитная пленка связующего, препятствующая выделению экстрактивных веществ из растительного заполнителя. Это может способствовать нормализации твердения минерального вяжущего в легком бетоне, однако для торфа, камыша и соломы такой процесс маловероятен [10–13].

Время гранулирования составляло 5–15 с, после чего гранулы подвергали термообработке при 160 °С в сушильном шкафу в течение 5–10 мин. Влажность гранул после отверждения 4–12 %. Физико-механические свойства гранулированного заполнителя: объемная насыпная масса – 200–320 кг/м³ (по ГОСТ 9759); прочность гранул при сдавливании в цилиндре 0,5–4,0 МПа (по ГОСТ 9758); водопоглощение гранул через 24 ч 1–2 % (по ГОСТ 9758); гранулометрический состав (определяется типом рабочих органов и соответствующих сменных насадок) – фракции 5–10; 10–20 и 20–40 мм. Исследованы свойства гранул, полученных при различных режимах грануляции (таблица).

Изменение свойств гранул в зависимости от режима грануляции

Свойства гранул	Влажность, % (при $P = 10$ МПа)			Давление прессования, МПа			Температура, °С (при $P = 20$ МПа)		
	5	15	25	10	20	30	20	75	100
1. Объемная масса, кг/м ³									
Торф	220	235	250	235	285	345	255	275	295
Камыш	185	195	205	195	230	260	190	215	230
Солома	180	185	200	185	205	275	180	220	215
2. Прочность при сдавливании в цилиндре, МПа									
Торф	0,6	2,5	2,0	2,5	3,5	4,6	3,2	3,5	3,0
Камыш	0,3	2,1	1,6	2,2	2,7	4,1	2,4	2,6	2,8
Солома	0,4	1,8	1,3	1,9	2,8	3,9	2,6	2,9	2,7
3. Водопоглощение за 24 ч, %									
Торф	14,1	12,5	10,3	14,1	10,2	8,4	12,5	10,6	12,8
Камыш	16,7	16,2	14,5	16,2	13,1	9,9	14,9	14,2	15,2

Следующим этапом доработки заполнителя являлась отработка технологии грануляции и режимов прессования. На рис. 1 представлены зависимости плотности, прочности и пористости гранул от давления прессования, а на рис. 2 показан внешний вид гранулятора и гранул из растительного сырья. Как следует из графиков, для получения минимальной прочности растительных гранул в размере не менее 2,5 МПа требуется давление прессования порядка 15,0 МПа. При этом пористость гранулированного заполнителя может быть в пределах от 20 до 42 %.

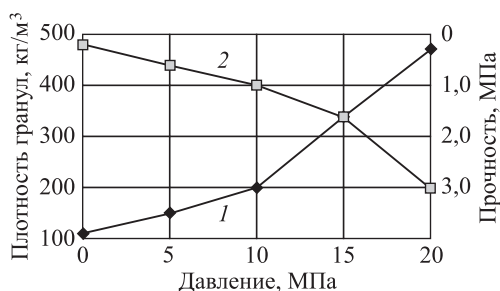


Рис. 1. Влияние величины давления прессования на плотность (1) и прочность (2) гранул заполнителя из растительного сырья

Далее были выявлены оптимальные исходные параметры для сырьевой массы: начальная влажность, температура и время прессования при изготовлении гранул. Полученные результаты приведены в таблице.

Учитывая весь набор требований, предъявляемых к защитно-пропиточным композициям для крупного органического заполнителя и стеновых материалов, нами была выбрана комбинированная композиция, обладающая необходимыми свойствами по совместимости и пленкообразованию. Кроме того, она отвечала технологическим требованиям, так как имела растворители, обеспечивающие способность композиции сохранять свои защитно-пропитывающие свойства в течение заданного рабочего времени. Наиболее подходящей с точки зрения удовлетворения всем предъявляемым требованиям является полимерсиликатная композиция, состоящая из жидкого стекла и ПВА-дисперсии.

Статическим расчетом полимерсиликатной защиты гранул, расположенных в легком бетоне, определены изгибающие моменты, нормальные и поперечные силы в сечениях защитной оболочки под действием различных нагрузок. При этом защитная оболочка условно принимается жесткой,



Рис. 2. Общий вид гранулятора для получения гранулированного крупного заполнителя из растительного сырья и заполнитель различных фракций

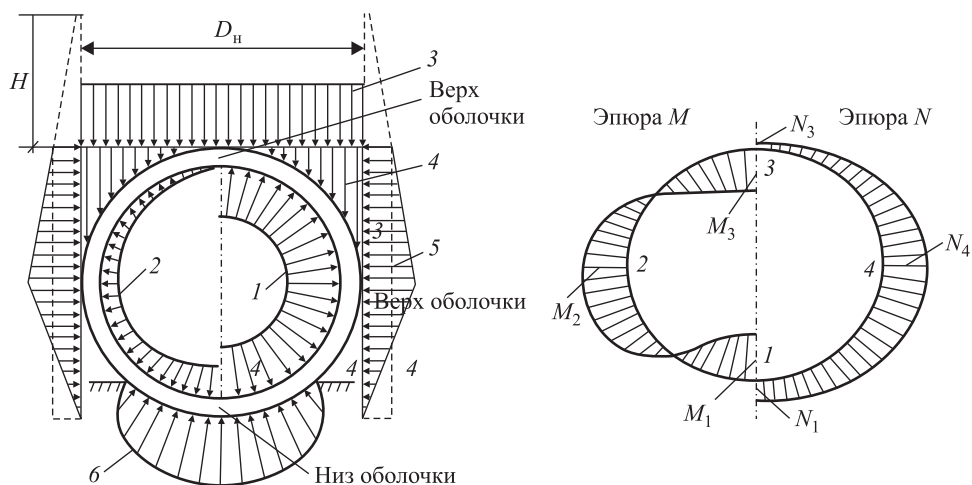


Рис. 3. Схема действия нагрузок на защитную оболочку гранулы из растительного сырья

1 – внутреннее давление; 2 – давление набухания; 3 – верхнее давление; 4 – зона пустоты; 5 – боковое давление от других гранул; 6 – нижнее давление

т.е. расчет ведется по недеформированной схеме, пренебрегая деформациями их поперечного сечения. Ниже рассматриваются только основные положения расчета, которые могут иметь место при практической работе гранулированного органического крупного заполнителя в легком бетоне (рис. 3).

При расчете защитной оболочки учитывались следующие основные виды прилагаемых нагрузок и воздействующих факторов [14–18]:

- 1) собственная масса защитной оболочки;
- 2) масса торфяной гранулы в защитной оболочке;
- 3) внутреннее давление от рабочего напора набухания торфяной гранулы при насыщении водой затворения;
- 4) отрицательное внутреннее давление, вызванное усадкой торфяной массы при наличии высокой степени адгезии защитной оболочки;
- 5) вертикальное и горизонтальное давление близлежащих гранул;
- 6) временная нагрузка на поверхности бетонного блока при транспортировке и монтаже строительного блока;
- 7) внешнее давление (опорная реакция).

Кроме того, в зависимости от конкретных условий работы материала в ограждении при расчете учитывались давление от постоянной нагрузки на здание или сооружение, атмосферное давление при образовании вакуума, температурные воздействия, давление при нестандартных ситуациях нагружения единичного стенового элемента из легкого бетона на гранулированном органическом заполнителе и т.д. [18, 19].

При расчете защитной оболочки рассматривался единичный участок площадью S или P . Определение нормативных нагрузок для этого участка производилось обычным способом.

Собственная масса защитной оболочки с принятой постоянной толщиной стенки составляет

$$G_C^H = 2\pi r h \rho_\delta, \quad (16)$$

где r – средний радиус защитной оболочки, м;

h – толщина стенки, м;

ρ_δ – средняя объемная масса, кг/м³, $\rho_\delta = 1100$.

Масса торфяной гранулы, заполняющей защитную оболочку

$$G_\zeta^H = \pi r_b^2 \rho_0, \quad (17)$$

где r_b – внутренний радиус защитной оболочки, м;

ρ_0 – объемная масса гранулированного торфа, кг/м³, $\rho_0 = 350$.

Внутреннее давление от напора набухания торфяной гранулы при насыщении водой затворения принималось по экспериментальным данным в пределах до 5000 Па. Это давление является рабочим или внутренним, и оно будет неоднородным в разных точках гранулы и защитной оболочки.

Отрицательное внутреннее давление. В расчетах учитывалось внутреннее отрицательное давление, проявляющееся при высокой адгезии полимер-силикатной защиты к торфяной массе во время усадки торфяной гранулы после набухания. Величина отрицательного давления для защитной оболочки принималась равной не более половины величины внутреннего давления от напора набухания торфяной гранулы, т.е. 2500 Па.

Вертикальное и горизонтальное давление близлежащих гранул крупного заполнителя может быть определено в зависимости от условий работы стенового материала и варианта загрузки его в здании или сооружении. В нормативных документах давление от равномерно распределенной или условно сосредоточенной нагрузки на нижележащие элементы малоэтажного здания не превышает половины величины расчетной марки стенового материала, т.е. 2,5–5,0 МПа. Фактическая величина этих нагрузок будет составлять менее одной десятой приведенных значений.

При транспортных и монтажных работах возможны приложения усилий в виде сосредоточенных или равномерно распределенных нагрузок от массы других блоков или монтажно-строповочной оснастки. Равнодействующая нормативного вертикального давления, равномерно распределенного по поверхности защитной оболочки, может быть определена по формуле

$$G_r^H = \rho_r H D_n K_n, \quad (18)$$

где ρ_r – максимально допустимая величина нагрузки при монтаже и транспортировке на единичную площадь гранулы (стенового блока), 70 Па;

H – максимально допустимая высота стены над верхом самой нижней гранулы в легкобетонном блоке, м; $H = 10$ м;

D_n – наружный диаметр гранулы, м; $D_n = 0,02$ м;

K_n – коэффициент неравномерности давления легкого бетона в массиве, учитывающий дополнительную нагрузку вследствие различных значений усадки и неравномерности промешивания легкобетонной смеси рядом с гранулой, $K_n = 1,2$.

При определении горизонтального давления на гранулу крупного заполнителя и, следовательно, на защитную полимерсиликатную оболочку учитывают то обстоятельство, что на нижнюю половину защитной оболочки в определенном интервале времени могут воздействовать силы с обратным уклоном тыловой грани. Если же гранула зафиксирована в достаточно мощном слое цементно-песчаного раствора, то боковое давление на опорную поверх-

ность защитной оболочки практически отсутствует. Поэтому на нижнюю часть защитной оболочки воздействующая нагрузка будет значительно меньше, чем на верхнюю. В этом случае эпюра горизонтального давления может быть принята, как показано на рис. 3.

В соответствии с многочисленными нормативными и техническими литературными источниками боковое давление при работе единичной гранулы крупного заполнителя может быть принято равномерно распределенным, тогда равнодействующая величина будет представлена как

$$G_{\zeta}^H = \rho_r HD_n \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (19)$$

Это выражение является частным случаем общей расчетной формулы и дает небольшую погрешность.

Вертикальная опорная реакция может быть представлена нормативным давлением, определяемым в зависимости от высоты здания. Для максимально допустимой этажности здания в три этажа высота стены около 10 м, что соответствует при средней плотности стенового материала $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, т.е. с учетом коэффициента перегрузки и неравномерности приложения внешних сил не будет превышать 10–20 кПа.

Определение усилий в сечениях защитной полимерсиликатной оболочки осуществлено в упругой стадии работы обычными методами строительной механики. Однако в некоторых случаях можно учитывать пластические свойства полимерсиликатной оболочки и определять усилия при расчете на прочность в упругопластической стадии работы.

Расчет оболочки в упругой стадии произведен методом сил как трижды статически неопределимого замкнутого кольца, находящегося в равновесии при действии нагрузок и реактивных сил. Кольцо рассчитывали отдельно для каждого вида нагрузки, а затем алгебраически суммировали усилия от тех или иных нагрузок в зависимости от принятого их сочетания. Окончательные формулы для моментов и нормальных сил в сечениях стенки круглого единичного элемента защитной оболочки имеют следующий вид:

$$M^n = mG^H r, \quad N^n = \nu G^H, \quad (20)$$

где m и ν – коэффициенты, зависящие от распределения нагрузки, опорной реакции и положения рассматриваемого сечения;

r – средний радиус защитной оболочки.

Для самых неблагоприятных сочетаний нагрузок и воздействующих факторов приняты значения коэффициентов $m = 0,45$; $\nu = 0,65$.

Изгибающие моменты и нормальные силы считаются положительными, если они вызывают растяжение внутренних элементов защитной оболочки. Усилия в стенке защитной оболочки зависят от вида технологических и эксплуатационных условий формирования легкобетонного блока. Чем плотнее цементно-песчаная матрица, тем меньше будут усилия. Поэтому коэффициенты m и ν , приведенные выше, соответствуют минимальным характеристикам матрицы.

Учитывая, что радиус срединной линии поперечного сечения защитной оболочки r несколько меньше радиуса r_n внешнего контура, к которому приложены нагрузки, можно при определении изгибающих моментов от

давления внешних сил и внутренней нагрузки в расчетные формулы ввести коэффициент r/r_n , что позволяет учитывать разгружающее действие нагрузки, приложенной за контуром осевой линии. Однако это влияние незначительное, поэтому в наших расчетах может не учитываться.

Внутренние усилия от горизонтального приложения нагрузок E^H или временной нагрузки $E_{вр}^H$ определяются выражениями

$$M_1^H = M_3^H = -M_2^H = -M_4^H = -0,125E^H r, \quad (21)$$

$$N_1^H = N_3^H = -0,5E^H; \quad N_2^H = N_4^H = 0.$$

Внутреннее суммарное усилие от равномерного давления набухания торфяной гранулы p в защитной оболочке вызывает только нормальные растягивающие силы

$$N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = p r_b \epsilon, \quad (22)$$

где r_b – внутренний радиус защитной оболочки (гранулы).

От неравномерного изменения деформаций в различных участках крупного заполнителя в стенке защитной оболочки возникают изгибающие моменты

$$M_1 = M_2 = M_3 = M_4 = \frac{\alpha_t E \delta h^2 (t_n - t_b) \epsilon}{12}, \quad (23)$$

где $\alpha_t = 1 \cdot 10^{-5}$, $1/^\circ\text{C}$ – коэффициент линейного расширения бетона;

ϵ – величина влияния на гранулу в бетонном блоке, м;

t_n и t_b – температура соответственно на различных участках гранулы или наружной и внутренней поверхности защитной оболочки.

С учетом рассмотренных предложений по статическому расчету защитной полимерсиликатной оболочки были осуществлены все вычисления и определены критические значения напряжений в сечении защитной композиции. Кроме того, дополнительно были проведены испытания защитной пленки на растяжение, что позволило установить критические значения напряжений в материале в пределах 50–60 Па. Однако для практических целей данной величины воспринимаемых усилий оказалось недостаточно, поэтому при устройстве защитной оболочки в состав композиции были введены дополнительно микроармирующие добавки в виде отходов хризотилцементного производства или волластонита в количестве 2–3 % по массе, что позволило увеличить прочность при растяжении до 120–140 Па.

Закключение. Таким образом, статические расчеты позволили оптимизировать состав полимерсиликатной защитной композиции для гранулированного заполнителя из растительного сырья и обеспечить гарантированную прочность при любых сочетаниях нагрузок и воздействий. В качестве заполнителя легких бетонов предложено гранулирование дисперсных волокнистых материалов растительного происхождения с обеспечением плотности гранул менее 300 кг/м^3 и прочности их при сжатии более 1,5–2,0 МПа; давление прессования при гранулировании должно составлять не менее 15 МПа.

Для регулирования показателей прочности и пористости при изготовлении гранулированного заполнителя для легких бетонов на основе растительного сырья необходимо введение поливинилацетатной дисперсии в ко-

личестве 0,5–1,5 %, способствующей обеспечению адгезии растительных волокон и достижению требуемой прочности при оптимальной пористости.

Для предотвращения отрицательного действия выделяемых из гранул крупного органического заполнителя веществ целесообразно нанесение полимерсиликатной композиции из натриевого жидкого стекла и ПВА в соотношении 60–75 : 25–40 %, что приводит к консервации гранул и снижению отрицательного влияния редуцирующих веществ на свойства легкого бетона.

На основе статического расчета напряжений в полимерсиликатной защитной оболочке растительных гранул и результатов испытаний установлено, что критические значения напряжений в материале составляют 50–60 Па. Для надежной работы материала при действии внешних нагрузок целесообразно в состав композиции вводить дополнительно микроармирующие добавки в виде отходов хризотилцементного производства или волластонита в количестве 2–3 % по массе, что обеспечивает увеличение прочности при растяжении до 120–140 Па. Это позволяет оптимизировать состав полимерсиликатной защитной композиции для гранулированного торфозаполнителя и обеспечить гарантированную прочность при любых сочетаниях нагрузок и воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пичугин А.П., Денисов А.С., Хританков В.Ф., Пименов Е.Г. Роль микроармирования в обеспечении эксплуатационных характеристик крупнопористого легкого бетона // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 12. С. 5–15.
2. Пименов Е.Г., Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Денисов А.С. Физико-химические исследования процессов снижения открытой пористости крупного заполнителя бетонов // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 10-11. С. 22–31.
3. Айништейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. и др. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учеб. в 2 кн. Кн. 2. М.: Университ. книга; Логос; Физматкнига, 2006. С. 1474–1490.
4. Генералов М.Б., Классен П.В. Расчет оборудования для гранулирования минеральных удобрений. М.: Машиностроение, 1984. 192 с.
5. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1983. 272 с.
6. Лыков М.В., Коротков М.А., Белозеров Л.П. Новый способ и аппарат для получения гранулированных продуктов // Тр. НИУИФ. 1973. Вып. 221. С. 196–213.
7. Осокин А.В. Исследование кинематической схемы плоскоматричного гранулятора с активными цилиндрическими пресс-валками // Вестн. МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 3 (№ 102). С. 317–325.
8. Осокин А.В. Разработка математической модели движения гранулируемого материала в фильерах плоскоматричного гранулятора // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2018. Т. 22. № 4. С. 43–61.
9. Павлов К.Ф., Романков П.Г. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1981. 560 с.
10. Классен П.В., Гришаев И.Г. Основы техники гранулирования. М.: Химия, 1982. 272 с.
11. Генералов М.Б., Классен П.В. Расчет оборудования для гранулирования минеральных удобрений. М.: Машиностроение, 1984. 192 с.
12. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 9-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1970. 754 с.
13. Черныбильский И.И. и др. Машины и аппараты химических производств. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1975. 456 с.

14. Александров А.В., Потанов В.Д., Державин Б.П. Сопrotивление материалов. 2-е изд., испр. М.: Высш. шк., 2009. 559 с.
15. Миролубов И.Н. и др. Пособие к решению задач по сопротивлению материалов. М.: Высш. шк., 2006. 400 с.
16. Сурьянинов Н.Г. Методы построения эпюр в статически определимых и статически неопределимых системах. Одесса, 2001. 155 с.
17. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов: учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 588 с.
18. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. М.: Высш. шк., 1991. 288 с.
19. Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Смирнова О.Е., Пименов Е.Г. Трещинообразование в крупнопористом бетоне с интегральным расположением крупного заполнителя // Эксперт: теория и практика. 2020. № 4. С. 47–51.

Пичугин Анатолий Петрович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный аграрный университет

Хританков Владимир Федорович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный аграрный университет

Смирнова Ольга Евгеньевна, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Пичугин Михаил Анатольевич, асп.

Новосибирский государственный аграрный университет

Получено 22.10.2020

Pichugin Anatoliy Petrovich, DSc, Professor

Novosibirsk State Agrarian University, Russia

Khritankov Vladimir Fedorovich, DSc, Professor

Novosibirsk State Agrarian University, Russia

Smirnova Ol'ga Evgen'evna, PhD, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Pichugin Mikhail Anatol'evich, Post-graduate Student

Novosibirsk State Agrarian University, Russia

STRENGTH OF LARGE GRANULES POROUS FILLER FROM VEGETABLE RAW MATERIALS IN LIGHTWEIGHT CONCRETE

When solving the problem of obtaining and studying light large-porous concretes based on plant raw materials, the physicommechanical properties of the new material were studied and the possibility of their use as a large aggregate was confirmed. Rational compositions of material and protective composition for granules made of straw, reeds, peat, bark, etc., have been developed, which help to increase the strength parameters. Further study of the property required a complex of studies on the operational resistance of lightweight concrete under load and to determine the maximum allowable stresses, both in the concrete itself and in granules from plant raw materials before cracking. The tests and calculations carried out have shown that the most vulnerable point in large-porous lightweight concrete is the contact zone between the large aggregate and the cement matrix.

Key words: lightweight concrete, granules from plant raw materials, external and internal stresses, cement matrix, cracking, contact zone of coarse aggregate.

REFERENCES

1. Pichugin A.P., Denisov A.S., Khritankov V.F., Pimenov E.G. Rol' mikroarmirovaniya v obespechenii ekspluatatsionnykh kharakteristik krupnoporistogo legkogo betona [The role of microreinforcement in ensuring the operational characteristics of large-porous lightweight concrete]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 12. Pp. 5–15. (in Russian)

2. *Pimenov E.G., Pichugin A.P., Khritankov V.F., Denisov A.S.* Fiziko-khimicheskiye issledovaniya protsessov snizheniya otkrytoy poristosti krupnogo zapolnitelya betonov [Physico-chemical studies of the processes of reducing the open porosity of a large aggregate of concrete]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 10-11. Pp. 22–31. (in Russian)
3. *Aynshteyn V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A. et. al.* Obshchiy kurs protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii: uchebnik v 2 kn. Kn. 2 [General course of processes and devices of chemical technology: textbook in 2 kn. Book. 2]. Moscow, 2006. Pp. 1474–1490. (in Russian)
4. *Generalov M.B., Klassen P.V.* Raschet oborudovaniya dlya granulirovaniya mineral'nykh udobreniy [Calculation of equipment for granulating mineral fertilizers]. Moscow, 1984. 192 p. (in Russian)
5. *Dytner'skiy Yu.I.* Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow, 1983. 272 p. (in Russian)
6. *Lykov M.V., Korotkov M.A., Belozherov L.P.* Novyy sposob i apparat dlya polucheniya granulirovannykh produktov [A new method and apparatus for the production of granular products]. *Trudy NIUIF* [Proceedings of NIUIF]. 1973. Iss. 221. Pp. 196–213. (in Russian)
7. *Osokin A.V.* Issledovaniye kinematicheskoy skhemy ploskomatrichnogo granulyatora s aktivnymi tsilindricheskimi press-valkami [Study of the kinematic diagram of a flat-matrix granulator with active cylindrical press rolls]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU]. 2017. Vol. 12. Iss. 3 (No. 102). Pp. 317–325. (in Russian)
8. *Osokin A.V.* Razrabotka matematicheskoy modeli dvizheniya granuliruyemogo materiala v fil'erakh ploskomatrichnogo granulyatora [Development of a mathematical model for the movement of the granulated material in the dies of a flat-matrix granulator]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]. 2018. Vol. 22. No. 4. Pp. 43–61. (in Russian)
9. *Pavlov K.F., Romankov P.G.* Primery i zadachi po kursy protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii [Examples and tasks for the course of processes and devices of chemical technology]. Leningrad, 1981. 560 p. (in Russian)
10. *Klassen P.V., Grishaev I.G.* Osnovy tekhniki granulirovaniya [Basics of granulation technique]. Moscow, 1982. 272 p. (in Russian)
11. *Generalov M.B., Klassen P.V.* Raschet oborudovaniya dlya granulirovaniya mineral'nykh udobreniy [Calculation of equipment for granulating mineral fertilizers]. Moscow, 1984. 192 p. (in Russian)
12. *Kasatkin A.G.* Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow, 1970. 754 p. (in Russian)
13. *Chernobyl'skiy I.I. et. al.* Mashiny i apparaty khimicheskikh proizvodstv [Machines and devices for chemical production]. Moscow, 1975. 456 p. (in Russian)
14. *Alexandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P.* Soprotivleniye materialov [Resistance of materials]. Moscow, 2009. 559 p. (in Russian)
15. *Mirolyubov I.N. et al.* Posobiye k resheniyu zadach po soprotivleniyu materialov [Manual for solving problems on the strength of materials]. Moscow, 2006. 400 p. (in Russian)
16. *Sur'yandinov N.G.* Metody postroeniya epyur v staticheski opredelimykh i staticheski neopredelimykh sistemakh [Methods for constructing diagrams in statically definable and statically indeterminate systems]. Odessa, 2001. 155 p. (in Russian)

17. *Feodos'ev V.I.* Soprotivleniye materialov: uchebnyk dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy [Resistance of materials: A textbook for students of higher technical educational head]. Moscow, 2007. 588 p. (in Russian)
 18. *Zaytsev Yu.V.* Mekhanika razrusheniya dlya stroiteley [Destruction mechanics for builders]. Moscow, 1991. 288 p. (in Russian)
 19. *Pichugin A.P., Khritankov V.F., Smirnova O.E., Pimenov E.G.* Treshchino-obrazovaniye v krupnoporistom betone s integral'nym raspolozheniyem krupnogo zapolnitelya [Cracking in large-porous concrete with an integral arrangement of coarse aggregate]. Ekspert: teoriya i praktika [Expert: theory and practice]. 2020. No. 4. Pp. 47–51. (in Russian)
-