

УДК 666.3-127:621.3.014

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПЕНОТЕХНОЛОГИИ ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОГИДРОТЕПЛОСИЛОВОГО ПОЛЯ. Часть 4. Этапы и параметры активации пеномасс полем внутреннего воздействия совокупных параметров на формирование структуры сырца\*

Исследовали влияние температуры, напряжения и удельного электрического сопротивления пеномассы на интенсивность влагоотжата. Определены три зоны изменения удельного электрического сопротивления. Распределение поля давлений связано с фильтрацией влаги в капиллярно-пористом материале. При недостаточной структурной прочности межпоровых перегородок и резкой динамике температур возникает проседание пеномассы. Рассмотрены характер изменения мембран при максимально возможном увеличении объема поры и расчет объема огнеупорного компонента, формирующего оболочки пор-ячеек. Фильтрация жидкости в массе под действием градиента давления характеризуется ее вязкостью и геометрическими параметрами капиллярно-пористого тела. При самоуплотнении пеносистемы массоперенос осложняется изменением фильтрационных характеристик матрицы. Для исключения напряженного состояния в теле сырца после электропрогрева необходимо его плавно охлаждать до безопасной для структуры температуры.

**Ключевые слова:** капиллярно-пористая среда, удельное электрическое сопротивление, кривые отжатия влаги, фильтрация влаги, водонасыщенные пленки, напряжения сдвига, газовый пузырек, оболочки пор-ячеек, поверхностное натяжение, диффузионный слой, коалесценция ячеек, плавное охлаждение сырца.

При электропрогреве рост давления в элементарном объеме пеномассы определяется температурным расширением заключенного в порах-ячейках воздуха и паров воды. Интенсивность массопереноса при самоуплотнении характеризуется фильтрационными характеристиками капиллярно-пористой среды.

Для проверки теоретических положений исследовали формовочные массы плотностью 550–570 кг/м<sup>3</sup>. Опыты проводили при скорости электропрогрева 2,5–4 °С/мин и напряжении 30–90 В. В разных точках образцов фиксировали температуру, давление и объем отжимаемой из пеномассы влаги. Одновременно исследовали

влияние температуры, напряжения и удельного электрического сопротивления массы на интенсивность влагоотжата.

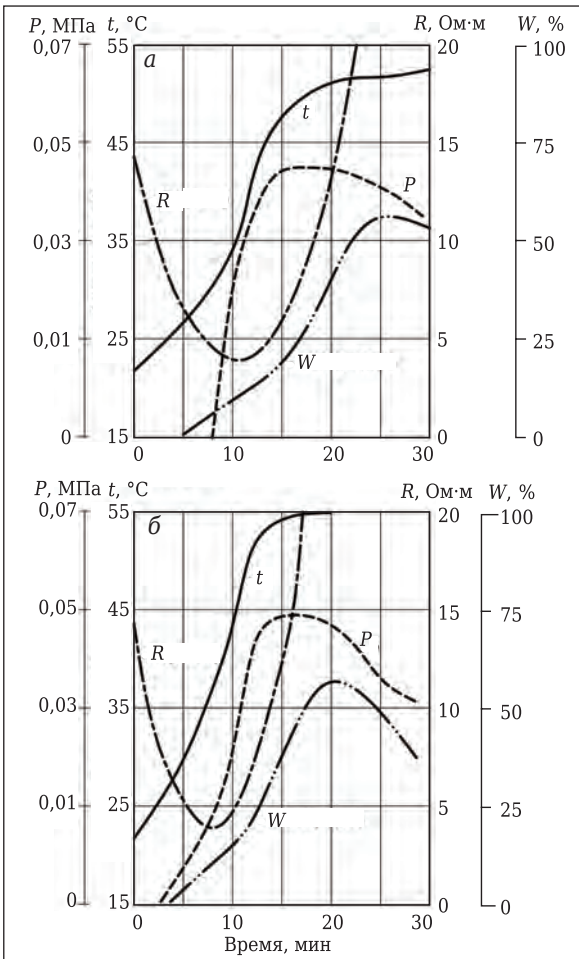
Характер кривых отжатия влаги показывает, что в ходе теплосиловой обработки пеномасс на интенсивность влагоотжата значительно влияет скорость прогрева материала. Можно выделить три зоны изменения удельного электрического сопротивления: снижения, экстремума и роста (рис. 1). Первая зона обусловлена ростом температуры внутри пеномассы; далее начинается отжатие влаги (токопроводящего агента). До начала периода интенсивного удаления влаги эти процессы находятся в относительном равновесии. При интенсивном обезвоживании материала наблюдается резкий рост удельного электрического сопротивления. Характер кривых давлений, температур и удаляемой влаги отражает полную взаимосвязь соответствующих им процессов (см. рис. 1).

Распределение поля давлений связано с фильтрацией влаги в капиллярно-пористом материале и обуславливает ее движение по каналам Плато. Этим объясняется значительный перепад давлений при высокой интенсивности прогрева, приводящий к деструкции центральной зоны образца (рис. 2, а). После активного

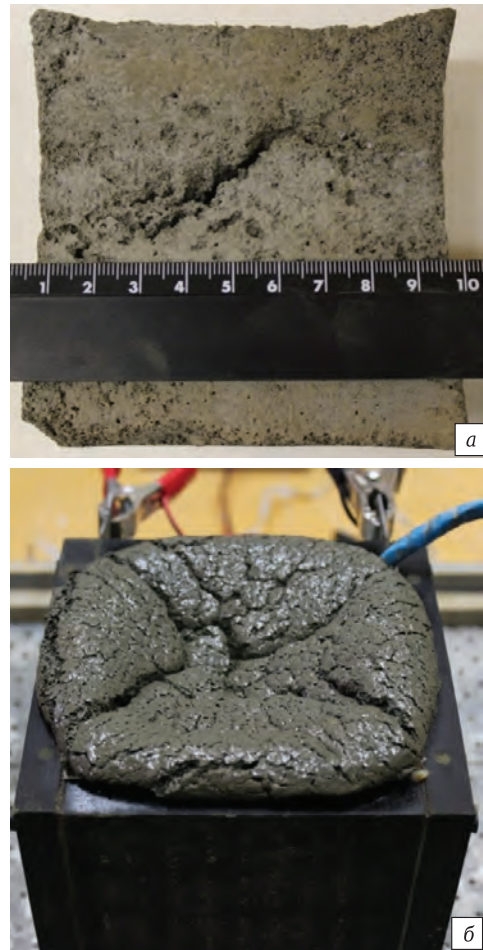
\* Окончание. Части 1, 2 и 3 статьи опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 5, 7 и 9 за 2020 г.



В. Н. Соков  
E-mail: sersok\_07@mail.ru



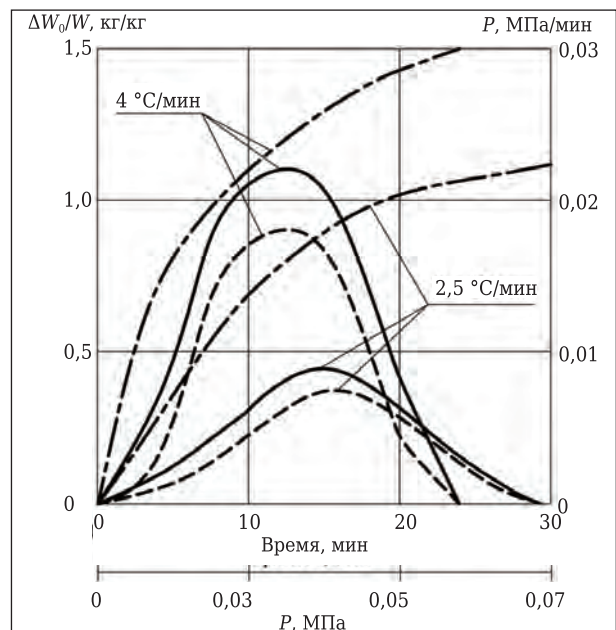
**Рис. 1.** Изменения давления  $P$ , температуры  $t$ , удельного электрического сопротивления  $R$  и влагоотжатия  $W$  в образце при скорости прогрева 2,5 (а) и 4 °C/мин (б)



**Рис. 2.** Деструкция центральной зоны образца в результате чрезмерно интенсивного самоуплотнения (а) и объемные деформации из-за быстрого снижения температуры (б)

отжатия капиллярной влаги происходят стабилизация давления по сечению и прекращение активного переноса влаги. Последующий сброс температуры зависит от скорости остывания обрабатываемой массы. Интенсивность массопереноса при самоуплотнении характеризуется фильтрационными характеристиками капиллярно-пористой среды. При недостаточной структурной прочности межпоровых перегородок и резкой динамике температур внутреннее давление ячеек пеномассы снижается, вызывая проседание пеномассы (рис. 2, б). Полученные экспериментальные данные позволяют описать механизм формирования напряженного состояния в формируемом объеме и пути улучшения пористой структуры пенолегковесных материалов (рис. 3).

Температурное расширение жидкой и твердой фаз вносит незначительный вклад в генерирование напряженного состояния. В изучаемых интервалах температур ТКЛР жидкой фазы составляет  $5,8 \cdot 10^{-4}$ – $6,0 \cdot 10^{-4}$  град $^{-1}$ , а твердой фазы  $6 \cdot 10^{-6}$ – $10 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ . Их вклад в формирование внутреннего давления 1,2–1,6 %.



**Рис. 3.** Изменения относительного влагоотжатия  $\Delta W_0/W$  и давления  $P$  при скорости прогрева 2,5 и 4 °C/мин: — — среднее давление; - - - - скорость изменения давления; - · - · - относительное влагоотжатие

Установлено, что технологически проще и целесообразнее получить пеномассу с толстыми водонасыщенными пленками и благодаря низкому предельному напряжению сдвига первый этап температурного расширения происходит с перераспределением микрообъемов огнеупорного теста в области меньшего давления. Это возможно благодаря низкому предельному напряжению сдвига, равному 20–40 кПа.

По мере дальнейшего расширения пор-ячеек в объеме начинаются их деформация и формирование контактной зоны. Объем ячейки  $V_2$  на этой стадии характеризуется законами Бойля – Мариотта и Гей-Люссака:

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2 \cdot P_1}{T_1 \cdot P_2}, \quad (1)$$

где  $V_1$  — объем воздушной ячейки (поры);  $T_1$  — начальная температура воздуха в поре;  $T_2$  — то же после нагрева;  $P_1$  — давление воздуха в поре при  $T_1$ ;  $P_2$  — то же при  $T_2$ ;  $T_2$  и  $V_2 = f(\tau, \text{мин})$ ,  $P_2 \neq P_1$ .

Так как пластическое сопротивление перегородок вызывает избыточное давление в поре, то

$$\Delta P = 2\sigma_\tau \cdot \ln \frac{R}{r}, \quad (2)$$

где  $\Delta P$  — максимальное давление, которое пора может принять без деформаций;  $R$  и  $r$  — внешний и внутренний радиусы газового пузырька.

Если принять, что  $V = \text{const}$ , то избыточное давление будет определяться как

$$\Delta P = \frac{T_2 \cdot P_1}{T_1} - P_1, \quad (3)$$

тогда при  $V \neq \text{const}$  и  $T_2 > T_1$ ,  $P_2 = P_1 + \Delta P$ .

С учетом этого выражения формула (1) примет вид

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2 \cdot P_1}{T_1 \cdot (P_2 + \Delta P)}. \quad (4)$$

Рассмотрим характер изменения мембран при максимально возможном увеличении объема поры. Исходя из предположения, что поры равны и их укладка близка к гексагональной, растворная часть (минеральный компонент) идет на создание оболочки ( $\Delta r = R - r$ ) и заполнение межпорового пространства.

Зная объем вовлеченного в формуемую массу воздуха, можно подсчитать количество пор:

$$n = \frac{V_{\text{газа}}}{\frac{4}{3}\pi r^3} \quad (5)$$

и рассчитать объем минерального компонента, формирующего оболочки пор-ячеек:

$$V_{\text{об}} = V_\alpha - V \cdot \Pi, \quad (6)$$

где  $V_\alpha$  — объем глинистого теста;  $V$  — объем формуемой массы;  $\Pi$  — пустотность при гексагональной укладке (~26 %).

Тогда внешний радиус оболочки определится как

$$R = \left( \frac{3}{4} \left( \frac{V_{\text{об}} + V_{\text{газа}}}{n} \right) \cdot \Pi \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (7)$$

соотношение  $R/r$  примет вид

$$\frac{R}{r} = \left( \frac{V \cdot (1 - \Pi) \cdot \pi^2}{V_{\text{газа}}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (8)$$

а выражение (4) можно записать так:

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2 \cdot P_1}{T_1 \left( P_1 + 2\sigma_\tau \cdot \ln \left( \frac{V \cdot \pi^2 (1 - \Pi)}{V_1} \right)^{\frac{1}{3}} \right)}. \quad (9)$$

Таким образом, зная температуру и давление в любой момент времени  $\tau$ , можно вычислить объем поры. Отсюда следует, что радиус ячейки увеличивается до некоторой величины  $R_1$ , определяющейся межпузырьковой пустотностью, что сопровождается уменьшением соотношения  $R/r$  до значений  $R_1/r_1$  [1]. Дальнейшее увеличение энергии расширяющегося пара и воздуха воздействует на минеральный компонент и характеризует второй этап уплотнения пеносистемы.

Движение жидкости по капиллярно-пористому телу под действием градиента давления напрямую зависит от ее вязкости и геометрических параметров капилляров.

Минеральный компонент в пеномассе представляет собой капиллярную матрицу, состоящую из неплотно упакованных частиц и воды. Для начала фильтрации необходимо совершить работу против сил, удерживающих влагу в материале. Капиллярное давление при полной смачиваемости жидкости:

$$P_k = \frac{\sigma}{R_\alpha} \cdot \theta, \quad (10)$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение;  $R_\alpha$  — средний радиус частицы материала;  $\theta$  — тригонометрический фактор. Средний радиус  $R_\alpha$  не является постоянной величиной, поскольку наружный диффузионный слой гидратирующих частиц может частично разрушаться, а абсорбционно-связанная вода из него может вовлекаться в массоперенос.

С понижением влажности сокращается и диаметр капилляров (деформации в поле сил давления), поэтому  $\theta = \text{const}$ . При самоуплотнении пеносистемы массоперенос осложнен изменениями фильтрационных характеристик матрицы (см. таблицу).

Теория фильтрации жидкостей через капиллярно-пористые тела применительно к процессу самоуплотнения [2, 3] позволила получить соотношения между создаваемым давлением и фильтрационными характеристиками материала.

**Основные параметры массопереноса при наибольшей интенсивности самоуплотнения**

№ п/п	Экспериментальные данные				Расчетные данные		
	фактическое давление, кПа	температура, °С	объем отжатой влаги, 10 <sup>-3</sup> м <sup>3</sup>	релаксируемое давление, кПа	созданное давление, кПа	средний диаметр капилляров, 10 <sup>-6</sup> м	коэффициент фильтрационного массопереноса, 10 <sup>-3</sup>
1	140	51	0,003	0	3	1,51	4,20
2	136	53	0,01	0	4	1,50	4,22
3	123	57	0,08	0,1	6	1,42	4,33
4	117	57	0,14	0,5	6	1,28	4,38
5	111	52	0,16	0,8	4	1,25	4,21
6	100	50	0,17	1,6	2	1,24	4,09

В случае излишней передачи тепла может наступить перегрев материала, начнется массовый переход воды в пар и внутрь пузырька, что увеличит нагрузку на перегородки, соотношение *R/r* превысит критическое значение и начнется стихийная коалесценция ячеек между собой со снижением несущей способности, т. е. оседание пеносистемы. После прекращения активного прогрева наступает третий этап — охлаждение образца, сопровождающийся началом активного формирования структуры сырца и релаксацией избыточного давления.

Результаты проведенных экспериментов показали, что для исключения напряженного состояния в теле сырца целесообразно его плавное охлаждение от максимальной температуры до температуры, безопасной для структуры материала (30–40 °С).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В основу нового направления в технологии получения пенолегковесных изделий положена концепция перехода изделий в более высокую категорию качества с одновременной интенсификацией технологических процессов, сниже-

нием энергетических затрат. Цикл формирования изделий — от заливки массы до выхода сырца из щелевого сушила — длится 3–4 ч, тогда как по существующим пенотехнологиям этот цикл составляет несколько суток.

**Библиографический список**

1. **Соков, В. Н.** Интенсификация пенотехнологии энергией электрогидротеплосилового поля. Часть 2. Закономерности оптимизации структуры пенолегковесного материала под воздействием ЭГТСП / В. Н. Соков, А. А. Кулибаев // Новые огнеупоры. — 2020. — № 7. — С. 63–66.
2. **Соков, В. Н.** Энергоэффективная скоростная технология получения высокотемпературных теплоизоляционных материалов : монография / В. Н. Соков. — М-во образования и науки Рос. Федерации, Мос. гос. строит. ун-т. — М. : МГСУ, 2014. — 328 с.
3. **Соков, В. Н.** Создание огнеупорных бетонов и теплоизоляционных материалов с повышенной термостойкостью : монография / В. Н. Соков. — М-во образования и науки Рос. Федерации, Мос. гос. строит. ун-т. — М. : МГСУ, 2015. — 288 с. ■

Получено 26.04.20  
© В. Н. Соков, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Nano Tech 2021**

**Международная выставка-конференция нанотехнологий**



27–29 января 2021 г.  
Токио, Япония

**Наноматериалы:**

фуллерен, углеродные нанотрубки, фотонные, композиционные, высокочистые, биосовместимые, нанокompозитные материалы, высокопроизводительные магнитные материалы, высокочистые нанопокрyтия, наночернила, наночастицы, графен, целлюлозные нановолокна

**Оценка и измерение:**

SPM / AFM, сверхточные измерительные приборы, электронные микроскопы (SEM / TEM), высокоэффективные / высокочувствительные датчики, молекулярная визуализация, измерительные инструменты для оценки и проектирования, симуляция, программное обеспечение для молекулярного проектирования

**Технология изготовления:**

наночастичная смесь / дисперсия, литография следующего поколения, наноимпринт, лазерная обработка, обработка электронным/ионным лучом, технология слияния / связывания, травление, обработка загрунтованных зарядов, технология изготовления тонкой пленки, технология ультраточной обработки поверхности, технология нанотранзисторов, точные технологии печати шаблонов, 3D-принтеры

<https://www.nanotechexpo.jp/>