

661  
ПЗ0

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ БССР

Белорусский технологический институт им. С. М. Кирова

На правах рукописи

666.189.3(043.3)

ПЕТРОВ БОРИС ИВАНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА  
ЦВЕТНОГО ДЕКОРАТИВНО - ОБЛИЦОВОЧНОГО ПЕНОСТЕКЛА

Специальность 05.17.11 - Технология силикатных и  
тугоплавких неметаллических материалов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск 1980

Работа выполнена в Проблемной лаборатории стекла и силикатов Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института и Минском научно-исследовательском институте стройматериалов Минпромстройматериалов БССР.

Научный руководитель,  
доктор технических  
наук, профессор

Б. К. ДЕМИДОВИЧ

Официальные оппоненты:

Доктор технических  
наук, профессор

Л. А. ЖУНИНА

Кандидат технических  
наук, доцент

З. Н. ШАЛИМО

Ведущее предприятие

— Гомельский стекло-  
завод им. Ломоносова

Защита состоится 30 мая 1980 г. на заседании Специализированного Совета (К.056.04.01) по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Белорусском технологическом институте им. С. М. Кирова по адресу: 220630, г. Минск, ул. Свердлова, 13 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БТИ им. С. М. Кирова.

Автореферат разослан 25 апреля 1980 г.

Ученый секретарь Специализированного Совета К.056.04.01  
кандидат технических наук,  
доцент

Е. М. ДЯТЛОВА

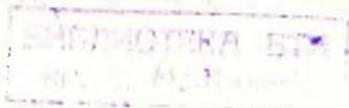
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**А к т у а л ь н о с т ь .** Стремительный рост объемов производства в ряде отраслей промышленности Советского Союза неизбежно сопровождается накоплением вторичных сырьевых ресурсов, которые крайне недостаточно используются в связи с ограниченной возможностью их применения. Последнее несомненно связано с длительностью научного поиска, отсутствием разработанных технологических решений по эффективному применению вторичного сырья, и в большинстве случаев нового оборудования для реализации технологических процессов.

С другой стороны в строительстве все еще ощущается нехватка облицовочных материалов устойчивых к воздействию атмосферных осадков, агрессивных сред и солнечной радиации. Современный облицовочный материал должен сочетать в себе высокую художественную выразительность лицевой поверхности, широкую цветовую гамму и способность сохранять ее при длительной эксплуатации в природных условиях. С точки зрения индустриализации строительства материал должен быть увеличенных размеров, легко обрабатываться и крепиться на лицевые поверхности зданий и сооружений. Всем этим требованиям, по нашему мнению, должно отвечать цветное декоративно-облицовочное пеностекло, разработке технологии которого посвящена настоящая диссертационная работа.

**Ц е л ь р а б о т ы .** Исследование процессов, протекающих при диспергировании силикатных стекол, кинетики вспенивания пеностекла в тонком слое на движущейся подложке, деформационно-упругих характеристик пеномасс и их формирования. Разработка технологии производства цветного декоративно-облицовочного пеностекла и оборудования для ее реализации. Исследование свойств пеностекла в природных условиях.

**Н а у ч н а я з н а ч и м о с т ь и н о в и з н а р а б о т ы .** Исследованы процессы, протекающие при диспергировании силикатных стекол "сухим" и "мокрым" способами. Показаны преимущества диспергирования в жидкой среде — повышение скорости процесса на 20—25% и реакционной способности пенообразующей смеси. Изучены процессы пенообразования в смесях с нейтральными пенообразователями. Установлено положительное влияние вибрации стекол на скорость вспенивания,



выход пеностекла и структуру.

Исследованы кинетика формирования и развития структуры пеностекла при вспенивании смесей без форм в тонком слое на движущейся подложке, деформационно-упругие характеристики пеномасс при изменяющихся структуре пеностекла, температурно-временном режиме вспенивания и составе газовой атмосферы печи вспенивания. Установлено положительное влияние водяных паров на скорость вспенивания и расширение интервала температуры, в котором возможно формирование пеностекла. Показана возможность снижения температуры максимума вспенивания пеностекла (на 20–30°C) за счет ведения процесса при повышенном парциальном давлении водяных паров в печи вспенивания (до 350 мм рт.ст.), при содержании в пенообразующей смеси связанной воды > 0,1%.

Разработана схема многоступенчатого формирования ленты пеностекла и методика графического определения требуемой величины ее подпрессорки при непрерывном способе формирования. Показано, что суммарная величина подпрессорки ленты может быть увеличена по сравнению с критической за счет применения многоступенчатого формирования. Изучено влияние кристаллизации стекла в присутствии красителей. Показано, что стекла не кристаллизующиеся в монолите в области температуры вспенивания обеспечивают максимальный выход пеностекла. Выполнены натурные исследования технологии производства декоративно-облицовочного пеностекла. Показано преимущество натуральных исследований перед лабораторными в части получения более достоверной информации о характере протекания физико-химических процессов на всех этапах получения пеностекла, ускорения разработки технологии и более глубокого изучения эксплуатационных свойств материала.

**Практическая ценность работы.** Получен новый материал – цветное декоративно-облицовочное пеностекло ("пенодекор"), обладающий новыми ценными качествами: художественной выразительностью; широкой цветовой гаммой и характером рельефной поверхности; высокими эксплуатационными свойствами. Новый материал рекомендован для наружной и внутренней облицовки стен зданий и сооружений. Разработана технология его получения и теплотехническое оборудование для производства "пенодекора". Разработаны нормативные докумен-

ты на производство (технологический регламент), применение (ТУ 205 БССР 504-77) и указания по применению РСН 19-77.  
Госстрой БССР

**А п р о б а ц и я р а б о т ы .** В 1979 г. на Домановском комбинате строительных материалов (Брестская обл., БССР) введен в эксплуатацию новый цех по производству цветного декоративно-облицовочного пеностекла мощностью 50 тыс. м<sup>2</sup> в год (I очередь) и начато освоение разработанной технологии. С начала освоения выпущено 12 тыс. м<sup>2</sup> продукции. Расчетный экономический эффект от применения цветного декоративно-облицовочного пеностекла составил 495,9 тыс. руб.

Основные результаты работы докладывались на Всесоюзном Совещании по использованию стеклообразных систем и синтезу новых стекол (Гомель, 1971), Юбилейных сессиях Минского НИИСМ (Минск, 1969, 1979), Всесоюзном совещании "Пути улучшения качества стеклоизделий и интенсификации технологических процессов (Гомель, 1974), Всесоюзном совещании по стеклу (Москва, 1977), XI Международном конгрессе по стеклу (Прага, 1977), IX конференции молодых ученых и специалистов Прибалтики и Белоруссии по проблемам строительных материалов и конструкций (Брест, 1977), Всесоюзном совещании по использованию стекла в строительстве (Гомель, 1979).

**П у б л и к а ц и и .** Материалы диссертации опубликованы в 7 статьях. На разработанные принципы получения пеностекла и новое оборудование получено 2 авторских свидетельства (№663664 и № 659538).

**О б ъ е м р а б о т ы .** Диссертация состоит из введения, обзора литературы, экспериментальной части (5 разделов), выводов, списка литературы и приложений. Содержание работы изложено на 153 страницах машинописного текста, включая 47 рисунков и 20 таблиц. Список литературы включает 160 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В аналитическом обзоре литературы рассмотрены: состояние вопроса по использованию изделий из стекла в современном градостроительстве; перспективы развития градостроительства в СССР и за рубежом; дан технико-экономический анализ применения в строительстве отделочных материалов из стекла и на его основе с учетом их долговечности и эстетического восприятия.

Показано, что новые изделия из стекла, предназначенные для отделки зданий и сооружений, целесообразно производить с комплексом свойств, положительно влияющих на улучшение эксплуатационных характеристик зданий (микроклимат, повышение термического сопротивления наружных стен зданий, долговечность отделки и др.).

Рассмотрены вопросы теории и практики вспенивания пенообразующих смесей на непрерывно движущейся подложке, формирования пиропластических пенемасс и изменения их структуры при вынужденной деформации. Дано обоснование выбора составов стекла и пенообразующей смеси для получения цветного декоративно-облицовочного пеностекла. Определены цель и задачи экспериментального исследования.

Экспериментальная часть диссертации состоит из 5 разделов.

**I. Методы исследования.** Описаны методы исследования стекол, пенообразующих смесей и пеностекла.

Кристаллизационная способность определялась по методу градиентной кристаллизации монолитных и порошкообразных образцов с последующим рентгенографическим и петрографическим анализами и электронной микроскопией, КТР — dilatометрическим методом на dilatометре ДКВ. Химическая устойчивость стекол — по методике ГИС.

Структура и фазовый состав шлифов и аншлифов — на микростановках МКУ-1 и ФМН-2. ДТА — на дериватографе фирмы МОН (Венгрия), удельная поверхность дисперсных систем — на приборе ПСХ-2. Рентгеноструктурные исследования выполнены при помощи дифрактометра УРС-50И со сцинтилляционным счетчиком. Съемка производилась при напряжении до 50 кв, силе тока 10 А, излучение Си, фильтр — никелевый.

Диспергирование стекол производилось в лабораторных шаровых мельницах. Способность пенообразующих смесей к вспениванию изучали в градиентной печи в лодочках из нержавеющей стали, а также по методике, рекомендованной Ф.Шиллом (в цилиндре).

Определение плотности, механической прочности, морозостойкости и водопоглощения производилось по общепринятым методикам для строительных материалов (ГОСТы 7025-67 и 9480-69). Коэффициент теплопроводности — на приборе "Weiss" по методу

стационарного теплового потока. Сорбционную влажность определяли при  $t = 20^{\circ}\text{C}$  и  $\varphi$  воздуха 60, 80 и 97%, коэффициент паропроницаемости определяли на образцах дисках диаметром 100 мм и толщиной 20 мм в термостате по методике М.Л.Хелемского, морозостойкость — по методике Минского НИИСМ.

**Н а т у р н ы е и с с л е д о в а н и я .** технологии производства выполнены в Минском НИИСМе на модели технологической линии, а также на Домановском КСМ на опытно-промышленной линии. Натурные исследования пеностекла проводили в павильоне для прочностных и теплофизических испытаний Минского НИИСМ. Паропроницаемость — на образцах плитках размером 200x200 мм, толщиной 20 мм классическим тензометрическим методом, морозостойкость — по методике ГОСТ 7025-67, атмосферостойкость — на образцах 100x100 мм, годовой цикл испытаний состоял из 44 циклов попеременного замораживания и оттаивания, 60 циклов увлажнения в воде и последующего высушивания с одновременным воздействием ультрафиолетового облучения.

Адгезионные свойства оценивались по прочности сцепления (на отрыв) изделий из пеностекла с цементнопесчаным раствором марок "50" и "100". Полученные результаты сопоставлялись с нормами СНиП.

**2. И с с л е д о в а н и е п р о ц е с с о в , п р о и с х о д я щ и х в п е н о о б р а з у ю щ е й с м е с и в с п е к а х н а р а з л и ч н ы х с т а д и я х ф о р м и р о в а н и я с т р у к т у р ы о б л и ц о в о ч н о г о п е н о с т е к л а .** Обзор литературы по вопросу о рациональном составе стекла для производства цветного декоративно-облицовочного пеностекла указал на целесообразность применения стекол, входящих в следующую область составов (%):  $\text{SiO}_2$  — 70-74;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 1-7,5;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 2,5;  $\text{CaO}$  — 5-6;  $\text{MgO}$  — 2-4;  $\text{R}_2\text{O}$  — 14-16. Для исследований приняты оконное стекло (ВВС) и высокоглиноземистое 6Н, используемое в настоящее время для производства строительного пеностекла. Для улучшения колера пеностекла применены нейтральные пенообразователи (карбонаты, нитраты, сульфаты, щелочи). Для окрашивания пеностекла в массу использованы окислы металлов, а также интенсивно окрашенные стекла (надглазурные силикатные краски).

Исследование кинетики вспенивания пенообразующих смесей в присутствии нейтральных пенообразователей показало, что при

выборе состава исходного стекла должны учитываться в равной мере и такие его свойства, как твердость, определяющая скорость диспергирования, линейное расширение в интервале температуры отжига и эксплуатации пеностекла, склонность к кристаллизации в присутствии пенообразователей и красителей, и наконец колер стекла.

Диспергирование стекол в мельницах периодического действия с неметаллическими мелющими телами осложнено рядом обстоятельств. Основным из них является применение "легких" уралитовых шаров ( $\gamma = 2,4 \text{ г/см}^3$ ), что снижает по сравнению с металлическими мелющими телами ( $\gamma = 7,8 \text{ г/см}^3$ ) производительность мельниц примерно в 2 раза. Процесс ускоряется на 25% при диспергировании стекол в жидкой среде ( $W = 35\%$ ).

Изучен процесс гидратации диспергированных стекол в нейтральной и щелочной средах в присутствии карбонатных пенообразователей и без них. Показано, что накопление связанной воды в минеральной суспензии пропорционально концентрации исследуемой системы и продолжительности процесса гидратации дисперсного стекла в 2,5–3 раза. Введение щелочи (I и 2 н. р-р NaOH) в начальной стадии процесса (до 10 сут) в суспензиях с высокоразвитой поверхностью ( $S$  стекла  $5000 \text{ см}^2/\text{г}$ ) ускоряет процесс гидратации примерно в 2 раза. Дальнейшее повышение концентрации NaOH еще больше усиливает процесс гидратации и способствует активному накоплению силикогеля в исследуемых системах.

Для уточнения влияния гидратации стекол на кинетику вспенивания пеностекла готовились смеси на основе сухих порошков стекла и водных суспензий. Первый этап исследований заключался в предварительной оценке реакционной способности смесей, для чего пробы по 20 г помещались в металлические лодочки и затем вспенивались в градиентной печи. Это позволило выявить наиболее перспективные составы, а также уточнить область температуры, в которой необходимо вести поиск.

На рис. I показана динамика изменения коэффициента объемного вспенивания ( $K_v$ ) пенообразующих смесей оптимальных составов в интервале температуры 500–850°C. Вспенивание производилось в специальной электрической печи, оснащенной устройством для фиксации изменения объема пеностекла в процессе нагрева. Общая оценка результатов исследований производилась по

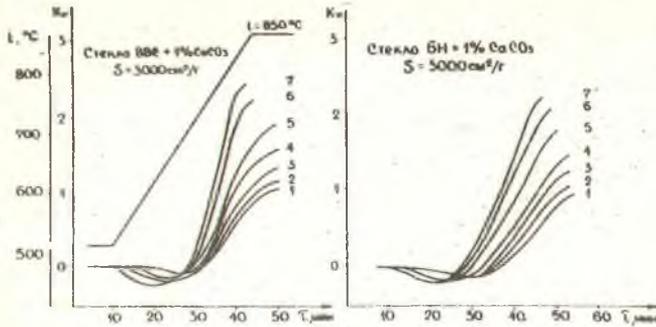


Рис. 1. Кинетика процесса вспенивания пенообразующих смесей для получения декоративно-облицовочного пеностекла: а - стекло ВВС + 1%  $\text{CaCO}_3$ ;  $S = 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ ; б - стекло 6Н + 1%  $\text{CaCO}_3$ ;  $S = 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ ; 1 - в атмосфере воздуха; 2 - в атмосфере азота; 3 - в смеси азот + водяные пары (150 мм рт.ст.); 4 - то же, 250 мм рт.ст.; 5 - то же, 350 мм рт.ст.; 6 - в атмосфере воздуха, влажность смеси 5%; 7 - в атмосфере воздуха, смесь предварительно затворена водой и высушена в течение 1 ч

изменению температуры начала и максимума вспенивания, величине градиента температуры вспенивания и выхода пеностекла ( $K_\phi$ ). При этом сравнивались структура пеностекла и его плотность.

Установлено, что с повышением концентрации водяных паров в атмосфере печи (от 150 до 350 мм рт.ст.) наблюдается снижение температуры начала усадки смеси и температуры начала вспенивания и некоторое уменьшение усадки, предшествующей вспениванию (рис. 1, кривые 3-5). Если снижение температуры начала усадки пенообразующей смеси можно объяснить понижением вязкости стекла в атмосфере водяных паров /Демидович Б.К., Шульц О.Е., Кешинян Т.Н./, то последующие явления, очевидно, связаны с характером диссоциации  $\text{CaCO}_3$  при повышенном парциальном давлении  $\text{CO}_2$  /Маринюв М., Шустер Р.Л., Шилл Ф., Червинский Э./, поскольку процесс протекает в замкнутом объеме, т.е. в элементарной ячейке (рис. 1, кривые 4 и 5). Процесс вспенивания еще больше усиливается в присутствии адсорбированной молекулярной воды (рис. 1, кривые 6 и 7). Такая зависимость процесса вспенивания

практически одинакова как для смесей на основе стекла ВВС, так и 6Н. Различие их состоит лишь в том, что для стекла 6Н кинетические кривые сдвинуты в область более высоких значений температуры и больше наклонены к оси абсцисс. Это объясняется различием их вязкостных свойств в зависимости от состава.

Снижение вязкости пиропластических спеков в присутствии нейтральных пенообразователей позволяет получить весьма удовлетворительную структуру пеностекла (мелкую с замкнутыми ячейками) даже и в том случае, когда исходная дисперсность стекла меньшая ( $2000-3000 \text{ см}^2/\text{г}$ ). Так, в смесях с исходной удельной поверхностью  $2000 \text{ см}^2/\text{г}$  при содержании связанной воды около 1%, получено пеностекло с упорядоченной структурой и средней величиной ячеек 2 мм. Оптимальные результаты при  $S = 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ , для которых необходимая глубина гидратации наступает через 20-25 сут в воде и на 2 сут в 1 н. растворе NaOH. Скорость гидратации стекол может быть значительно повышена (в 5-8 раз) при подогреве суспензий с 20 до  $80^\circ\text{C}$ . Такой же результат достигается при автоклавной обработке ( $P=8 \text{ ат}$ ,  $t=160^\circ\text{C}$ ) суспензий в течение 2-3 ч.

Характерно заметить, что увеличение удельной поверхности пенообразующей смеси выше  $3000 \text{ см}^2/\text{г}$  существенно не влияет на скорость гидратации и кинетику вспенивания. Очевидно, этот уровень дисперсности стекла ( $3000 \text{ см}^2/\text{г}$ ) является вполне достаточным для обеспечения нормального хода процессов гидратации, вспенивания и формирования структуры пеностекла. Этот вывод имеет очень важное практическое значение, так как использование данной зависимости на практике позволяет более чем в 2,5 раза сократить продолжительность процесса диспергирования стекол и соответственно расход электроэнергии на наиболее энергоемком этапе рассматриваемой технологии.

Для оптимальных пенообразующих смесей ( $S = 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ ), содержащих 0,5-1% связанной воды, температура максимума вспенивания пеностекла снижается на  $40-50^\circ\text{C}$ , а интервал температуры вспенивания расширяется на  $30-35^\circ\text{C}$ . Установлено также, что увеличение в исходной смеси количества связанной воды позволяет без ущерба для качества пеностекла уменьшить содержание пенообразователя. Это дает возможность использовать в данной технологии более дефицитное сырье, обладающее постоянством химического состава.

В табл. I приведены данные, характеризующие изменение коэффициента объемного вспенивания пенообразующих смесей на основе стекла ВВС подвергнутого гидротермальной обработке при температуре  $80^{\circ}\text{C}$  в течение 24 ч. Для сравнения приведены также значения  $K_v$  для смесей, прошедших аналогичную влажную обработку при  $20^{\circ}\text{C}$ . Анализ результатов исследований показывает, что в присутствии водяных паров в газовой атмосфере печи формируется достаточно упорядоченная структура, характерная для пеностекла, полученного с применением карбонатных пенообразователей. Насыщение смеси связанной водой (увлажнение, гидротермальная обработка) способствует получению мелкопористой структуры. При этом водопоглощение пеностекла существенно не меняется. Для смесей, содержащих более 1% связанной воды, водопоглощение пеностекла за 24 ч составляет около 50%, в то время как для "сухих" смесей эта величина может повышаться до 70%. Очевидно, это связано с тем, что при снижении вязкости процесс кристаллизации стекла замедляется, а в присутствии свободной щелочи, например  $\text{NaOH}$ , практически отсутствует.

Исследование кинетики вспенивания пеностекла в тонком слое на движущейся подложке позволяет заключить, что методика выбора температурной кривой вспенивания имеет ряд отличительных черт. Температурная кривая на участке до  $t_{\text{max}}$  вспенивания должна рассчитываться по основному уравнению теплопроводности с учетом теплофизических характеристик движущегося слоя, условий теплопередачи в нем и тепломассообмена в печном пространстве. Поскольку структура пеностекла в тонком слое развивается без особых осложнений, вызываемых изменением вязкости по сечению ленты, то зону максимальной температуры можно до минимума сокращать. С учетом этих особенностей можно выбирать и режим стабилизации пеностекла, имея в виду резкое охлаждение ленты до нижнего предела деформации структуры.

Исследование реологических свойств пиропластического пеностекла выполнено в связи с необходимостью подпрессовки ленты пеностекла. Основная цель исследований состояла в определении граничных параметров реологических свойств пеномасс, при которых возможна их деформация без существенных изменений структуры (10-15%) и эксплуатационных свойств пеностекла.

Таблица I

Динамика изменения коэффициента объемного вспенивания гидратированных пенообразующих смесей в интервале температуры 650–850°C

Состав <sup>х)</sup>	Продолжительность нагрева пробы при $t_{max}$ вспенивания, мин.				
	25	30	35	40	45
	Температура максимума вспенивания, °C				
	650	700	750	800	850
	Коэффициент объемного вспенивания				
Продолжительность гидратации 24 ч, $t=20^{\circ}\text{C}$ , стекло					
ВЭС					
2-I-I	0	0	0	0,21	0,50
3-0-0	0	0	0,22	0,50	0,98
5-0-0	0	0	0,32	0,70	1,16
3-0-I	0	0	0,41	1,08	1,31
5-0-I	0	0,12	0,50	1,35	1,55
3-I-0	0	0,18	1,00	1,88	2,18
5-I-0	0	0,21	1,40	2,14	2,30
3-I-I	0	0,78	0,92	2,40	2,50
5-I-I	0	1,00	2,14	2,51	2,70
Продолжительность гидратации 24 ч, $t=80^{\circ}\text{C}$ , стекло					
ВЭС					
2-I-I	0	0	0	0,21	0,75
3-0-0	0	0	0,12	1,51	1,52
5-0-0	0	0,19	0,70	1,32	1,73
3-0-I	0	0,23	0,86	1,83	2,00
5-0-I	0	0,21	1,12	2,06	2,18
3-I-0	0,12	0,67	1,82	1,94	2,58
5-I-0	0,14	0,96	2,21	2,70	2,73
3-I-I	0,25	1,40	2,68	2,85	2,93
5-I-I	0,37	1,75	2,50	2,98	3,06

х) В табл. I приняты следующие обозначения, характеризующие состав исследуемых проб пенообразующих смесей: первая цифра – величина удельной поверхности стекла; вторая – концентрация щелочи (ноль для воды, I – для I н. NaOH); третья – количество пенообразователя<sup>1)</sup> ( $\text{CaCO}_3$ )

Для выбора оптимальных условий формирования пеномасс изучалась их структура, фиксированная резким охлаждением на различных стадиях ее развития. Для исследований приняты пенообразующие смеси на основе стекла ВВС, содержащие 1%  $\text{CaCO}_3$  и 0,5% связанной воды. Исследование деформационно-упругих характеристик пеномасс выполнено по методике, рекомендованной Б.К.Демидовичем. В первой серии опытов пеномасса подвергалась давлению измерительной плиты размером  $100 \times 100$  см с изменяющейся нагрузкой от 0,1 до 0,3 кгс/см<sup>2</sup> в течение 30–70 сек (рис.2). Во второй серии опытов в аналогичных условиях определялась глубина погружения плиты ( $F = 100$  см<sup>2</sup>) массой 20 кг в интервале температуры от 800 до 700°C.

Анализ зависимости  $\Delta H = f(t)$  показывает, что интервал температуры в котором возможно формирование пеностекла с допустимой остаточной деформацией ( $\sim 10\%$ ) сужается по мере увеличения среднего диаметра ячеек. Так для пеностекла с ячейками 3 мм при  $\tau = 70$  сек он составляет всего лишь 50°C и изменяется в том же интервале от 0 до 17%. Для пеностекла с диаметром ячеек 2 мм он несколько шире ( $\sim 75^\circ\text{C}$ ), а усадка значительно меньше (от 0 до 12%). Наилучшие деформационно-упругие характеристики свойственны мелкопористому пеностеклу с преимущественно замкнутыми ячейками ( $d_{\text{ср}} \approx 1$  мм). По мере сокращения процесса формирования (от 70 до 30 мин) интервал температуры сужается примерно в 2 раза (рис.2, кривые 1'–3'). В данном случае для сохранения заданной скорости формирования необходимо увеличивать нагрузку на измерительную пластину.

На рис.3 показана зависимость  $\Delta H = f(\gamma)$  для пеностекла, полученного из смесей состава: стекло ВВС – 99%,  $\text{CaCO}_3$  – 1%, содержание связанной воды 1%. Характеристика пеностекла до формирования  $\gamma$  изменялась в интервале 200–600 кг/м<sup>3</sup>; степень насыщения газами 74–92%; средний диаметр ячеек 0,1–1 мм. Для исследований приняты:  $G = 0,5$  кгс/см<sup>2</sup>;  $t$  начала формирования 800°C;  $\tau$  от 30 до 70 сек;  $t_{\text{max}}$  вспенивания 880°C.

Анализ данных зависимостей (рис.3) показывает, что при постоянном усилии формирования ( $G = 0,5$  кгс/см<sup>2</sup>) продолжительность процесса увеличивается одновременно с повышением плотности пеностекла. При этом скорость деформации пеностекла практически не изменяется, что, очевидно, обусловлено постоянством температуры в печи и незначительным отливом

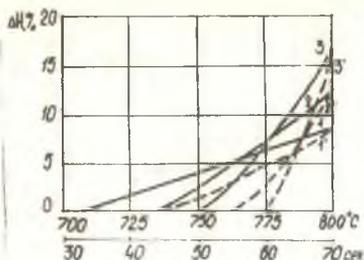


Рис.2.

Рис.2. Изменение глубины погружения измерительной пластины ( $\Delta H$ ) при изменяющихся температуре ленты пеностекла ( $t$ ) и продолжительности формирования ( $\tau$ ) для пеностекла с диаметрами ячеек 1, 2 и 3 мм: 1-3 -  $\Delta H=f(t)$ ; 1'-3' -  $\Delta H=f(\tau)$ ; 1 и 1' - средний диаметр ячеек 1 мм; 2 и 2' - то же, 2 мм; 3 и 3' - то же, 3 мм

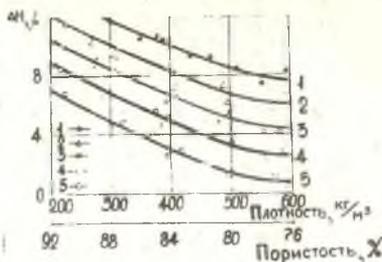


Рис.3.

Рис.3. Изменение глубины погружения измерительной пластины ( $\Delta H$ ) при изменяющейся объемной массе пеностекла ( $\rho = 0,5 \text{ кгс/см}^2$ ;  $t$  формирования =  $800^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 30-70$  сек); кривые 1-5 соответствуют значениям  $\tau = 70$ ; 60; 50; 40 и 30 сек

вязкости пеномассы в слое малой величины. Последний вывод не согласуется с данными, полученными З.Червинским и Б.К.Деми-довичем, изучавших аналогичные зависимости в слое пеностекла большей толщины (60-120 мм). Расхождения в полученных данных свидетельствуют о несколько ином характере проявления реологических свойств пиропластических спеков в тонком слое, что, вероятно, связано с тепловыми явлениями, которым при надлежит решающая роль в формировании вязкости газонасыщенного спека пенообразующей смеси, обладающего весьма низкой теплопроводностью.

Некоторое уменьшение градиента усадки с повышением плотности пеностекла в исследуемом интервале  $\gamma$ , очевидно, связано с изменением структурно-механических свойств пеномасс, обусловленных повышением давления в ячейках меньшего диаметра и подвижности расплава в разделительных стенках большей величины (0,1-0,2 мм против 0,05 для  $\gamma = 200 \text{ кг/м}^2$ ).

Исследование структуры на образцах, полученных из пластин пеностекла свободно развивающегося на движущейся подложке и подвергнутых формованию (при  $G = 0,5$  кгс/см<sup>2</sup> и  $\tau$  от 30 до 70 сек) показало, что степень деформации ячеек даже при максимальном значении  $\tau = 70$  сек незначительна ( $\sim 12\%$ ). В интервале объемной массы 200–600 кг/м<sup>3</sup> значение  $\Delta H$  при постоянных  $t$  и  $G$  изменяется в пределах 5–6%.

Установлено, что область температуры формования пиропластического пеностекла определяется рядом его свойств, среди которых важнейшими являются деформационно-упругие характеристики, обусловленные их структурой с одной стороны и давлением газов в ячейках, с другой. Для тонких пластин (20–40 мм), вспененных на движущейся подложке, упругость пиропластического пеностекла выше, чем для блоков высотой 100 мм и выше.

На основании результатов, полученных при исследовании деформационно-упругих свойств пеномасс и анализа кривых вспенивания, разработан графический метод определения требуемой величины подпрессовки ленты пеностекла при непрерывном способе ее формования. Показано, что суммарная величина подпрессовки ленты может быть увеличена по сравнению с критической путем применения метода многоступенчатого формования.

3. **Н а т у р н ы е и с с л е д о в а н и я т е х н о л о г и и п р о и з в о д с т в а о б л и ц о в о ч н о г о п е н о с т е к л а .** Показано, что при проектировании температурной кривой вспенивания необходимо учитывать изменение теплофизических характеристик слоя пенообразующей смеси, спека и ленты пеностекла в динамике. Особенно важно иметь это в виду на стадии формования ленты пиропластического пеностекла, где его деформационно-упругие свойства изменяются в достаточно узком интервале температуры.

При разработке оптимальных температурно-временных режимов получения пеностекла в туннельной печи подтверждено положительное влияние влаги пенообразующей смеси, связанной воды и атмосферы печи. Показано, что температуру максимума вспенивания можно снизить на 30–70°C введением в пенообразующую смесь 0,5–2% NaOH или за счет гидротермальной обработки смеси.

Исследования относящиеся к разработке технологии полу-

чения цветного пеностекла путем окрашивания в массе позволило установить ряд закономерностей. Показано, что роль кристаллизации стекла в связи с повышенной скоростью нагрева смеси (35–40°C/мин) является второстепенной. Установлено, что в качестве красителей пеностекла можно использовать силикатные краски, которые не усиливают кристаллизационные явления, а наоборот ослабляют. Введение изученных нами красителей в количестве до 1% не изменяет прочностных свойств пеностекла. При окрашивании пеностекла с поверхности наряду с общими технологическими требованиями, предъявляемыми к цветным покрытиям (атмосфера печи, температура плавления и др.), следует особое внимание обращать на согласованность dilatометрических свойств основного и покровного слоев.

4. **Натурные исследования облицовочного пеностекла.** Приведенная прочность декоративно-облицовочного пеностекла при сжатии на 25–30% выше прочности строительного пеностекла, что объясняется отличием в характере структуры (мелкопористый материал), а также наличием на обеих поверхностях монолитной корки, формирующейся в процессе вспенивания пеностекла. Такая же зависимость выявлена и при испытании декоративно-облицовочного пеностекла на изгиб и осевое растяжение.

Теплопроводность декоративно-облицовочного пеностекла удовлетворяет требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным материалам и поэтому должна учитываться при облицовке жилых зданий с целью повышения или уменьшения ее толщины.

Легкое декоративно-облицовочное пеностекло ( $\gamma \leq 300 \text{ кг/м}^3$ ) является неморозостойким материалом. Оно разрушается с поверхности вследствие деструктивного действия льда. С увеличением плотности материала повышаются его прочность и морозостойкость (для  $\gamma \geq 500 \text{ кг/м}^3$  – 15 циклов попеременного замораживания и оттаивания, для  $\gamma \geq 700 \text{ кг/м}^3$  – 25 циклов). При нанесении гидрофобной пленки на нерабочие поверхности прочность легкого пеностекла ( $\gamma \leq 300 \text{ кг/м}^3$ ) снижается на 30% после 25 циклов, после 35 циклов материал практически разрушается. При  $\gamma \geq 500 \text{ кг/м}^3$  морозостойкость удовлетворяет требованиям испытаний по методике ГОСТ 7025–67.

В натуральных условиях испытаний пеностекло с плотностью  $200 \text{ кг/м}^3$  в более полной мере удовлетворяет всем требованиям по морозостойкости, т.е. оно выдерживает нагрузки, возника-

Таблица 2

Основные свойства декоративно-облицовочного пеностекла

Наименование показателей	Значения марок			
	300	500	700	
Объемная масса, кг/м <sup>3</sup> , не более	300	500	700	
Предел прочности при изгибе, МПа, (кгс/см <sup>2</sup> ), не менее	0,39 (4)	1,18 (12)	1,76 (18)	
Предел прочности на осевое растяжение, МПа, (кгс/см <sup>2</sup> )	-	0,39 (55)	-	
Предел прочности при сжатии, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	1,1 (11,3)	5,4 (55)	-	
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) (ккал/(м·ч·град), не более	0,12(0,1)	0,16(0,14)	0,20(0,17)	
Коэффициент паропроницаемости	0	0	0	
Сорбция по массе	$\varphi = 60\%$	0,014	0,021	-
	$\varphi = 80\%$	0,021	0,085	-
	$\varphi = 97\%$	0,140	0,160	-
Десорбция по массе	$\varphi = 97\%$	0,149	0,517	-
	$\varphi = 80\%$	0,050	0,132	-
	$\varphi = 60\%$	0,017	0,025	-
Водопоглощение с поверхности, г/см <sup>2</sup> , не более	0,1	0,07	0,05	
Водопоглощение общее, % по массе, не менее	10,0	3,0	2,0	
Морозостойкость, циклов попеременного замораживания и оттаивания, не менее	15	20	25	
Сцепление с раствором, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	М "50"	-	0,5(5,4)	-
	М "100"	-	0,6(5,7)	-

ющие в результате изменения температуры. Это объясняется незначительным водонасыщением такого пеностекла и отсутствием капиллярного подсоса.

Адгезионные свойства пеностекла удовлетворяют требованиям, предъявляемым к облицовочным материалам. Прочность сцепления с кирпичем на 15–20% выше требуемой по СНиП.

Морозостойкость контактной зоны между пеностеклом и раствором после 35 циклов замораживания и оттаивания в воде удовлетворяет требованиям. Прочность сцепления снижается всего лишь на 15%, что связано с незначительным накоплением влаги в контактной зоне. В натуральных условиях эксплуатации при  $\varphi \geq 80\%$  накопление влаги в контактной зоне не происходит.

В натуральных условиях эксплуатации пеностекло с  $\gamma \geq 200$  кг/м<sup>3</sup> не разрушалось в течение 2 лет, при испытаниях в климатической камере – в течение 12 условных лет.

5. Технико-экономическая оценка производства цветного декоративно-облицовочного пеностекла. Приведены расчет экономической эффективности производства пеностекла методом непрерывного вспенивания, калькуляция себестоимости 1 м<sup>2</sup> изделий, полученных по различным технологическим схемам, расчет экономической эффективности применения пеностекла для облицовки стен зданий.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны составы пенообразующих смесей, технология получения цветного декоративно-облицовочного пеностекла и теплотехническое оборудование для его производства. Получен новый материал с широким диапазоном свойств, который рекомендован для наружной и внутренней облицовки жилых зданий и сооружений.

Организован промышленный выпуск облицовочного пеностекла на Домановском комбинате строительных материалов. Подтверждена технико-экономическая целесообразность его применения в современном индустриальном строительстве.

2. Изучены процессы, протекающие в пенообразующей смеси и пиропластических спеках при нагревании. Показано, что для получения декоративно-облицовочного пеностекла пригодны алюмосиликатные силикатные стекла. Определены граничные ус-

ловия для критериальной оценки, необходимой при выборе состава стекла.

Установлена количественная взаимосвязь между составом пенообразующей смеси и условиями получения пеностекла методом непрерывного вспенивания. Подтверждено положительное влияние свободных щелочей ( $\text{NaOH}$  до 2%), химически связанной воды (до 1%) и водяных паров в атмосфере печи (до 350 мм рт.ст.) на скорость спекания смеси, вспенивание пеностекла и формирование замкнутой ячеистой структуры.

Изучена кинетика пенообразования в смесях на основе гидратированных стекол и нейтральных пенообразователей. Показано, что накопление связанной воды в минеральной суспензии (до 1%) пропорционально концентрации щелочи, продолжительности процесса (4–24 ч) и температуре (20–80°C). Установлено, что к моменту начала пенообразования в спеке остается вполне достаточное количество связанной воды (0,1–0,2%), которое необходимо для ускоренного вспенивания пеностекла при сниженной на 30–70°C температуре максимума вспенивания.

Установлено, что гидратация дисперсных стекол, также как и вспенивание пеностекла в атмосфере водяных паров (до 350 мм рт.ст.), не ухудшают макроструктуру конечного продукта. Наоборот, прослеживается некоторое ее упорядочение, что подтверждается снижением водопоглощения пеностекла.

4. Установлено, что температурная кривая на участке до  $t_{\max}$  вспенивания (800–850°C) должна рассчитываться по основному уравнению теплопроводности с учетом теплофизических характеристик движущегося слоя, условий теплопередачи в нем и теплообмена в печном пространстве. Поскольку структура пеностекла в тонком слое (10–40 мм) развивается без особых осложнений, вызываемых изменением вязкости по сечению ленты, то зону максимальной температуры можно до минимума сокращать. С учетом этих особенностей можно выбирать и режим стабилизации пеностекла, имея в виду резкое охлаждение ленты до нижнего предела деформации структуры (700–760°C). Поэтому при выборе конструкции туннельной печи для вспенивания необходимо учитывать возможность повышения плотности смеси, двухстороннего подвода тепла и регулировки газовой атмосферы печи.

5. Область температуры формирования пиропластического пе-

ностекла определяется рядом его свойств, среди которых важнейшими являются деформационно-упругие характеристики, обусловленные их структурой, с одной стороны, и давлением газов в ячейках, с другой. Для тонких пластин (10–40 мм), вспененных на движущейся подложке, упругость пиропластического пеностекла выше, чем для блоков высотой 100 мм.

Максимальная остаточная деформация отдельных ячеек (50%) обнаружена в пристенном слое, что связано с более высокой температурой пеностекла на поверхности. Повышение давления прессования в интервале 0,1–0,3 кгс/см<sup>2</sup> способствует ускорению процесса в пределах остаточной деформации от 5 до 20%. Таким образом, повышение реакционной способности пенообразующей смеси, стимулирующее формирование мелкопористого пеностекла (диаметр ячеек до 1 мм), способствует увеличению подвижности пеномасс и расширению интервала температуры, в котором возможно формование с минимальной остаточной деформацией структуры.

6. На основании данных о деформационно-упругих свойствах пеномасс и анализа кинетических кривых вспенивания разработан графический метод определения требуемой величины подпрессовки ленты пеностекла при непрерывном способе ее формования и способ многоступенчатого формования. Показано, что суммарная величина подпрессовки ленты может быть увеличена на 25–30% по сравнению с критической (20%) путем применения многоступенчатого формования.

7. Исследование кристаллизации стекол в присутствии добавок стимулирующих данный процесс показало, что в связи с ускоренной термической обработкой стекол и пенообразующих смесей на их основе действие добавок ослабляется. Однако повышение их концентрации в смеси более 0,4% снижает выход пеностекла более, чем в 2 раза. Показано, что стекла не кристаллизуются в монолите в области температуры вспенивания пеностекла, обеспечивая максимальный выход пеностекла. Незначительная кристаллизация дисперсных стекол существенно не влияет на структуру и выход пеностекла при вспенивании его в тонком слое.

8. Выполнены натурные исследования технологии производства цветного декоративно-облицовочного пеностекла. Установлен ряд зависимостей, подтверждающих взаимосвязь свойств пе-

ностекла с составом, структурой и условиями его получения. Показано, что повышение дисперсности стекла ( $2000-5000 \text{ см}^2/\text{г}$ ), содержания пенообразователя ( $0,8-1,2\% \text{ CaCO}_3$ ), химически связанной воды ( $0,1-1\%$ ), парциального давления водяных паров в газовой атмосфере печи ( $150-350 \text{ мм рт.ст.}$ ) и исходной плотности смеси ( $0,75-0,95 \text{ г/см}^3$ ) стимулируют развитие мелкопористой структуры, снижение объемной массы, сорбционной способности, повышение теплофизических, прочностных и термомеханических свойств пеностекла.

9. Разработаны температурно-временные режимы получения пеностекла с широкой гаммой эксплуатационных свойств и различными вариантами фактуры лицевой поверхности.

10. Изучены свойства пеностекла и установлены следующие зависимости. Приведенная прочность декоративно-облицовочного пеностекла на  $25-30\%$  выше, чем для строительного, что объясняется особенностями его структуры и наличием на обеих поверхностях монолитной корки. Теплофизические свойства для образцов равнозначной плотности практически одинаковы. Морозостойкость при испытании в натуральных условиях эксплуатации удовлетворяет требованиям и повышается с увеличением плотности. Адгезионные свойства удовлетворяют требованиям, предъявляемым СНиП к другим облицовочным материалам.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Демидович Б.К., Пилецкий В.И., Садченко Н.П., Петров Б.И. Непрерывное формование изделий из пеностекла. Краткие тезисы докладов Всесоюзного совещания "Пути интенсификации процессов стекловарения и новые технические способы получения стекла". М., ВНИИЭСМ, 1974, с.83-85.

2. Демидович Б.К., Пилецкий В.И., Петров Б.И. Новые виды изделий из пеностекла. Сб. Новые строительные материалы и изделия. Минск, "Полымя", с.81-86.

3. Пилецкий В.И., Демидович Б.К., Фисюк Г.К., Петров Б.И. Технологические особенности промышленного производства пеностекла методом непрерывного формования. Тезисы докладов Всесоюзного совещания по стеклу "Интенсификация технологических процессов производства стекла и улучшение качества изделий". М., ВНИИЭСМ, 1977, с.64-65.

4. Пилецкий В.И., Демидович Б.К., Фисюк Г.К., Петров Б.И. Способы производства пеностекла и их практическое применение. Техн. информация. Стекольная промышленность. М., ВНИИЭСМ, 1977, вып. II, с. 15-19.

5. Демидович Б.К., Акулич С.С., Пилецкий В.И., Петров Б.И. Выбор рациональной технологии и оборудования для производства строительного пеностекла. Краткие тезисы докладов Всесоюзного совещания "О повышении эффективности производства и применения в строительстве стекла. Материалов и изделий на его основе". М., ВНИИЭСМ, 1979, с. 44-45.

6. Демидович Б.К., Акулич С.С., Петров Б.И. Цветное облицовочное пеностекло в современном градостроительстве. Тр. XI Международного конгресса по стеклу. Прага, 1977, т. 5, с. 457-465.

7. Демидович Б.К., Садченко Н.П., Каменецкий С.П., Майзель И.Л., Петров Б.И. Эффективный материал для низкотемпературной изоляции. Сб. "Новые строительные материалы и изделия". Минск, "Польмя", 1975, с. 87-90.

8. Демидович Б.К., Пилецкий В.И., Мацевич И.И., Лапин Л.М., Майзель Р.Г., Петров Б.И., Шлык В.И., Самсон М.С. Установка для получения пеностекла непрерывным способом, Авт. свид. СССР № 663664, кл. С03В 19/08. Бюлл. "Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки", 1979, № 19.

9. Демидович Б.К., Пилецкий В.И., Мацевич И.И., Лапин Л.М., Петров Б.И., Качалов Ю.Б. Авт. свид. СССР № 659538, кл. С03В 19/08. Бюлл. "Изобретения, открытия, промышленные образцы, товарные знаки", 1979, № 11.

Сопроводитель

/ПЕТРОВ Б.И./

Петров Борис Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА  
ЦВЕТНОГО ДЕКОРАТИВНО-ОБЛИЦОВОЧНОГО ПЕНОСТЕКЛА

Подписано в печать 15.04.80. Формат 60x84<sup>1</sup>/16. ЛТ 06726.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,15. Уч. -изд. л. 1,2. Тираж 100 экз.

Заказ 276. Бесплатно.

Отпечатано на ротапринте ВГИ им.С.М.Кирова.

220630. Минск,Свердлова,13.