

## ФИЗИКА

УДК 666.3.7: 629.3+535.55

*В. М. Кульбенков, А. И. Войтенков, А. В. Хомченко, В. Г. Гузовский,  
О. Е. Коваленко, И. У. Примак*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ЗАКАЛЕННЫХ СТЕКОЛ ДЛЯ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА

UDC 666.3.7: 629.3+535.55

*V. M. Kulbenkov, A. I. Voitenkov, A. V. Khomchenko, V. G. Guzovsky, O. E. Kovalenko,  
I. U. Primak*

### RESEARCH INTO THE PECULIARITIES OF THE PROCESS OF PRODUCING TEMPERED GLASS FOR SURFACE TRANSPORT

#### **Аннотация**

Выполнен анализ тепловых полей в печи закалки автомобильных стекол, получены условия создания равномерного распределения температуры в стекле. Теоретически и экспериментально исследованы процессы воздушного охлаждения при закалке стекла. Обоснованы технические требования к технологическому оборудованию, разрабатываемому в целях освоения в республике производства закаленных стекол для наземного транспорта и сельскохозяйственной техники.

#### **Ключевые слова:**

гнутое закаленное стекло, наземный транспорт, технологическое оборудование, испытательное оборудование.

#### **Abstract**

The analysis of thermal fields in the furnace for automobile glass tempering is performed and conditions of achieving uniform distribution of temperature in glass are obtained. Processes of air cooling during glass tempering are studied theoretically and experimentally. Technical requirements to the technological equipment designed with the purpose of launching the manufacture of tempered glass for surface transport and agricultural equipment in Belarus are justified.

#### **Key words:**

shaped tempered glass, surface transport, technological equipment, testing equipment.

#### **Введение**

В стеклах, охлажденных по определенному режиму, возникают закономерно распределенные внутренние напряжения, способствующие повышению их механической термической стойкости. Процессы закалки стекла известны

давно и достаточно хорошо исследованы [1–7]. В то же время существует целый ряд технологических аспектов, которые определяют качество закаленного стекла и эффективность самого процесса закалки и остаются малоизученными. Конечно, эта проблема может быть решена путем закупки соответствующих

технологий и оборудования, но в современных условиях актуальны разработка и использование импортозамещающих технологий. Очевидно, что такие решения предполагают предварительную проработку их технической составляющей: разработку макетов устройств технологической цепи, отработку отдельных этапов процесса закалки, формулировку технических требований к технологическому процессу и оборудованию и т. д. Данная работа посвящена исследованию процесса закалки стекла и выработке технических требований, обеспечивающих эффективное производство закаленного стекла для наземного транспорта.

Известно, что при производстве закаленного стекла особое внимание уделяется обеспечению равномерного распределения температуры по поверхности и глубине стекла [2, 4, 5]. Последнее, в свою очередь, требует обеспечения равномерного и интенсивного охлаждения всей поверхности стекла при его воздушоструйной закалке [5–9]. С технической точки зрения выполнение этих условий является достаточно сложной задачей. Поэтому при проек-

тировании технологического оборудования, оснастки и разработке технологического процесса изготовления таких стекол целесообразно провести исследования динамики тепловых полей и газодинамических процессов в печах закалки стекла, что позволит сократить материало- и энергоемкие экспериментальные исследования различных вариантов закалки стекла.

### *Методика эксперимента*

С целью проведения комплекса исследований, предваряющих разработку и изготовление экспериментального образца горизонтального типа печи закалки стекол, был спроектирован и изготовлен макет печи (рис. 1), позволяющий провести все экспериментальные исследования. Размеры внутреннего пространства печи составляют  $2 \times 1 \times 0,5$  м. Теплоизоляция корпуса печи, в котором происходит нагрев стекла, выполнена с использованием последовательно расположенных слоев термостойкой каолиновой ваты, защищенной стеклотканью, легковесного огнеупорного кирпича и минеральной ваты.

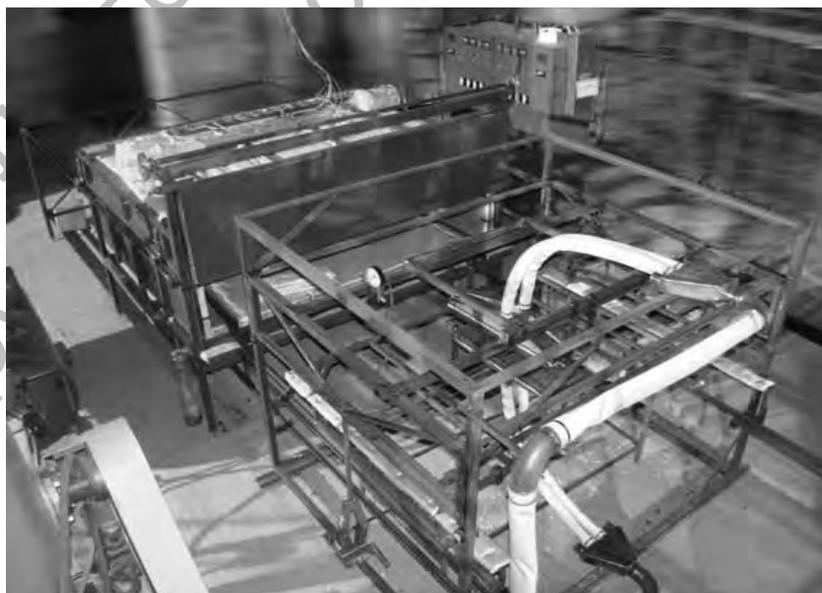


Рис. 1. Фотография макета печи закалки стекол

Нагрев образцов в печи осуществлялся нихромовыми спиралями диаметром 40 мм и длиной 1,5 м, поддерживаемыми под сводом печи тонкостенными кварцевыми трубками. Диаметр нихромовой проволоки равен 3 мм. Расстояние между осями спиралей дискретно варьировалось в пределах от 90 до 200 мм, все 24 спирали расположены эквидистантно в одной плоскости, а их мощность одинакова. Стекло, обычно толщиной 4...6 мм, укладывалось по контуру на раму моллирования и помещалось в печь. Расстояние между стеклом и спиралями также можно

было изменять в диапазоне от 100 до 400 мм путем изменения высоты опорных стоек, поддерживающих раму моллирования.

Температура в различных точках печи на поверхности и внутри стекла одновременно измерялась с помощью хромель-алюмелевых термопар (диаметр провода 0,3 мм), подключенных к четырехканальному измерителю температуры ТРМ-251 и шестиканальному электронному регистратору РМТ 69L. Схема измерения температуры представлена на рис. 2.

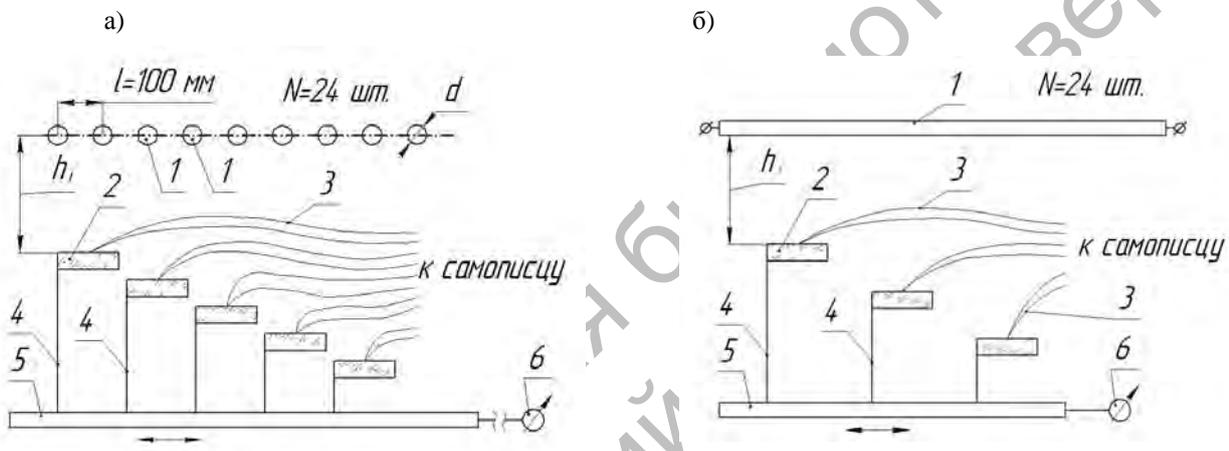


Рис. 2. Схема измерения распределения температуры в печи закалки в направлениях, перпендикулярном (а) и параллельном (б) оси нагревателей: 1 – нихромовые нагреватели; 2 – образцы стекла; 3 – термопары; 4 – держатели образцов стекла; 5 – система перемещения стекла; 6 – измеритель перемещения стекла

Погрешность измерения температуры не превышала  $2^{\circ}\text{C}$ , инерционность измерений, по оценкам авторов, была не более 3 с. При измерении температуры спай термопары приклеивался к поверхности стекла высокотемпературной замазкой на основе силиката натрия и порошка оксида алюминия. Для измерения температуры внутри стекла термопары размещались в углублениях диаметром 1,2 мм.

#### Исследование температурных полей в печи закалки

Анализ спектров излучения нихрома при температуре, близкой к предельной для данного материала, и ти-

пичных спектров поглощения стекла [10] показывает, что достижение равномерного распределения температуры по глубине стекла в процессе закалки можно осуществить путем подбора температуры нагревателей для каждой толщины  $d$  закаливаемого стекла [1–4], т. к. интегральный коэффициент поглощения стеклом теплового излучения составляет  $\sim 25\%$ , а для равномерного нагрева стекла необходимо, чтобы около  $50\%$  излучения проникло на расстояние, равное  $0,5d$ . Энергия непоглощенного стеклом излучения в итоге уйдет преимущественно на повышение температурного фона в печи, т. е. на нагрев поверхности стекла, температура которой и так выше

температуры его внутренних слоев. При этом в ходе проведения таких оценок не учитывался перенос тепла вследствие теплопроводности, конвекции воздуха в печи, излучения стенок и т. д., поэтому были выполнены исследования равномерности распределения температуры в

объеме печи. Результаты измерений распределения температуры по толщине стекла  $\Delta T = T_{\text{п}} - T_{\text{ц}}$  при различной температуре нагревательных элементов представлены на рис. 3, где  $T_{\text{п}}$  и  $T_{\text{ц}}$  – температура на поверхности стекла и внутри стекла на глубине 0,5 d.

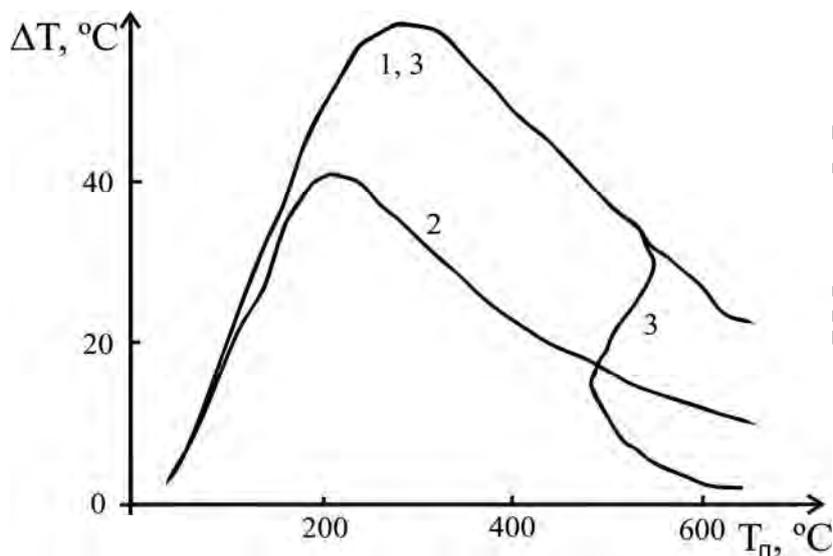


Рис. 3. Зависимость перепада температуры по толщине стекла на стадии его нагрева от режимов нагрева: 1 – время нагрева 6 мин, печь включена на полную мощность; 2 – время нагрева 14 мин, печь включена на половинную мощность; 3 – время нагрева 11 мин, нагрев в печи, включенной на полную мощность, до температуры 580 °C с последующим снижением мощности печи в 4 раза

Наименьший перепад температуры  $\Delta T$  по толщине стекла для трех исследованных режимов закалки достигнут при резком снижении скорости нагрева стекла после достижения его поверхностью температуры 550 °C. Величина  $\Delta T$  в этом случае (см. рис. 3, кривая 4) составила всего 6 °C, т. е. снижение температуры нагревателей (снижение потребляемой ими мощности) приводит к существенному выравниванию температуры в объеме стекла. Однако при этом длительность стадии нагрева до закалочной температуры 650 °C возрастает вдвое. Измеренная с помощью пирометра температура нагревателей при максимальной потребляемой ими мощности и температуре в печи, равной 600 °C, достигала 1120 °C, т. е. приближалась к предельно допустимой для нихро-

ма температуре, равной 1200...1250 °C. Чтобы снизить температуру нагревателя до более оптимальных значений (900...850 °C) и сохранить при этом прежнюю радиационную мощность печи, необходимо либо практически вдвое увеличить число нагревателей и плотность их расположения под сводом печи, либо перейти к использованию нагревателей другого типа, например, керамических нагревателей. Это, естественно, приведет к дополнительным затратам, однако, как показали результаты выполненных измерений и расчетов, такие затраты окупятся вследствие повышения эффективности процесса закалки стекла.

Таким образом, для минимизации времени нагрева стекла до закалочной температуры с учетом равномерного

распределения температуры по толщине стекла и ограничения температуры источника излучения процесс нагрева должен включать в себя следующие стадии: нагрев при максимальной температуре нагревателя до выхода величины  $\Delta T$  на предельный уровень; плавное снижение температуры нагревателя до минимального значения с постоянной скоростью в среднем диапазоне температур для стабилизации и уменьшения величины  $\Delta T$  до предельно низкого уровня; возможный скоростной нагрев стекла на финишной стадии процесса до закалочной температуры при максимальной температуре нагревателя.

Равномерный нагрев стекла в процессе его закалки по всей его поверхности является вторым условием получения качественного изделия. Это также достигается оптимальным расположением системы нагревателей относительно друг друга и нагреваемого стекла. Ниже приведены результаты исследований по оптимизации параметров нагревательной системы для изготовленного макета печи закалки. На рис. 4 приведены результаты измерения неоднородности температурного поля  $\Delta T(y)$  в направлении, перпендикулярном ориентации оси нагревателя.

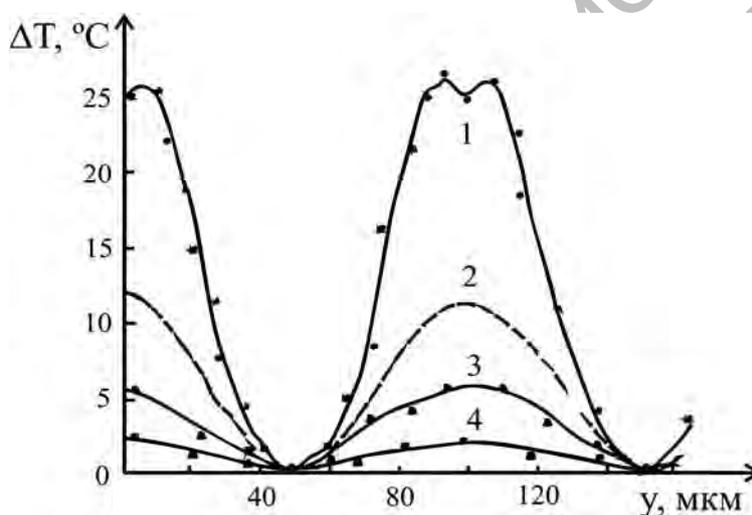


Рис. 4. Изменение температуры вдоль поверхности стекла в направлении, перпендикулярном оси нагревателя, в зависимости от расстояния до него: 100, 150, 200 и 300 мм (кривые 1...4, соответственно)

Здесь  $\Delta T(y)$  – зависимость изменения температуры по толщине стекла от координаты  $y$  для точки, расположенной под одной из спиралей или в промежутке между ними. Как и следовало ожидать, по крайней мере, при расстояниях до нагревателя, в несколько раз больших его диаметра, интенсивнее прогреваются зоны стекла, расположенные непосредственно под спиралью. По мере удаления от нагревателей неоднородность распределения температуры уменьшается, однако при этом пропорционально квадрату расстояния до на-

гревателя будет убывать плотность теплового потока вблизи поверхности и в объеме стекла, поэтому расстояние от нагревателей до поверхности стекла более 300 мм (см. рис. 4, кривые 3 и 4) снижает эффективность нагрева стекла. Учитывая изложенное, было предложено уменьшить расстояние между спиралью в 1,5...2 раза. Следует отметить, что по мере приближения стекла к нагревателям увеличивается равномерность распределения температуры вдоль их оси (рис. 5) и практически стабильное тепловое поле устанавливается на расстоянии от края

спиралей, в 1,3...1,5 раза превышающем расстояние от стекла до спирали.

Таким образом, при расстояниях  $h = 150...200$  мм, обусловленных конст-

рукцией печи, следует применять нагреватели длиной, превышающей размеры стекла не менее чем на 500 мм.

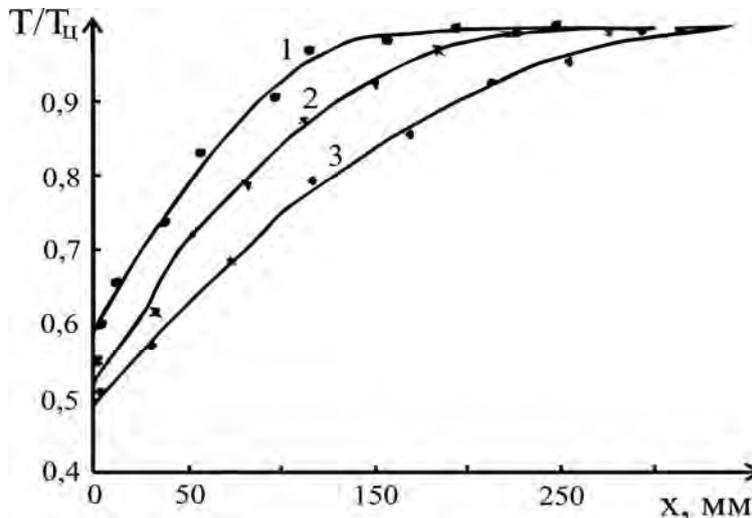


Рис. 5. Распределение температуры в стекле вдоль оси нагревателя при расстоянии от нагревателя до стекла, равном 100 (кривая 1), 150 (кривая 2) и 250 мм (кривая 3):  $T_ц$  – температура, измеренная в точке, расположенной на оси спирали,  $l = 100$  мм

**Моделирование и экспериментальные исследования процессов воздушоструйной закалки стекла**

Эффективность закалки стекла, наряду с температурными полями, в значительной мере определяется интенсивностью теплообмена стекла при его

обдуве воздухом, которая зависит в основном от скорости истечения воздуха из закалочной решетки и удельного расхода, используемого при обдуве воздуха. Принципиальная схема системы охлаждения представлена на рис. 6.

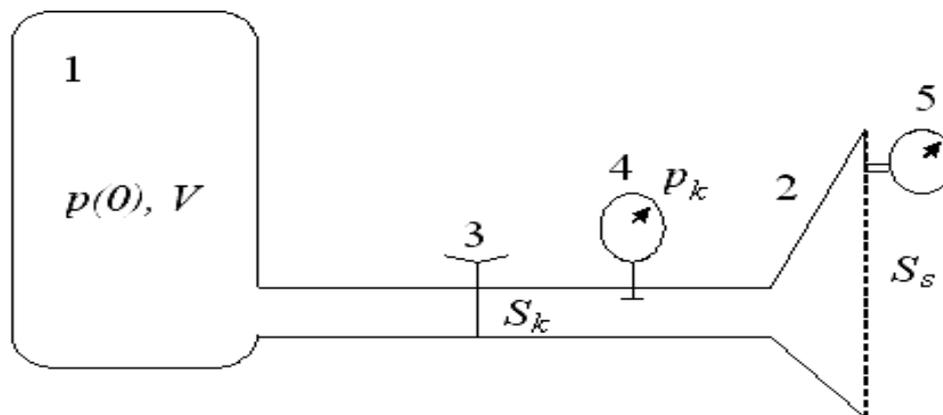


Рис. 6. Принципиальная схема системы охлаждения: 1 – ресивер; 2 – закалочные решетки; 3 – регулятор давления; 4, 5 – манометры

Рассмотрим результаты моделирования процессов воздушоструйной заделки стекла. Пусть имеется закрытый сосуд (ресивер) объемом  $V$ , заполненный воздухом при давлении  $p(0)$ . При открытии клапана 3 происходит истечение воздуха из отверстий закалочной решетки суммарной площадью поперечного сечения  $S$ . Процесс истечения воздуха можно считать адиабатическим. Возможны два режима истечения воздуха: при  $p_{атм}/p \leq 0,53$  (критический режим) процесс проходит с постоянной скоростью истечения, достаточно близкой к скорости звука в воздухе [11],

$$v_{кр} = \sqrt{\gamma p_{атм} / \rho_{атм}}, \quad (1)$$

где  $p_{атм}$  и  $\rho_{атм}$  – давление и плотность воздуха;  $\gamma$  – показатель адиабаты,  $\gamma = 1,405$ .

При  $p_{атм}/p > 0,53$  (режим истечения докритический) скорость воздуха определяется выражением [11]

$$v = \sqrt{2 \frac{\gamma}{1-\gamma} \frac{p}{\rho} \left[ \left( \frac{p_{атм}}{p} \right)^{2/\gamma} - \left( \frac{p_{атм}}{p} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]}, \quad (2)$$

а массовый расход

$$M_g = \varphi S_s \sqrt{2 \frac{\gamma}{1-\gamma} \frac{p}{\rho} \left[ \left( \frac{p_{атм}}{p} \right)^{2/\gamma} - \left( \frac{p_{атм}}{p} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]},$$

где  $\varphi = 0,685$  [11].

На выходе из сопел суммарным сечением  $S_s$  давление равно  $p_{атм}$ , давление на манометре  $p_k$ , площадь поперечного сечения, где находятся клапан 3 и манометр 4, равно  $S_k$ . Тогда для стационарного и изоэнтропического истечения газа можно записать

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{(\gamma-1)} \frac{p}{\rho} &= \frac{v_k^2}{2} + \frac{\gamma}{(\gamma-1)} \frac{p_k}{\rho_k} = \\ &= \frac{\gamma}{(\gamma-1)} \frac{p_{атм}}{\rho_{атм}} + \frac{v^2}{2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $p_k$ ,  $\rho_k$ ,  $v_k$  – давление, плотность, скорость воздуха в трубе сечением  $S_k$  соответственно.

При этом

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = \frac{p_k}{\rho_k^\gamma} = \frac{p_{атм}}{\rho_{атм}^\gamma} = const \quad (4)$$

и

$$v_k = \frac{\rho_{атм} S_s}{\rho_k S_k} v. \quad (5)$$

Подставляя выражение (5) в (3) и учитывая условия (4), можно получить

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \left( \frac{p_k}{\rho_k} - \frac{p_{атм}}{\rho_{атм}} \right) = \frac{v^2}{2} - \frac{v^2}{2} \left( \frac{\rho_{атм} S_s}{\rho_k S_k} \right)^2, \quad (6)$$

$$\rho_k = \rho_{атм} \left( \frac{p_k}{p_{атм}} \right)^{1/\gamma}. \quad (7)$$

Рассчитанные в рамках модели временные зависимости давления в ресивере и скорости истечения воздуха получены с учетом последовательного изменения массового расхода и плотности газа в ресивере и представлены на рис. 7 и 8.

Зависимости получены при начальном значении давления в ресивере  $p(0) = 8$  атм. и его объеме  $20 \text{ м}^3$ . Сечение  $S_s$  рассчитывалось следующим образом: вся закалочная решетка была разбита на секции ввиду необходимости варьирования размеров закаливаемых стекол, секции были одинаковыми и взаимозаменяемыми, количество отверстий в каждой из  $N$ -секций составляло 100 шт., диаметр отверстий  $d$  варьировался (3, 4 или 5 мм), суммарная площадь выходных отверстий составляла  $S_s = N \cdot 100 \cdot (\pi \cdot d^2) / 4$ . Из анализа приведенных на рис. 7 результатов измерения изменения во времени давления в ресивере (а) и скорости истечения воздуха из закалочной решетки (б) при различных значениях диаметра отверстий в ней следует, что чем меньше диаметр отверстий в решет-

ке, тем медленнее уменьшается давление воздуха и, кроме того, при уменьшении диаметра отверстия время, в течение которого соблюдается критический режим истечения воздуха, увеличивается. На рис. 7, б стрелкой отмечено начало падения давления воздуха на выходе из решетки по показаниям манометра 5. При этом очевидно, что скорость истечения

воздуха из закалочной решетки зависит от давления в ресивере и характер этой зависимости не изменяется при варьировании диаметра отверстий в закалочной решетке. Незначительные отклонения результатов расчетов от данных измерений обусловлены, вероятно, трением в системе, которое не учитывалось в модели авторов.

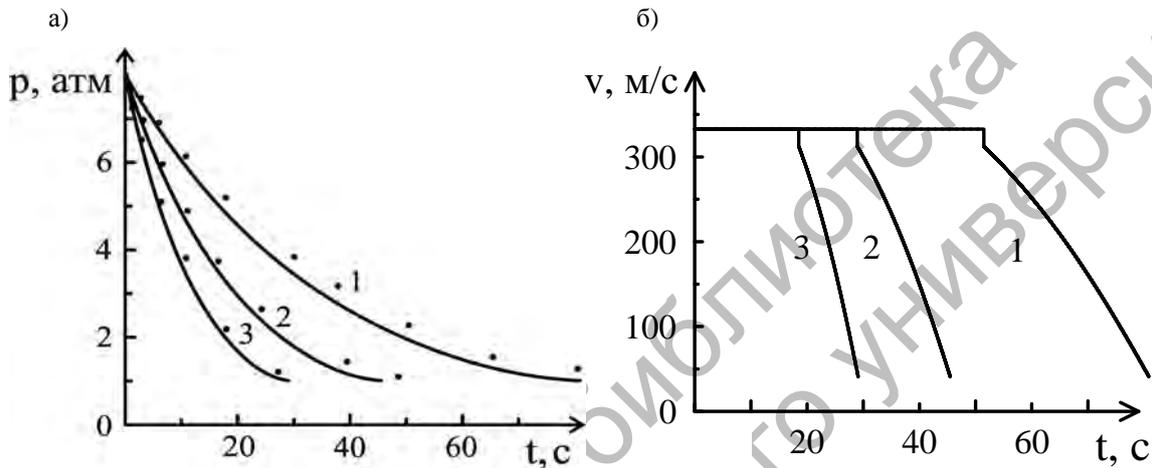


Рис. 7. Зависимость давления в ресивере (а) и скорости истечения воздуха из решетки (б) от времени после открытия клапана 3 при различных значениях диаметра отверстий закалочной решетки: 1 – 3 мм; 2 – 4 мм; 3 – 5 мм; сплошная линия – расчетная кривая, точки – результаты измерений

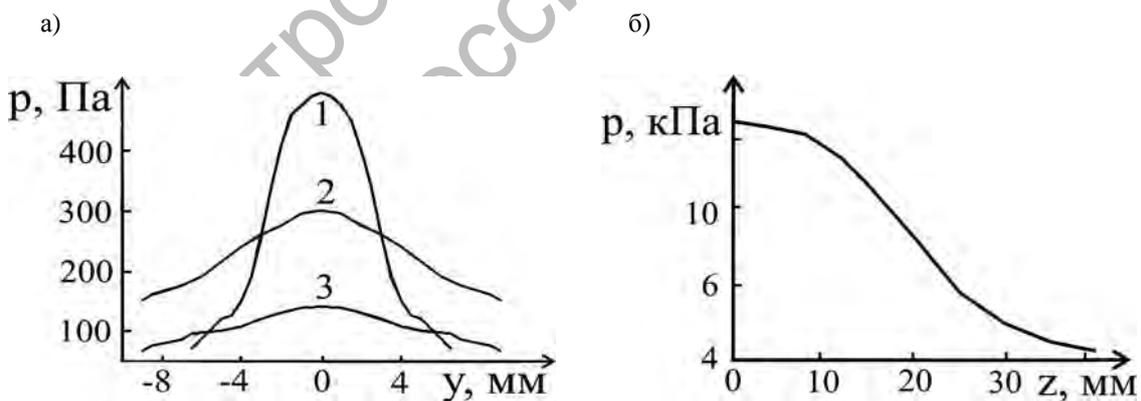


Рис. 8. Изменение давления воздуха в потоке, идущем из закалочной решетки, в его поперечном сечении (а) на расстоянии 20, 30 и 40 мм (кривая 1, 2 и 3) и в продольном направлении в зависимости от расстояния от отверстий (б)

На рис. 8 приведены результаты измерения распределения давления в воздушном потоке, идущем из закалочной решетки печи, в его поперечном и продольном сечениях.

Измерения проводились с помощью миниатюрной насадки с диаметром отверстия 1 мм, помещенной в воздушный поток и соединенной с высокочувствительным манометром. В начальный

момент времени  $P(0) = 15$  кПа, диаметр отверстий – 4 мм. Из анализа представленных данных следует, что для эффективной закалки стекла расстояние от отверстий решетки до стекла должно составлять не более 30...40 мм, а диаметр отверстий должен быть не менее 4 мм. В этом случае можно отказаться от применения цилиндрических или конoidalных насадок на сопла, обычно используемых в закалочных устройствах [3, 5].

С целью проверки эффективности выработанных требований и технологических решений, которые необходимо заложить в техпроцесс изготовления экспериментальных образцов, были изготовлены закаленные стекла размером 600×160 мм, их толщина составляла 6; 5 и 4 мм. При этом в процессе закалки образец, размещенный на раме моллирования, помещался в предварительно нагретую до 400 °С печь. В течение

5...10 мин стекло нагревалось в печи до температуры 640...650 °С при различных скоростях и режимах нагрева, задаваемых с помощью регулятора ТРМ 251. Затем печь быстро открывалась, и стекло в течение 3...4 с перекачивалось в зону обдува. Давление на выходе из сопел измерялось манометром 5, поддерживалось постоянным в течение всего цикла закалки (15...30 с) и задавалось в диапазоне от 6 до 15 кПа. Диаметр отверстий в обдувочной решетке был равен 3,2 мм. В процессе обдува образец стекла мог совершать колебательные движения с частотой несколько герц и амплитудой 3...4 см, что необходимо для обеспечения равномерности закалки стекла [5]. Затем для оценки качества закалки рассматриваемые образцы подверглись стандартной процедуре разрушения. Фотографии разбитых образцов закаленного стекла представлены на рис. 9.

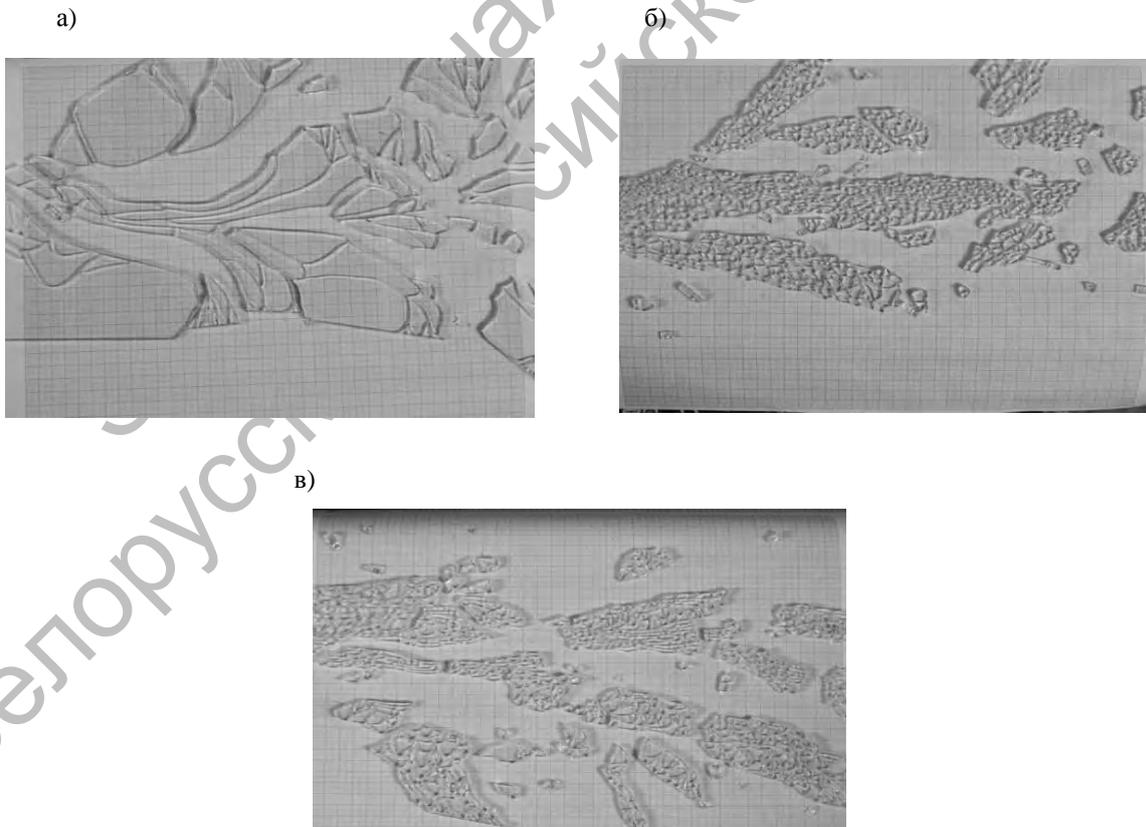


Рис. 10. Фотографии картины разбиения образцов закаленного стекла толщиной: а – 4 мм; б – 5 мм; в – 6 мм

Представленные данные для стекол толщиной 5 и 6 мм свидетельствуют о приемлемой степени и равномерности закалки изготовленных образцов, которые удовлетворяют требованиям Правил ЕЭК ООН № 43.

### Заключение

Полученные результаты, отражающие динамику нагрева стекол при варьировании температуры нагревателя, показали, что уменьшение температуры нагревателя приводит к значительному снижению перепада температуры между поверхностью и средним слоем нагреваемой пластины, однако это сопровождается увеличением продолжительности стадии нагрева стекла. Использование температур источника порядка 900 °С по сравнению с 650 °С сокращает продолжительность стадии нагрева более чем в 3 раза, однако, наряду с этим положительным фактором, наблюдается двукратное повышение максимального значения текущего – с 30 до 60 °С и десятикратное – конечного (к моменту достижения стеклом «закалочной» температуры) – с 3 до 30 °С перепада температуры по толщине нагреваемой пластины. Для обеспечения высокой производительности закалочного оборудования и равномерной закалки стекла необходимо, чтобы продолжительность

нагрева стекла до закалочной температуры была минимальна, а перепад температур по площади и толщине стекла при этом не превышал заданного значения. Сокращение продолжительности нагрева может быть достигнуто за счет повышения интенсивности теплового воздействия, однако при этом увеличивается перепад температур по толщине стекла, что может привести к неравномерности закалки или разрушению изделий.

Для эффективной закалки стекла расстояние от отверстий закалочной решетки до стекла должно составлять не более 30...40 мм, а диаметр отверстий решетки – не менее 4 мм. В таком случае можно отказаться от применения цилиндрических или коноидальных насадок на сопла, обычно используемых в закалочных устройствах. Для обеспечения равномерности закалки стекла в процессе обдува образец стекла может совершать колебательные движения около отверстий закалочной решетки с частотой несколько герц и амплитудой, равной 3...4 см.

Все перечисленные решения и требования нашли применение при организации производства закаленных стекол для наземного транспорта и сельскохозяйственной техники фирмой «КУВО» (г. Могилев, РБ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шутов, А. М.** Проблемы закалки тонкого стекла и их решение / А. М. Шутов // Стекло и керамика. – 1992. – № 4. – С. 8–9.
2. **Шабанов, А. Г.** Методика прогнозирования стекла при закалке / А. Г. Шабанов, А. И. Шутов, В. П. Марков // Стекло и керамика. – 1992. – № 5. – С. 10–11.
3. **Шутов, А. И.** Охлаждающая способность современных закалочных решеток / А. И. Шутов, И. А. Новиков, А. А. Чистяков // Стекло и керамика. – 2000. – № 2. – С. 10–11.
4. **Шутов, А. И.** Предельные уровни закалочных напряжений в листовом стекле / А. И. Шутов, Н. А. Герасимова, И. А. Новиков // Стекло и керамика. – 2002. – № 6. – С. 6–8.
5. **Шутов, А. И.** Методика расчета параметров неравномерности воздушоструйной закалки стекла / А. И. Шутов, В. Е. Суханов // Стекло и керамика. – 1998. – № 2. – С. 8–10.
6. **Kasper, A.** Spontanbruch von Einscheiben-Sicherheitsglas am Bau – ein lösbares Problem / A. Kasper // Vortrag und Artikel im Tagungsband der VDI-Tagung «Bauen mit Glas» in Baden-Baden, 1–2 März 2000, VDI-Verlag, Dusseldorf. – 2000. – P. 219–234.
7. **Hsiao, C. C.** Spontaneous fracture of tempered glass / C. C. Hsiao // Fracture. – 1977. – Vol. 3. – P. 985–992.
8. **Jacob, L.** A new model for the design of window glass plates using fracture mechanics concepts /

L. Jacob // Proceedings of the Glass Processing. Tampere, Finland. – 1999. – P. 196–199.

9. **Никоноров, Н. В.** Оптическое материаловедение: основы прочности оптического стекла / Н. В. Никоноров, С. К. Евстропьев // ИТМО. – 2009. – 104 с.

10. Стекло : справочник / Под ред. Н. М. Павлушкина. – М. : Стройиздат, 1973. – 487 с.

11. **Альтшульц, А. Д.** Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости) / А. Д. Альтшульц, Г. Г. Кисилев. – М. : Стройиздат, 1975. – 323 с.

#### LIST OF LITERATURE

1. **Shutov, A. M.** Problems of thin glass tempering, and their solution / A. M. Shutov // Glass and ceramics. – 1992. – № 4. – P. 8–9.

2. **Shabanov, A. G.** Methods of glass tempering prognosis / A. G. Shabanov, A. I. Shutov, V. P. Markov // Glass and ceramics. – 1992. – № 5. – P. 10–11.

3. **Shutov, A. I.** Cooling capacity of modern tempering grates / A. I. Shutov, I. A. Novikov, A. A. Chistyakov // Glass and ceramics. – 2000. – № 2. – P. 10–11.

4. **Shutov, A. I.** Limiting levels of hardening stresses in sheet glass / A. I. Shutov, N. A. Gerasimova, I. A. Novikov // Glass and ceramics. – 2002. – № 6. – P. 6–8.

5. **Shutov, A. I.** Methods of calculating the parameters of non-uniformity of air jet glass tempering / A. I. Shutov, V. E. Sukhanov // Glass and ceramics. – 1998. – № 2. – P. 8–10.

6. **Kasper, A.** Spontanbruch von Einscheiben-Sicherheitsglas am Bau – ein lösbares Problem / A. Kasper // Vortrag und Artikel im Tagungsband der VDI-Tagung «Bauen mit Glas» in Baden-Baden, 1–2 März 2000, VDI-Verlag, Dusseldorf. – 2000. – P. 219–234.

7. **Hsiao, C. C.** Spontaneous fracture of tempered glass / C. C. Hsiao // Fracture. – 1977. – Vol. 3. – P. 985–992.

8. **Jacob, L.** A new model for the design of window glass plates using fracture mechanics concepts / L. Jacob // Proceedings of the Glass Processing. Tampere, Finland. – 1999. – P. 196–199.

9. **Nikonorov, N. V.** Optical materials engineering : fundamentals of optical glass strength / N. V. Nikonorov, S. K. Evstropiev // ИТМО. – 2009. – 104 с.

10. Glass : handbook / Edited by N. M. Pavlushkina. – М. : Stroizdat, 1973. – 487 p.

11. **Altshults, A. D.** Hydraulics and aerodynamics (Fundamentals of fluid mechanics) / A. D. Altshults, G. G. Kisilev. – М. : Stroizdat, 1975. – 323 p.

*Статья сдана в редакцию 15 декабря 2011 года*

**Владимир Матвеевич Кульбенков**, технолог, Унитарное частное производственное предприятие «КУВО». Тел.: 8-0222-24-31-68. E-mail: kuvo@tut.by.

**Анатолий Иосифович Войтенков**, канд. физ.-мат. наук, директор, Унитарное частное производственное предприятие «КУВО». Тел.: 8-0222-24-31-68. E-mail: kuvo@tut.by.

**Александр Васильевич Хомченко**, д-р физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-36-74. E-mail: avkh@mogilev.by.

**Виталий Геннадьевич Гузовский**, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-36-74. E-mail: physics@bru.mogilev.by.

**Олег Евгеньевич Коваленко**, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-36-74. E-mail: physics@bru.mogilev.by.

**Игорь Ульянович Примак**, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-04-13. E-mail: physics@bru.mogilev.by.

**Vladimir Matveyevich Kulbenkov**, manufacturing engineer, KUVU Unitary private manufacturing enterprise. E-mail: kuvo@tut.by.

**Anatoly Iosifovich Voitenkov**, PhD, Director, KUVU Unitary private manufacturing enterprise. E-mail: kuvo@tut.by.

**Alexander Vasilyevich Khomchenko**, DSc, Associate Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-222-25-36-74. E-mail: avkh@mogilev.by.

**Vitaly Gennadyevich Guzovsky**, PhD, Associate Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-222-25-36-74. E-mail: avkh@mogilev.by.

**Oleg Evgenyevich Kovalenko**, PhD, Associate Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-222-25-36-74. E-mail: avkh@mogilev.by.

**Igor Ulyanovich Primak**, PhD, Associate Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-222-25-36-74. E-mail: avkh@mogilev.by.