

Электронный научный журнал «Век качества» ISSN 2500-1841 <https://www.agequal.ru>

2026, №2 https://www.agequal.ru/pdf/2026/AGE_QUALITY_2_2026.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:

Хорошева Е.Р., Макаров Р.И. Анализ влияния режима моллирования на форму стекол, входящих в пакет триплекса // Электронный научный журнал «Век качества». 2026. №2. С. 284-294. Режим доступа: <https://www.agequal.ru/pdf/2026/226018.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 666.1.054.3:519.248

**Анализ влияния режима моллирования на форму стекол,
входящих в пакет триплекса**

Хорошева Елена Руслановна,
доктор технических наук, профессор кафедры
информационные системы и программной инженерии,
Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87
khorosheva@vlsu.ru

Макаров Руслан Ильич,
доктор технических наук, профессор кафедры
информационные системы и программной инженерии,
Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87
makarov.ruslan@gmail.com

В статье исследовано влияние теплового поля камер печи моллирования на величину поперечной кривизны гнутых изделий, входящих в пакет триплекса. Разработаны нейросетевые модели, описывающие зависимость провиса гнутых стекол от параметров теплового поля. Определена чувствительность моделей к параметрам теплового поля.

Ключевые слова: моллирование, провис, ветровое стекло, триплекс, теплое поле, линии уровня, нейросетевая модель, чувствительность.

Введение

В современных условиях информационные технологии широко используются при создании цифровых двойников технологических объектов.

Цифровые двойники позволяют более глубоко изучать объекты и выбирать оптимальные режимы работы технологического оборудования [1].

Постановка задачи

Объектом исследования является технологический процесс моллирования в производстве ветровых автомобильных стекол из триплекса. В процессе производства контролируют форму стекол, входящих в пакет триплекса. Измеряют поперечную кривизну моллированных стекол (провис) в трех точках y_1 , y_2 , y_3 по ширине стекла [2, 3]. Провис не должен превышать величины, указанной в чертежах.

Качество моллирования определяется не «максимальной температурой», а тем, как печь проходит весь цикл: скорость нагрева, выдержки на ключевых участках, равномерность по камере и корректное охлаждение с отжигом [4]. В проведенных исследованиях с помощью компьютерного моделирования было установлено, что причиной избыточных остаточных напряжений и последующего саморазрушения стекла является отклонение геометрии стекол, входящих в пакет триплекса. Проведенный вычислительный эксперимент с данными производства позволил установить зависимость величины провиса от температурного режима моллирования [5].

Метод решения

Моллирование стекол для триплекса проводится в туннельной трехкамерной печи. Режим нагрева контролируется термopарами, установленными в своде и поде по длине камер. Каждой точке области пространства камеры соответствует определённая температура, измеряемая термopарами [6]. Поэтому можно говорить о том, что в этой области задано скалярное тепловое поле. С математической точки зрения скалярные поля описываются «обычными» функциями одной и большего числа переменных. При этом в теории поля широко используются атрибуты этих функций, такие

как область определения, линии и поверхности уровня. В работе для описания теплового поля использовались параметры линий уровня, представленные функциями одной переменной.

Исследовалось влияние теплового поля камер печи моллирования на величину поперечной кривизны гнутых изделий. Анализу подвергались моллированные стекла из выборки 42 смены. Режим моллирования контролировался по изменению параметров линий уровня теплового поля в камерах печи моллирования.

Изменения линий уровня теплового поля в камере предварительного нагрева по своду и линия тренда отражены на рис. 1. Нагрев стекла протекает быстро по степенной зависимости, приведенной на рисунке. Градиент температуры в начале нагрева составляет 129°C . В конце камеры градиент температуры уменьшается до $39,4^{\circ}\text{C}$.

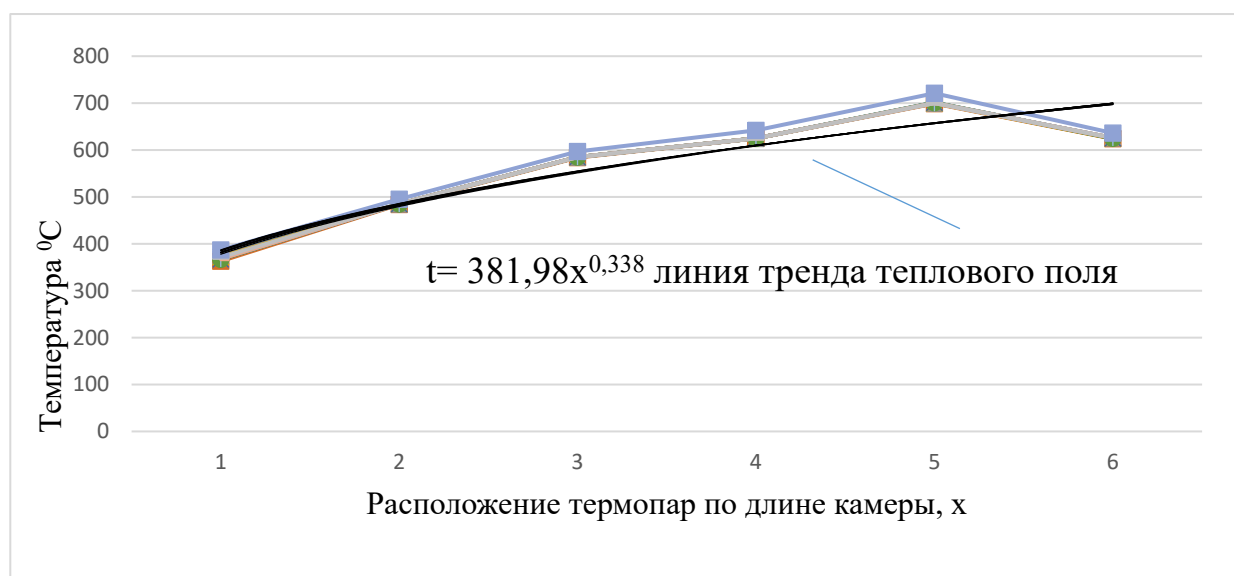


Рис. 1. Изменение линий уровня теплового поля в своде камеры предварительного нагрева

Нагрев листа по показаниям донных термопар протекает менее интенсивно, начальный градиент роста температуры составляет $94,4^{\circ}\text{C}$ с

вариацией 4,3%. Характер изменения температуры соответствует выводу изделия и оснастки в стабильное состояние без резких изменений градиента [4].

Изменения линий уровня теплового поля в своде главной камеры нагрева и линия тренда отражены на рис. 2. В своде главной камеры выдерживается температура 664°C с небольшой вариацией 0,9%. Градиент температуры невысокий, составляет $0,924^{\circ}\text{C}$. В поде температура несколько ниже, составляет 641°C с вариацией 1,1%. В главной камере стекло доводится до вязкости, при которой оно ложится на форму и повторяет её геометрию. Стекло завершает посадку, и её геометрия стабилизируется без перегрева [4].

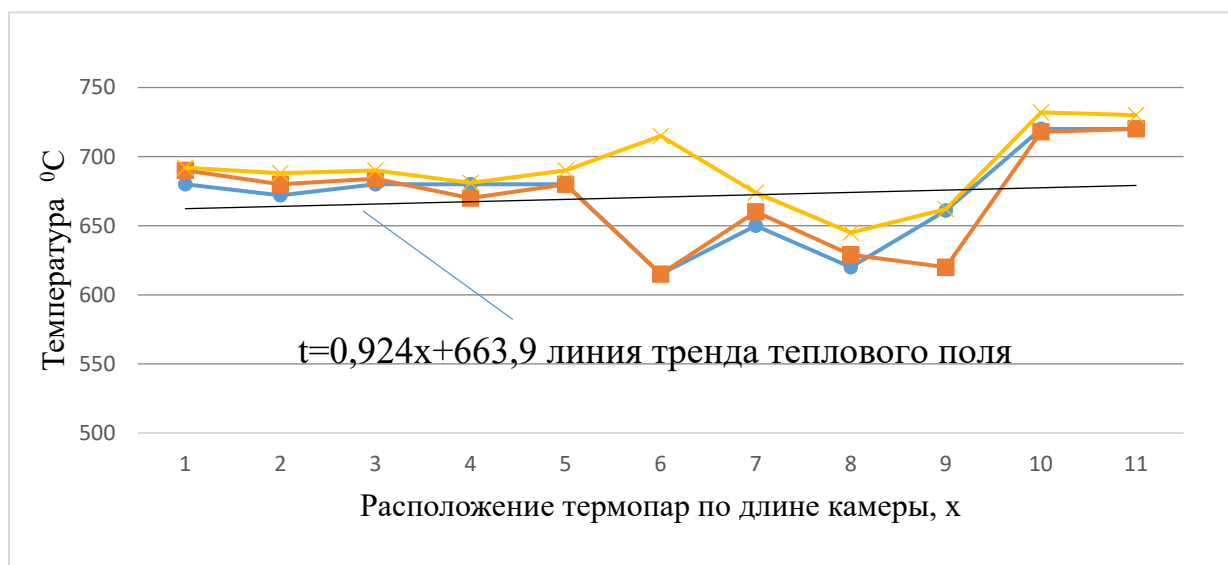


Рис. 2. Линии теплового поля в главной камере печи моллирования

Изменения линий уровня теплового поля в камере отжига и линия тренда отражены на рис. 3. В камере температура уменьшается с $613,6^{\circ}\text{C}$ до температуры окружающей среды с градиентом $-142,9^{\circ}\text{C}$, коэффициентом вариации 2,8%.

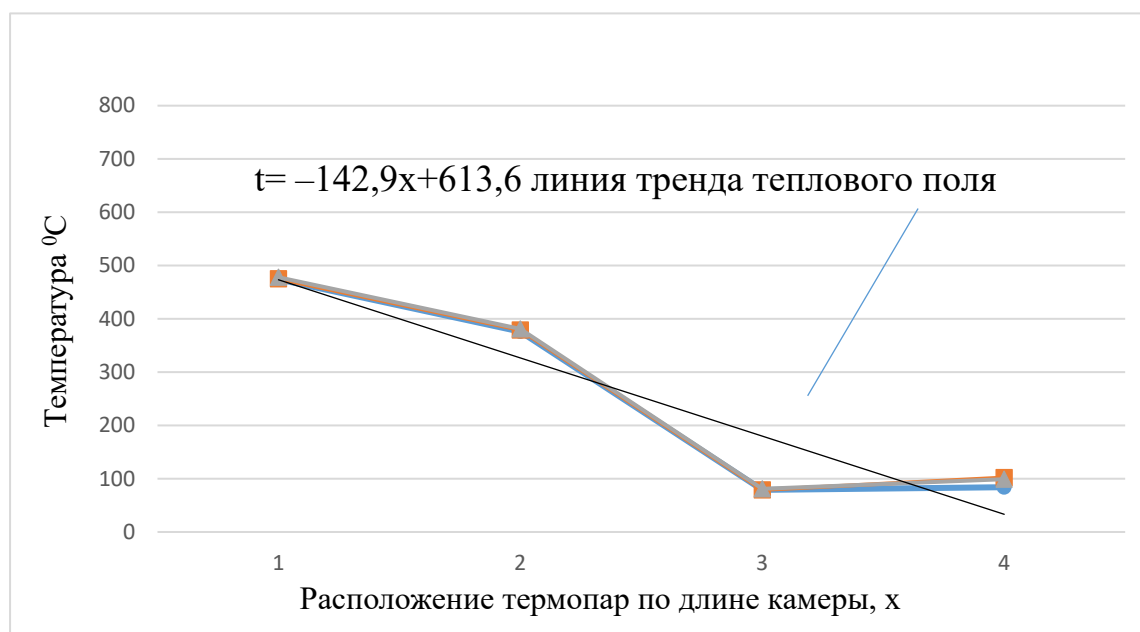


Рис. 3. Линии теплового поля в камере отжига

Для выявления зависимости величины провиса от режима моллирования строились математические модели в программе Statistica Neural Networks с использованием автоматического конструктора. Были выбраны модели на нейронных сетях типа многослойный персептрон MLP, которые могут моделировать функцию любой сложности. Количество входных и выходных переменных определялось условиями задачи. Входными переменными выбраны параметры теплового поля в камерах печи моллирования (таблица 1).

Для описания провиса y_1 в первой точке измерения построена модель MLP 4_3 с количеством нейронов на входе 4, в промежуточном слое 3:

$$y_1 = f(x_5, x_6, x_9, x_{10}), \quad (1)$$

где x_5, x_6 – параметры линии поля в своде главной камеры, соответственно градиент и начальная температура;

x_9, x_{10} – параметры линии поля в камере отжига, соответственно градиент и начальная температура.

Таблица 1

Кодирование параметров линий теплового поля

Камера	Предварительного нагрева		Главная		Отжига	
Описание линий поля	$t = ax^b$		$t = ax+b$		$t = ax+b$	
Параметры линий поля	a	b	a	b	a	b
Кодовое обозначение параметров свода	x1	x2	x5	x6	x9	x10
Кодовое обозначение параметров пода	x3	x4	x7	x8	–	–

Точность модели, оцениваемая величиной средней относительной погрешности, составила 10,8%. Для определения влияния параметров линий теплового поля камер печи моллирования на величину провиса y_1 вычислялись коэффициенты чувствительности [7]. Результаты вычислений приведены в таблице 2. Чувствительность неприлегания y_1 к изменению параметров X5, X9 слабая, к параметру x10 – средняя, а к параметру x6 – сильная.

Таблица 2

Анализ чувствительности модели MLP 4_3

Параметры линии поля	x5	x6	x9	x10
Чувствительность модели	0,098	6,74	–0,246	–1,273

На величину провиса y_1 наибольшее влияние оказывает тепловое поле в своде главной камеры – начальная температура x6. С увеличением температуры возрастает величина провиса в первой точке контроля. Влияние градиентов тепловых полей в главной камере x5 и отжига x9 значительно слабее. Влияние параметров теплового поля камеры предварительного нагрева оказалось незначимым.

Провис 2 адекватно описывается моделью MLP 2_1 с количеством нейронов на входе 2, в промежуточном слое 1:

$$y_2 = f(x_1, x_9), \quad (2)$$

где x_1 – параметр линии поля в своде камеры предварительного нагрева, соответствует начальной температуре нагрева;

x_9 – параметр линии поля в камере отжига, соответствует градиенту температур.

Точность модели, оцениваемая величиной средней относительной погрешности, составляет 9,09%. Чувствительность модели к изменению параметров теплового поля приведена в таблице 3.

Таблица 3

Анализ чувствительности модели MLP 2_1

Параметры линии поля	x_1	x_9
Чувствительность модели	1,613	-0,894

Чувствительность неприлегания y_2 к изменению параметра x_1 сильная, а к параметру x_9 – средняя.

На величину провиса y_2 существенное влияние оказывает тепловое поле камеры предварительного нагрева, x_1 – начальная температура. С ростом температуры увеличивается провис. Влияние градиента температуры x_9 теплового поля печи отжига по характеру отрицательное, по интенсивности среднее. Влияние теплового поля главной камеры оказалось незначимым ввиду стабильности температуры, вариация которой не превышала 0,9%.

Величина провиса в третьей точке измерения y_3 адекватно описывается моделью MLP 4_6 с количеством нейронов на входе 4, в промежуточном слое – 6:

$$y_3 = f(x_1, x_2, x_4, x_5), \quad (3)$$

где x_1 , x_2 – параметры линии теплового поля в своде камеры предварительного нагрева, соответствуют начальной температуре нагрева и показателю степени полинома;

x_4 – степень полинома линии поля в поде камеры предварительного нагрева;

x_5 – параметр линии поля в своде главной камеры, соответствует градиенту температур.

Точность модели, оцениваемая величиной средней относительной погрешности, составляет 8,47%. Чувствительность модели к изменению параметров теплового поля приведена в таблице 4. Чувствительность неприлегания $у_3$ к изменению параметров линий поля x_4 и x_5 слабая, а к параметрам x_1 и x_2 – средняя.

Таблица 4

Анализ чувствительности модели MLP 4_6

Параметры линии поля	x_1	x_2	x_4	x_5
Чувствительность модели	-0,933	0,508	0,222	0,0488

Чувствительность неприлегания $у_3$ к изменению параметров линий поля x_4 и x_5 слабая, а к параметрам x_1 и x_2 средняя.

На величину провиса $у_3$ наибольшее влияние оказывает тепловое поле камеры предварительного нагрева: x_1 , x_2 , x_4 – начальная температура и показатели степени полиномов линий поля в своде и поде. Увеличение параметров линий теплового поля x_2 и x_4 приводит к росту провиса, увеличение начальной температуры в своде камеры предварительного нагрева x_1 – к уменьшению провиса. Влияние градиента температуры теплового поля главной камеры x_5 на провис слабое. Влияние параметров линий теплового поля камеры отжига на провис оказалось незначимым.

Заключение

Описан режим моллирования стекол для триплекса в туннельной печи скалярным тепловым полем. В камере предварительного нагрева линии уровня описываются степенной зависимостью, в главной камере и камере отжига – линейными зависимостями.

Разработаны модели на нейронных сетях, описывающие зависимость формы гнутых стекол величиной провиса в трех точках измерения от параметров теплового поля. Исследовано влияние параметров теплового поля на форму моллированных стекол.

Выявленные зависимости могут использоваться для коррекции температурного режима моллирования стекол, входящих в пакет триплекса.

Список литературы

1. Хорошева, Е.Р., Макаров, Р.И. Повышение качества ветровых автомобильных стекол в процессе производства / Е.Р. Хорошева, Р.И. Макаров // Электронный научный журнал «Век качества». – 2026. – № 1. – С. 227–234. – Режим доступа: <https://www.agequal.ru/pdf/2026/126012.pdf> (дата обращения 01.06.2026).
2. Межгосударственный стандарт ГОСТ 32565-2013. Стекло безопасное для наземного транспорта. Общие технические условия. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2016. – 54 с.
3. Khorosheva, E.R., Makarov, R.I. Multilayer glass quality improvement during production // Glass and Ceramics. – 2022. – Т. 78, № 9-10. – P. 350-352.
4. Температурные режимы моллирования стекла: как выстроить кривую нагрева и охлаждения без дефектов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://r-osstip.ru/news/11152-temperaturnye-rezhimy-mollirovaniya-stekla-kak-vystroit-krivuyu-nagreva-i-okhlazhdeniya-bez-defektov> (дата обращения 01.06.2026).

5. Логинов, Н.Ю., Кучеров, А.О. Анализ формирования остаточных напряжений в стекле типа триплекс при его изготовлении / Н.Ю. Логинов, А.О. Кучеров // Проблемы современной науки и образования. – 2014. – № 7 (25). – С. 31-33.
6. Хорошева, Е.Р., Макаров, Р.И. Оценка качества технологического процесса моллирования в производстве автомобильного стекла / Е.Р. Хорошева, Р.И. Макаров // Электронный научный журнал «Век качества». – 2023. – № 1. – С. 135-145. – Режим доступа: <http://www.agequal.ru/pdf/2023/123008.pdf> (дата обращения 01.06.2026).
7. Глаголев, М.В. Анализ чувствительности модели / М.В. Глаголев // ДОСиГИК. – 2012. – Т. 3, № 3. – С. 31-53.

Analysis of the Influence of the Mollification Mode on the Shape of the Glasses Included in the Triplex Package

Khorosheva Elena Ruslanovna,
Doctor of Technical Sciences,
Professor, Departments of Information Systems and Software Engineering,
Vladimir State University Alexander Grigoryevich
and Nikolai Grigoryevich Stoletov,
Russia, 600000, Vladimir, 87 Gorky St.
khorosheva@vlsu.ru

Makarov RuslanIlyich,
Doctor of Technical Sciences,
Professor, Departments of Information Systems and Software Engineering,
Vladimir State University Alexander Grigoryevich
and Nikolai Grigoryevich Stoletov,
Russia, 600000, Vladimir, 87 Gorky St.
makarov.ruslan@gmail.com

The article examines the influence of the thermal field of the chambers of the mollification furnace on the value of the transverse curvature of the bent products entering the triplex package. Developed neural network models describing the dependence of the sagging of bent glasses on the parameters of the thermal field. The sensitivity of the models to the parameters of the thermal field is determined.

Keywords: mollification; sag; wind glass; triplex; heat field; level lines; neural network model; sensitivity.