



Research Article

Received: February 27, 2024

Accepted: March 12, 2024

Published: March 19, 2024

ISSN 2304-6295

## Three-layer fiberglass shell under thermomechanical action

Antipin, Alexey Stanislavovich<sup>1</sup> Mishnev, Maxim Vladimirovich<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation; [threegod47@gmail.com](mailto:threegod47@gmail.com) (A.A.S.); [mmv2004@list.ru](mailto:mmv2004@list.ru) (M.M.V.)

Correspondence:\* email [threegod47@gmail.com](mailto:threegod47@gmail.com); contact phone +79615795000

### Keywords:

Polymer composites; Thermal expansion; Fiberglass; Modulus of elasticity; Glass transition; Temperature; Polymer; Temperature load; Thermomechanical calculation

### Abstract:

**The object of research** is a section of a fiberglass pipe of a metallurgical enterprise's flue on sliding supports, working according to a split scheme. The **material** of the flue is fiberglass with mineral wool filler. The **purpose** of this work is to analyze the deflections of a three-layer cylindrical shell made of polymer composites under complex thermomechanical action and compare the results of full-scale and numerical experiments. The calculation considers the load from the own weight of the structure and the additional load. The range of gas operating temperatures from 22 to 130 °C is considered. **Method.** Numerical calculation is performed in the ANSYS Workbench software package ([ansys.com](https://www.ansys.com)). For finite element analysis of the shell under thermomechanical action, a bundle of Static Thermal and Static Structural modules is used. **Results.** The deflections of the shell are evaluated; the results of full-scale tests and the simulation of the experiment are compared.

## 1 Introduction

Объем использования конструкций из полимерных композиционных материалов в строительстве промышленных объектов с каждым годом растет. Перспективным направлением использования являются крупногабаритные коррозионностойкие конструкции [1], [2]. Оценка рациональной области применения полимерных композитов в газоходах промышленных и вентиляционных труб представлена в работах [3]. Особенности инженерных расчетов подобных конструкций описаны в [4], [5]

Применение стеклопластиковых оболочек, в частности в газоходах металлургических предприятий [6], обуславливается высокой коррозионной стойкостью, по сравнению с конструкциями из традиционных материалов. При этом многие промышленные предприятия заинтересованы в применении композитных газоходов при температурах не менее 180-200°C [7].

В работах [8]–[10] описано влияние длительного воздействия повышенных температур на модуль упругости и температуру стеклования ряда терморезистивных связующих, а также на термомеханические свойства эпоксидных стеклопластиков, выполненных на основе этих связующих. Показано, что происходит увеличение модуля упругости полимеров при длительной выдержке образцов при повышенных температурах, а также увеличение температуры их стеклования. Также процесс старения эпоксидного связующего и изменение его физико-механических свойств исследованы в работе [11], в частности наблюдалось повышение модуля упругости в результате термического старения.

Предположение о возможности длительной эксплуатации газоходов из эпоксидных стеклопластиков (на основе смолы ЭД-20 или ее аналогов) при температурах до 200°C сделано в работах [9], [12], [13], несмотря на то, что эта температура выше температуры стеклования рассмотренных эпоксидных связующих. В данных исследованиях указывается что потеря массы

Antipin, A.; Mishnev, M.

Three-layer fiberglass shell under thermomechanical action;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 111 Article No 11105. doi: 10.4123/CUBS.111.5



образцов при температурах до 200 °С носит затухающий характер и в конце концов останавливается, при этом стеклопластик сохраняет определенную жесткость.

В работе [17] показано, что после длительной выдержки (термического старения) при температурах выше начальной температуры стеклования модуль упругости возрастал на 60–90%, а при более низких не изменялся или же уменьшался незначительно, при этом прочность при изгибе незначительно снижалась. Обеспечение требуемой прочности и жесткости конструкции планируется обеспечить при помощи сэндвичевой структуры стенки оболочки, которая включает стеклопластиковые обшивки и средний слой заполнителя из теплоизоляционного материала. Помимо этого, повышение модуля упругости при термическом старении может в какой-то степени компенсировать потерю жесткости конструкции из-за снижения модуля упругости стеклопластика, подвергающегося воздействию повышенной температуры.

Анализ коррозионной стойкости полимерных составов для производства газопроводов приведен в [14]. В работе [15] описано влияние армирующего волокна геополимера на характеристику ползучести. Влияние добавок древесной золы в композиты на термические напряжения в конструкциях трубопроводов представлено в [16]. В статьях [17], [18] показана возможность использования пластиковых отходов в производстве композитных газопроводов и трубопроводов.

В статьях [19], [20] описывается способ производства трехслойных оболочек из полимерных композитных материалов методом намотки с подрачиванием.

Исходя из анализа существующих исследований можно предположить, что есть возможность эксплуатировать газопроводы на больших пролетах даже при повышенных температурах. Но для этого необходимо уточнить ряд характеристик сырьевых материалов, а также провести анализ работы конструкции в целом.

Целью настоящей работы является исследование прогибов трехслойной цилиндрической оболочки на реальной модели, и последующее сравнение полученных результатов с численным экспериментом.

Рассматривается двухопорная разрезная схема работы оболочки. Она отличается от наиболее популярной в практике: опирании оболочек на часто расположенные ложементы, при которой оболочка работает только в кольцевом направлении. В таком случае определяющими являются нагрузки, возникающие на этапе транспортировки и монтажа конструкции, при этом постоянные и временные эксплуатационные нагрузки воспринимаются стальной или железобетонной эстакадой. Примером реализации данной классической схемы могут служить конструкции газопроводов, описанные в [21], в таких случаях не в полной мере используется собственная несущая способность и жесткость стеклопластиковых оболочек.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать программу проведения экспериментального определения деформированного состояния модели оболочки на термомеханическое воздействие;
- выполнить экспериментальные исследования деформированного состояния модели оболочки на термомеханическое воздействие;
- выполнить конечноэлементное моделирование эксперимента;
- провести сравнительный анализ полученных данных;

Численное моделирование и анализ конструкции оболочки производится в конечно-элементном программном комплексе ANSYS Workbench ([ansys.com](https://www.ansys.com)) [22], [23]. Для термомеханического расчета с учетом геометрической нелинейности применялись модули Steady-State Thermal [24–27] и Static Structural [28].

## 2 Materials and Methods

### 2.1 Full-scale testing

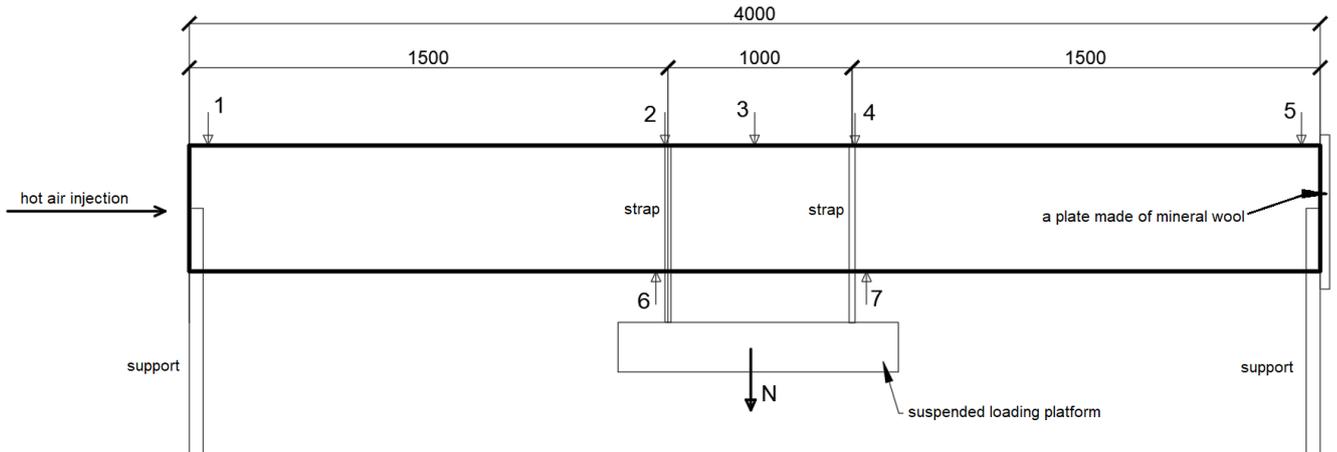
Установка представляет собой: две металлические опоры, которые закрепляются в полу для обеспечения неподвижности в процессе эксперимента; набор стоек-держателей для датчиков перемещений часового типа; набор термодатчиков для контроля температуры внутренней поверхности – вставляются в просверленные отверстия в оболочке с верхней ее стороны; термопушка с гофрой для подачи нагретого воздуха и разогрева внутренней поверхности трубы; подвесного ящика для нагружения конструкции. Датчики устанавливаются в характерных точках трубы: на верхней части опор, в центре пролета сверху, в центре пролета сбоку, в местах приложения нагрузки сверху и снизу. Ящик для нагружения закрепляется стропами с шагом 1 м в центре

Antipin, A.; Mishnev, M.

Three-layer fiberglass shell under thermomechanical action;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 111 Article No 11105. doi: 10.4123/CUBS.111.5

конструкции. Нагружение осуществляется шагами  $\approx 40$  кг. Показания датчиков снимаются в установившемся положении после каждого шага нагружения. Процедура нагружения-разгрузки проводится для случая работы конструкции под температурой и без нее. Схема установки и ее реальный внешний вид показаны на Рисунке 1 и Рисунке 2 соответственно.



**Рис. 1 – Схема эксперимента с расположением датчиков на образце (1 – датчик перемещений 1.1в.оп и термопара терм.1, 2 – датчик перемещений 2.1в.пр, 3 – датчик перемещений 3.1в.пр и термопара терм.2, 4 – датчик перемещений 2.2в.пр, 5 – датчик перемещений 1.2в.оп и термопара терм.3, 6 – датчик перемещений 4.1н.пр, 7 – датчик перемещений 4.2н.пр)**  
**Fig. 1 – The scheme of the experiment with the location of sensors on the sample (1 – displacement sensor 1.1 v.op and thermocouple term.1, 2 – displacement sensor 2.1v.pr, 3 – displacement sensor 3.1v.pr and thermocouple term.2, 4 – displacement sensor 2.2v.pr, 5 – displacement sensor 1.2v.op and thermocouple term.3, 6 – displacement sensor 4.1n.pr., 7 – displacement sensor 4.2n.pr.)**



**Рис. 2 – Общий вид испытательной установки с образцом**  
**Fig. 2 – General view of the test facility with a sample**

Экспериментальный образец представляет из себя трехслойную оболочку. Внутренняя и наружная обшивки выполнены из стеклопластика на основе эпоксидного связующего горячего отверждения [14]; в качестве армирования выступает ткань конструкционная Т-23 по Российскому государственному стандарту ГОСТ 19907–83 «Ткани электроизоляционные из стеклянных крученых комплексных нитей» [29]. Средний слой выполнен из минераловатных плит

Antipin, A.; Mishnev, M.

Three-layer fiberglass shell under thermomechanical action;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 111 Article No 11105. doi: 10.4123/CUBS.111.5

ТЕХНОНИКОЛЬ Техновент Стандарт (производитель: завод «ТЕХНОНИКОЛЬ Воскресенск», г. Воскресенск, Россия) с фактической плотностью 80 кг/м<sup>3</sup>.

Размеры оболочки:

- пролет 4 м
- диаметр наружный 380 мм
- толщины обшивок 2 мм
- толщина утеплителя 30 мм

Испытание разделено на две части. На первом этапе ненагретая оболочка нагружается за 6 шагов, на каждом шаге фиксируются показания датчиков. Далее следует разгрузка оболочки теми же шагами в обратном порядке, показания датчиков перемещений снимаются так же на каждом шаге. На втором этапе образец загружается единожды, после чего производится постепенный нагрев внутренней поверхности оболочки, отслеживаются показания термодатчиков; при повышении температуры по показаниям термодатчиков на определенных отметках температур снимаются показания датчиков перемещений.

Описанная ранее испытательная установка позволяет прогревать внутреннюю поверхность образца до 130°C. При дальнейшем нагнетании горячего воздуха тепло начинает распространяться на внешний слой, без повышения температуры внутренней обшивки. По достижении температуры в 130°C на внутренней обшивке, образец нагружается в два шага: сначала до 426.39 кг суммарной нагрузки, далее до 515.09 кг. Показания датчиков снимаются на каждом шаге догружения. Внешняя нагрузка на каждом этапе, а также показания термодатчиков показаны в Таблице 1 (испытание без термического воздействия) и Таблице 2 (испытание с нагревом внутренней поверхности оболочки).

**Таблица 1. Этапы нагружения образца без температуры**  
**Table 1. Stages of sample loading without temperature**

	Loading stage						
	0	1	2	3	4	5	6
Load N, kg	0	85	174.4	260.44	345.39	426.39	515.09

**Таблица 2. Этапы нагружения образца при термомеханическом воздействии**  
**Table 2. The stages of loading the sample under thermomechanical action**

	Loading stage								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Load N, kg	0	345.39	345.39	345.39	345.39	345.39	345.39	426.39	515.09
Thermocouple readings, °C	22	22	60	90	115	120	125	130	130

## 2.2 Numerical simulation of the test

Расчет производился в конечно-элементном комплексе ANSYS Workbench.

Рассматривается трехслойная стеклопластиковая оболочка с размерами, указанными в п.п.2.1

В расчете средний слой легкого заполнителя (минераловатная плита) учитывается в работе конструкции оболочки.

Для упрощения расчетной схемы и ускорения расчета модель обрезана плоскостями симметрии, на обрезы наложены соответствующие граничные условия.

Общий вид расчетной модели после расщепления по осям симметрии с разбиением на конечные элементы (КЭ) приведены на Рисунке 3.

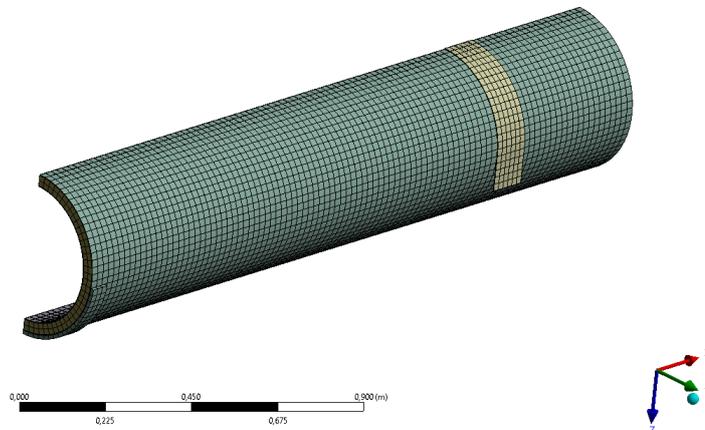
Схема проекта приведена на Рисунке 4. Основные этапы КЭ-ого расчета:

- создание геометрии конструкции;
- задание параметров материалов;
- задание граничных условий модели, разбиение ее на КЭ;

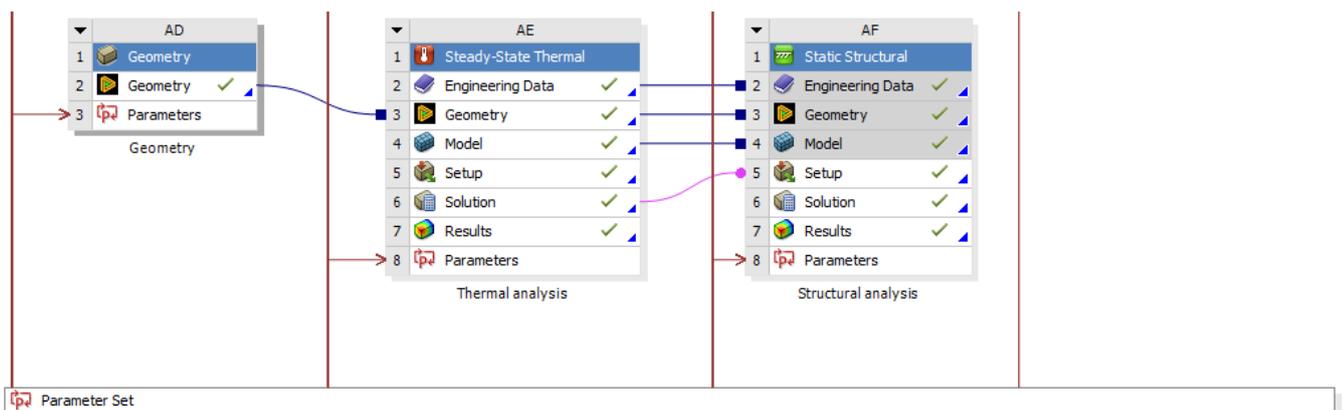
- задание параметров для термомеханического расчета и непосредственно сам расчет;
- передача результатов термомеханического расчета в модуль статического анализа и дополнение модели механическими нагрузками (собственным весом и весом пригрузки), выполнение статического расчета;

**Создание параметрической модели** производится в модуле ANSYS DesignModeler.

**Задание материалов** производится в модуле термического анализа в разделе Engineering Data.



**Рис. 3 – Расчетная модель ANSYS Steady-State Thermal / Static Structural**  
**Fig. 3 – ANSYS Steady-State Thermal / Static Structural Calculation Model**

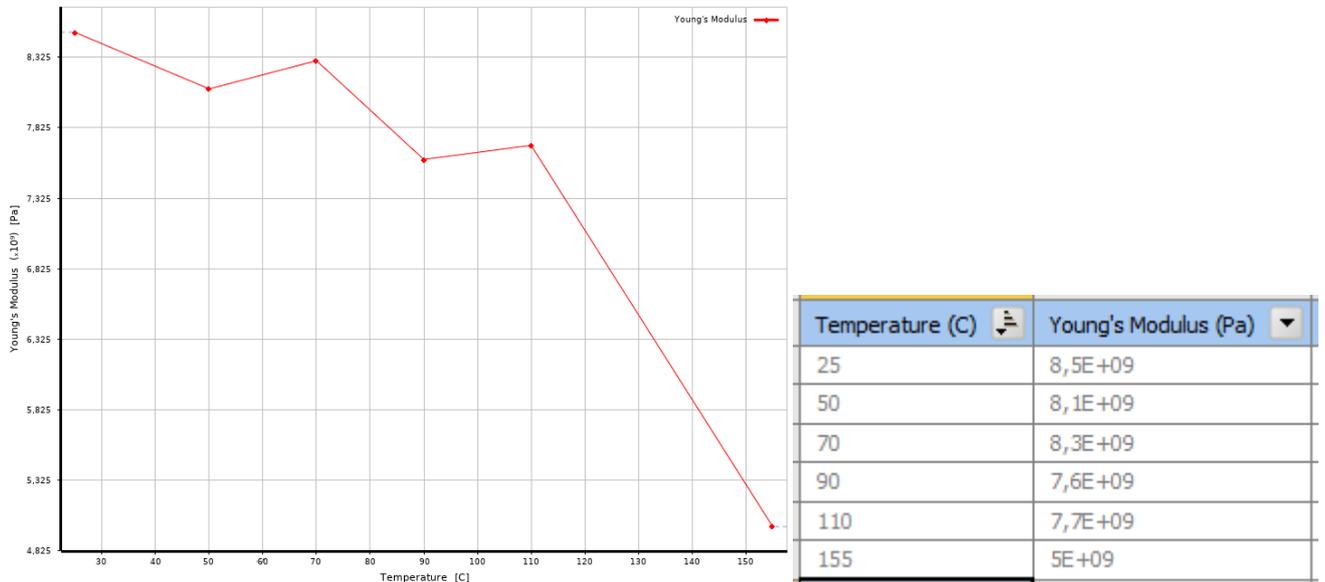


**Рис. 4 – Схема проекта ANSYS Workbench**  
**Fig. 4 – The scheme of the ANSYS Workbench project**

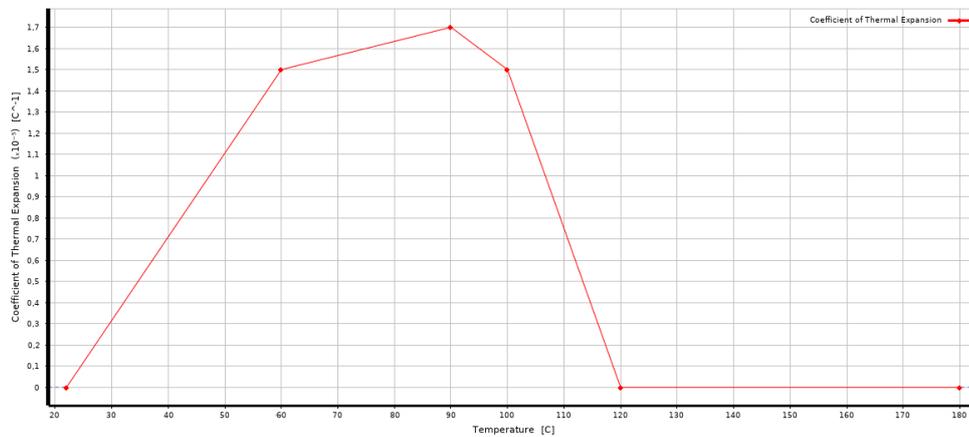
Параметры для основного несущего материала - стеклопластика принимаются по результатам лабораторных испытаний (после проведенного эксперимента из образца трубы были вырезаны участки для получения истинного модуля упругости материала, используемого в предоставленном изделии). В первом приближении материал как среднего слоя, так и внешних стеклопластиковых слоев рассматривается как изотропный, коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) для обшивок принимается по экспериментальным данным из работы [30]. Характеристики используемых материалов приведены на Рисунках 6–8.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	1980	kg m <sup>-3</sup>		
4	Isotropic Elasticity	Tabular			
14	Isotropic Thermal Conductivity	0,25	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>		

**Рис. 5 - Общие параметры материала – стеклопластика**  
**Fig. 5 - General parameters of the material – fiberglass**



**Рис. 6 - Параметры материала обшивок по результатам испытаний вырезанных образцов**  
**Fig. 6 - Parameters of the cladding material according to the test results of the cut samples**



**Рис. 7 - Изменение КЛТР стеклопластика в зависимости от температуры**  
**Fig. 7 - The change in the temperature of fiberglass depending on the temperature**

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	<input checked="" type="checkbox"/> Material Field Variables	Table			
3	<input checked="" type="checkbox"/> Density	80	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/> Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>	
5	<input checked="" type="checkbox"/> Coefficient of Thermal Expansion	7E-06	C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	<input type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
7	Derive from	Youn...			
8	Young's Modulus	5E+05	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0,25			<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	3,3333E+05	Pa		<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	2E+05	Pa		<input type="checkbox"/>
12	<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Thermal Conductivity	0,048	W m <sup>-1</sup> ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Рис. 8 - Параметры материала среднего слоя – минеральной ваты**  
**Fig. 8 - Material parameters of the middle layer – mineral wool**

Для материала опор-ложементов используется материал – сталь с параметрами, заданными в программе по умолчанию (Structural Steel).

Модель состоит из объемных КЭ. Для всех элементов модели **используется КЭ «SOLID186»**. Взаимосвязь объемов друг с другом задается через **контакты их поверхностей**. Для описания зоны контакта **используется КЭ «CONTA 174»**.

Для всех контактных поверхностей, кроме контактов оболочки с опорами, задается полная склейка. Коэффициент трения между оболочкой и опорами принимается равным 0.3; между оболочкой и стропами подвеса 0.6.

Разбиение модели на сетку КЭ производится встроенным модулем ANSYS Mesh с добавлением дополнительного метода – «MultiZone» и функции «Face Meshing» для улучшения качества сетки. Размер КЭ принят 0.025 м.

**Термический расчет** производится в модуле ANSYS Steady-State Thermal. Целью расчета в нем в рамках данного исследования является получение градиента распределения температур по толщине оболочки для дальнейшей его передачи в модуль Static Structural, для учета температурного расширения материалов и изменения учета изменения модуля упругости обшивки с изменением температуры.

В качестве **граничных условий для термического расчета** принимаются: температура внутренней поверхности газохода как основное воздействие и тепловой поток по внешней поверхности и излучение тепла (лучистый теплообмен) через нее в качестве внешних факторов. Конкретные граничные условия и параметры расчета приведены на Рисунке 9.

**Статический расчет** производится в модуле ANSYS Static Structural.

Задача разбивается на три шага: на первом прикладывается статическая нагрузка, на втором – градиент температур, на третьем при установившемся градиенте увеличивается нагрузка. В общих настройках расчета добавлены функции «Weak Springs» (слабые пружины) и «Large Deflection» для избежания ошибок (связанные в первую очередь с наличием контактных поверхностей) при расчете.

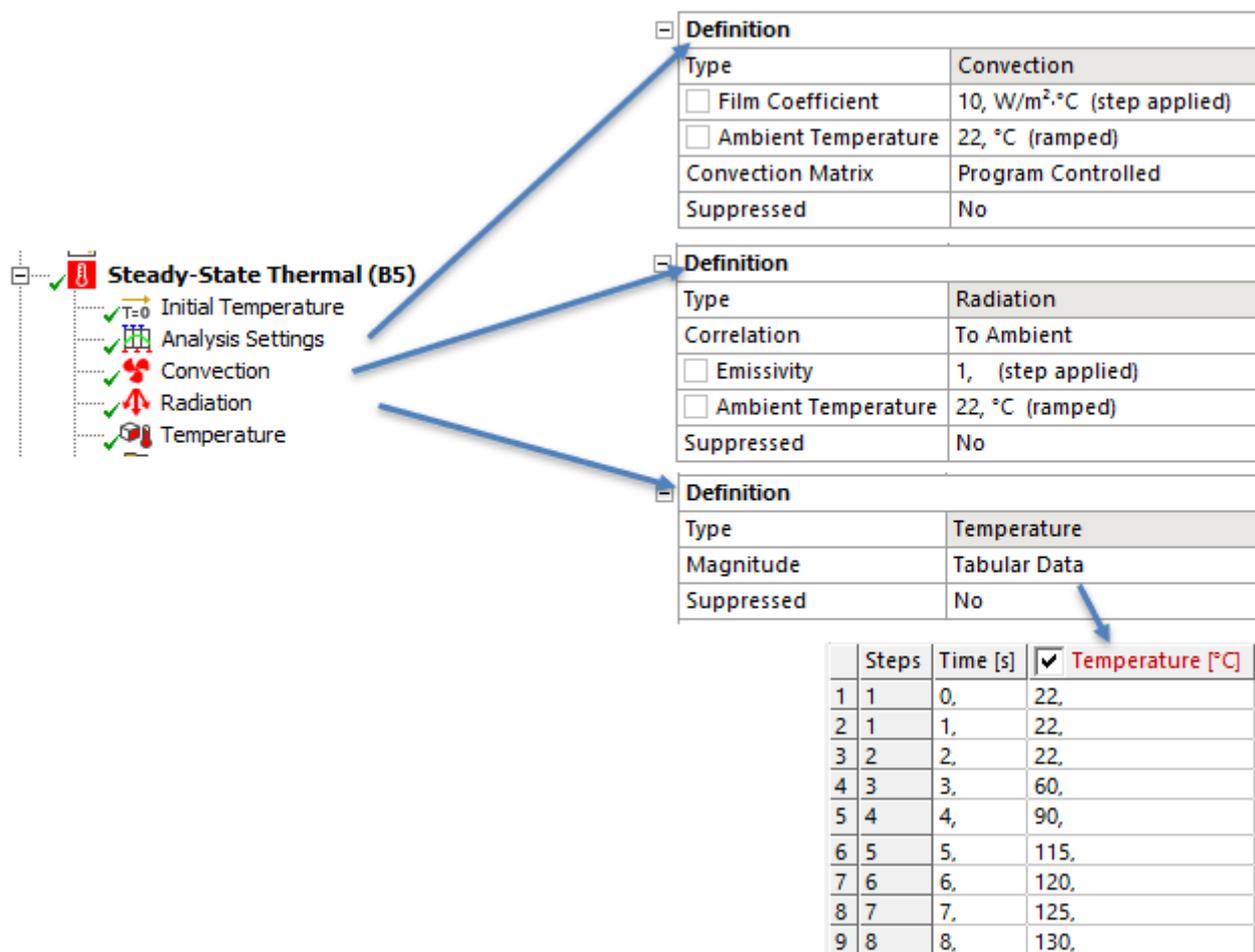
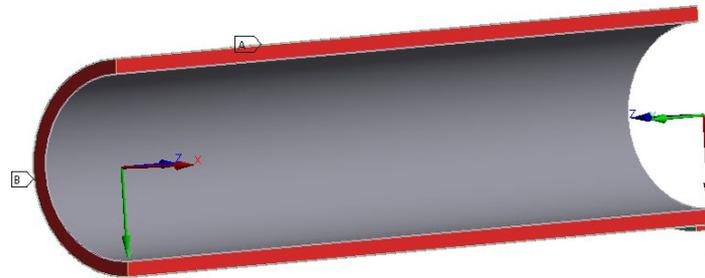


Рис. 9 – Граничные условия термического расчета

**Fig. 9 – Boundary conditions of thermal calculation**

**В качестве нагрузок** рассматриваются собственный вес и внешний пригруз. Первая формируется путем добавления в модель гравитации (нагрузка рассчитывается исходя из ускорения свободного падения и плотности материалов), вторая – прикладывается к плоскости среза стропы. **Граничные условия в статическом расчете** – полные закрепления опор от смещений и поворотов по их внешней поверхности. На Рисунке 10 показаны зоны модели, на которые наложены условия симметрии.



**Рис. 10 – Граничные условия симметрии модели**  
**Fig. 10 – Boundary conditions of the symmetry of the model**

Температурные воздействия, импортируются из термического расчета в формате градиента распределения температур.

**В качестве выходных параметров** рассматриваются перемещения вдоль оси Z (по вертикали) точек модели, соответствующих датчикам на реальной конструкции.

### 3 Results and Discussion

Основные результаты испытаний приведены в Таблице 3 (для испытания без температурного воздействия) и Таблице 4 (для испытания с нагревом внутреннего слоя оболочки). Для сравнения прогибов образца в реальной и КЭ-ой постановке испытания использовались показания датчика 3.1v.pr и соответствующая точка КЭ-ой модели.

**Таблица 3. Результаты испытания образца без температурного воздействия**  
**Table 3. Test results of the sample without temperature exposure**

Sensor	Displacement of characteristic points, at load, kg						
	0	85	174.4	260.44	345.39	426.39	515.09
1.1v.op	0.00	0.39	1.06	1.99	2.85	3.77	4.60
1.2v.op	0.00	0.77	1.63	2.69	3.68	4.65	5.72
2.1v.pr	0.00	0.51	1.54	2.71	3.88	5.08	6.41
2.2v.pr	0.00	0.87	1.73	2.95	4.09	5.28	6.56
3.1v.pr	0.00	0.94	2.30	3.64	4.86	6.18	7.68
4.1n.pr	0.00	0.77	1.75	2.88	3.93	5.00	6.13
4.2n.pr	0.00	0.65	1.47	2.38	3.18	4.11	5.06

**Таблица 4. Результаты испытания образца при термомеханическом воздействии**  
**Table 4. Results of the sample test under thermomechanical action**

Sensor	Displacement of characteristic points, at load, kg								
	0	345.39	345.39	345.39	345.39	345.39	345.39	426.39	515.09

1.1v.op	0.00	2.72	2.81	3.12	3.40	3.64	3.93	4.73	-
1.2v.op	0.00	3.64	3.74	3.90	4.20	4.55	5.13	6.32	-
2.1v.pr	0.00	4.16	4.36	4.77	5.68	6.27	6.87	8.37	-
2.2v.pr	0.00	4.92	5.23	5.60	6.40	6.94	7.50	8.98	-
3.1v.pr	0.00	4.89	4.97	5.42	6.47	7.17	7.83	8.53	-
4.1n.pr	0.00	3.85	4.08	4.48	5.25	5.65	6.08	7.37	-
4.2n.pr	0.00	3.23	3.47	3.53	3.21	3.36	3.75	4.89	-
term.1	22	22	60	90	115	120	125	130	130
term.2	22	22	60	90	115	120	125	130	130
term.3	22	22	60	90	115	120	125	130	130

Перемещения точек КЭ-ой модели оболочки приведены в Таблице 5 и Таблице 6.

**Таблица 5. Результаты КЭ-ого моделирования испытания без температурного воздействия**  
**Table 5. The results of the Finite Elements (FE) simulation of the test without temperature exposure**

Sensor	Displacement of characteristic points, at load, kg						
	0	85	174.4	260.44	345.39	426.39	515.09
1.1v.op	0.00	0.85	1.95	2.98	4.00	4.98	6.09
1.2v.op	0.00	0.85	1.95	2.98	4.00	4.98	6.09
2.1v.pr	0.00	0.61	1.46	2.30	3.15	3.97	4.90
2.2v.pr	0.00	0.61	1.46	2.30	3.15	3.97	4.90
3.1v.pr	0.00	0.60	1.44	2.28	3.13	3.97	4.90
4.1n.pr	0.00	0.50	1.20	1.91	2.63	3.34	4.14
4.2n.pr	0.00	0.50	1.20	1.91	2.63	3.34	4.14

**Таблица 6. Результаты КЭ-ого моделирования испытания при термомеханическом воздействии**  
**Table 6. The results of the FE simulation of the thermomechanical impact test**

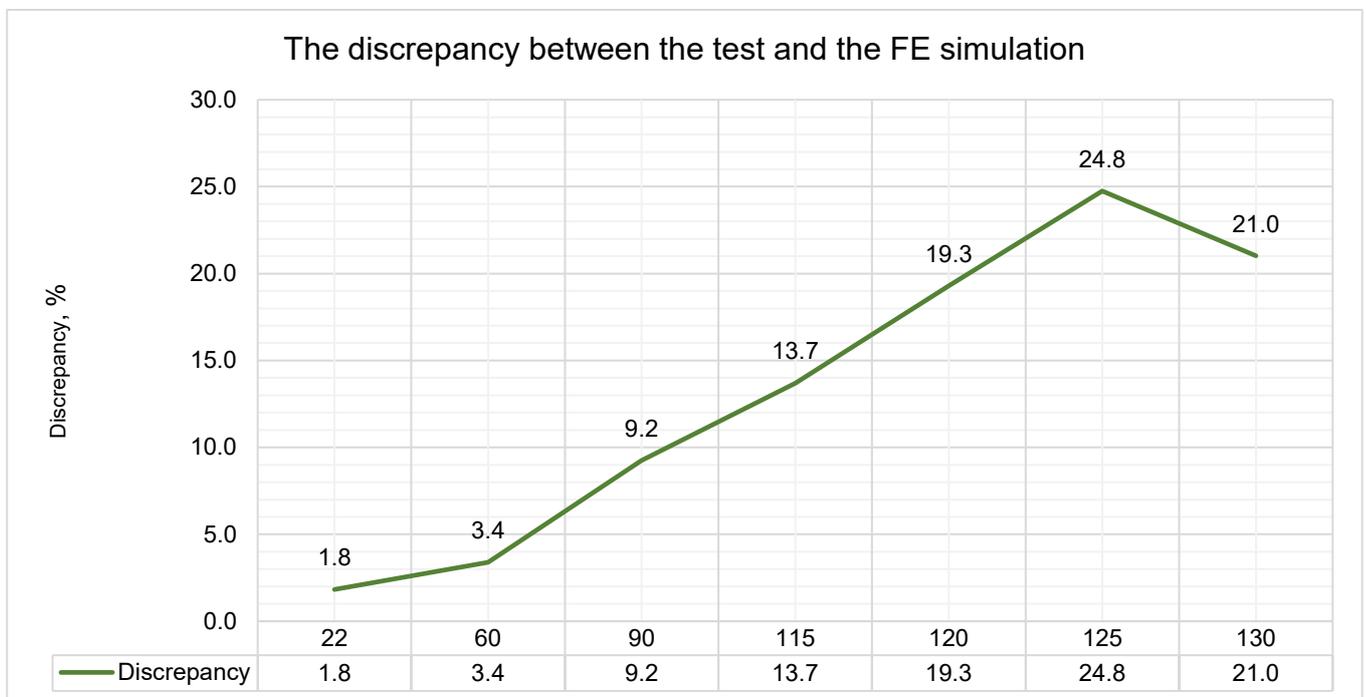
Sensor	Displacement of characteristic points, at load, kg								
	0	345.39	345.39	345.39	345.39	345.39	345.39	426.39	515.09
1.1v.op	0.00	4.30	4.27	4.32	4.66	4.82	4.94	6.07	7.33
1.2v.op	0.00	4.30	4.27	4.32	4.66	4.82	4.94	6.07	7.33
2.1v.pr	0.00	3.37	3.33	3.40	3.99	4.16	4.27	5.13	6.15
2.2v.pr	0.00	3.37	3.33	3.40	3.99	4.16	4.27	5.13	6.15
3.1v.pr	0.00	3.36	3.32	3.39	4.01	4.18	4.29	5.15	6.18
4.1n.pr	0.00	2.79	2.79	2.83	3.44	3.61	3.68	4.27	5.22

4.2n.pr	0.00	2.79	2.79	2.83	3.44	3.61	3.68	4.27	5.22
term.1	22	22	60	90	115	120	125	130	130
term.2	22	22	60	90	115	120	125	130	130
term.3	22	22	60	90	115	120	125	130	130

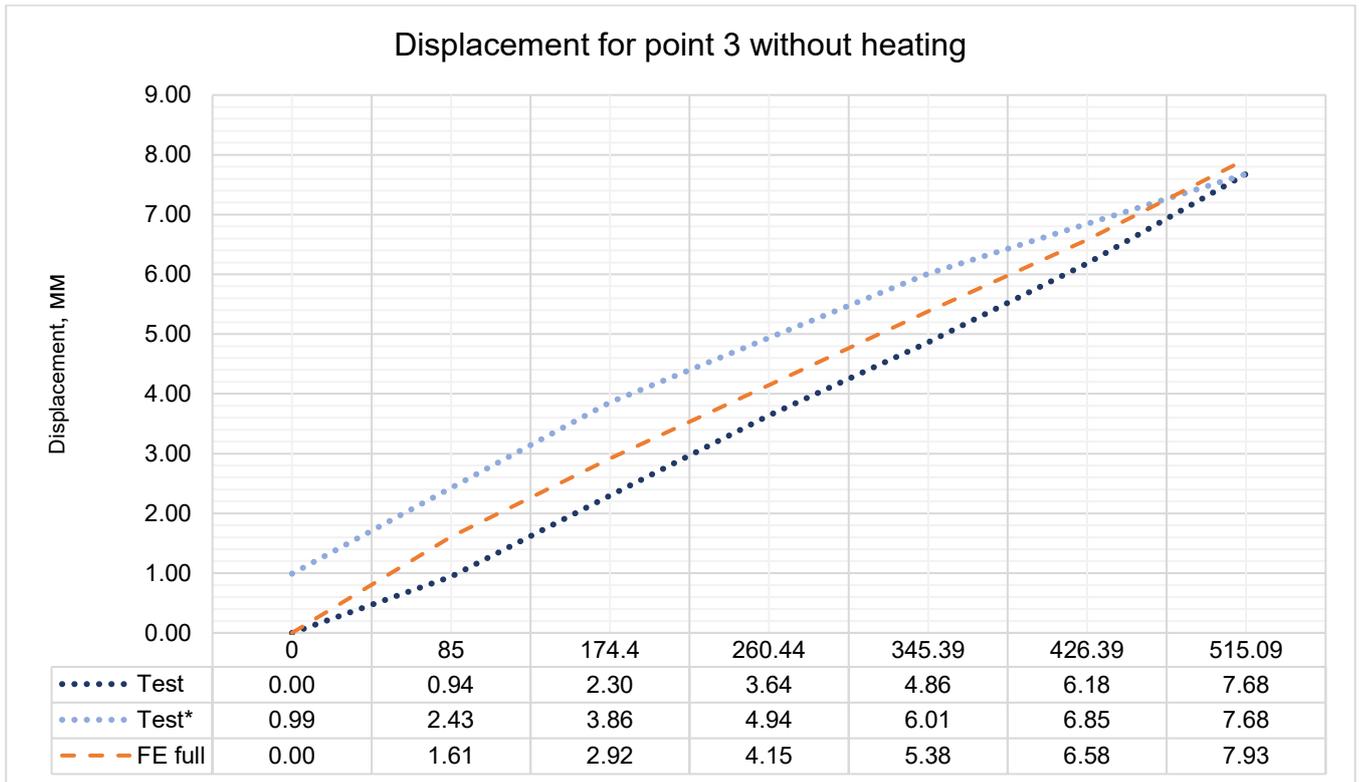
Ниже на Рисунке 12 и Рисунке 13 приведены графики отражающие показания датчика 3.1в.пр для расчета и испытания без учета температурного воздействия и с ним соответственно.

По графикам видна общая тенденция – КЭ расчет показывает прогибы, практически идентичные реальному испытанию. В среднем расхождение расчета с испытанием при механическом воздействии составляет 1.8%.

Сравнительный анализ результатов реального испытания и его КЭ модели при комбинированном термомеханическом воздействии приведен на Рисунке 11. Максимальное расхождение наблюдалось на третьем шаге, при температуре 125°C – 24.8%, минимальное, при отсутствии термического воздействия – 1.8%. Такие величины расхождений можно связать с начальными несовершенствами представленного для испытаний образца. Тем не менее, общий вид графика прогибов, полученного в ходе КЭ расчета, повторяет аналогичный график, полученный в ходе испытания.

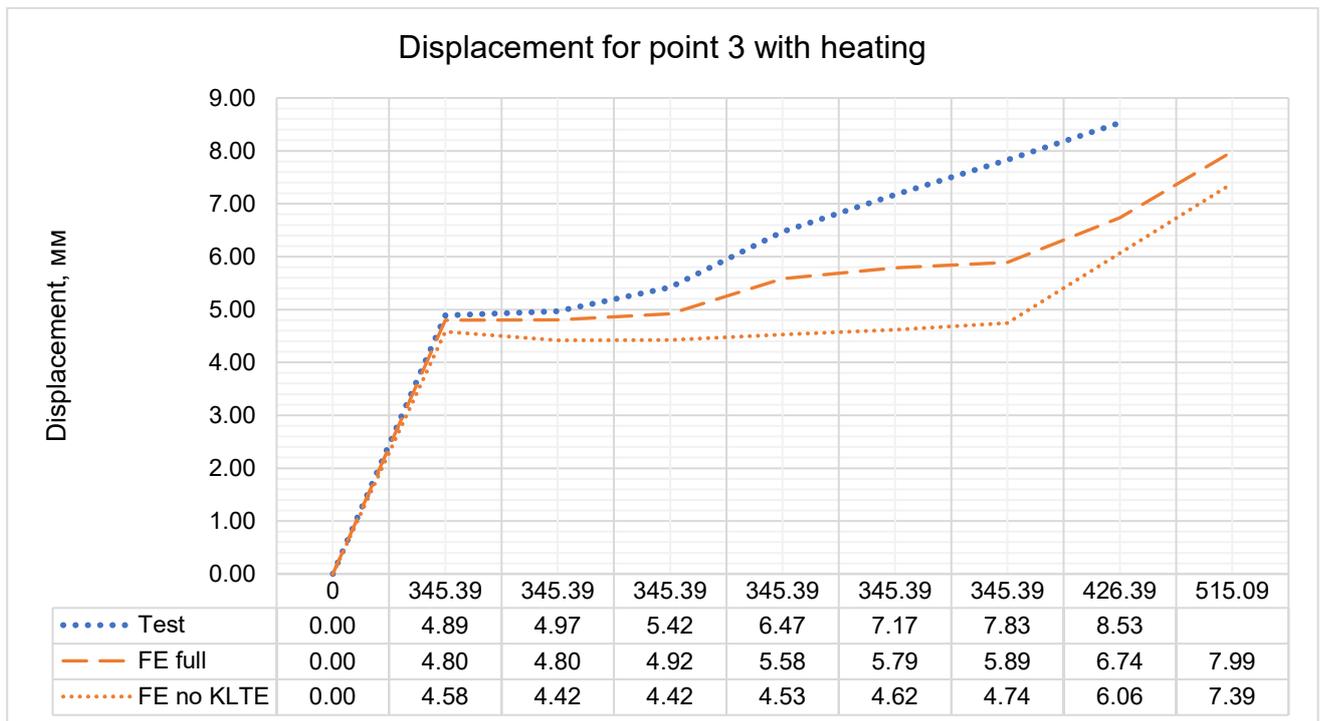


**Рисунок. 11 – График расхождения в результатах реального и КЭ эксперимента**  
**Fig. 11 – A graph of the discrepancy between the results of the real and the FE experiment**



**Рис. 12 – График перемещений точки 3 при механическом воздействии (Test\* - линия разгрузки)**

**Fig. 12 – Graph of point 3 displacements under mechanical action (Test\* - unloading line)**



**Рис. 13 – График перемещений точки 3 при термомеханическом воздействии (FE no KLTE - (coefficient of linear temperature expansion) – перемещения в модели без учета КЛТР)**

**Fig. 13 – Graph of point 3 displacements under thermomechanical influence (FE no KLTE - (coefficient of linear temperature expansion) – displacement in the model without considering KLTE)**

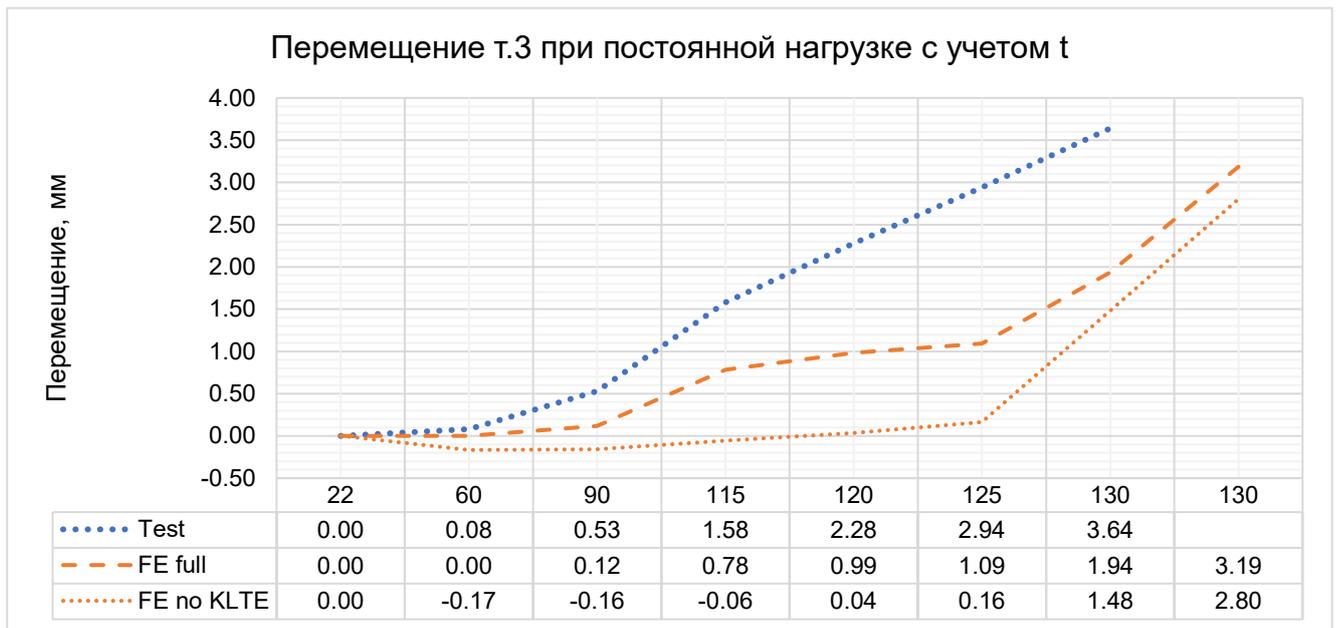
Влияние нагрева внутренней обшивки на прогибы оценивалось следующим образом: из итогового значения прогибов на каждом шаге вычиталось значение прогиба на первом шаге нагружения, когда нагрев отсутствовал. По полученным значениям был построен график

Antipin, A.; Mishnev, M.

Three-layer fiberglass shell under thermomechanical action;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **111** Article No 11105. doi: 10.4123/CUBS.111.5

зависимости прогибов оболочки при постоянной нагрузке от температуры внутренней обшивки (Рисунок 14). По нему видно, что на при температурах до, приблизительно, 90°C прогибы практически не увеличиваются.



**Fig. 14 – График перемещений точки 3 при постоянной нагрузке и переменной температуре (FE no KLTE – перемещения в модели без учета КЛТР)**

**Fig. 14 – Graph of point 3 displacements at constant load and variable temperature (FE no KLTE – movements in the model without considering KLTR)**

После отметки в 90°C на графике прогибов наблюдается излом. Он явно виден на графике расчетных прогибов и менее заметен в реальном испытании. Для того, чтобы понять причину резкого возрастания прогибов на отдельном участке температур, был построен аналогичный график перемещений, но для расчетной модели, в которой КЛТР материала обшивок был принят равным 0. На Рисунках 13 и 14 можно видеть, что при отсутствии температурного расширения излома на графике также нет. Следовательно, можно предполагать, что резкий рост прогибов на участке 90-115°C связан с падением на этом диапазоне температур значения КЛТР стеклопластика практически до 0.

В ходе натурного испытания при нагрузке 515.09 кг прогибы образца начали ускоренно расти в течение нескольких минут, после чего произошло разрушение обшивок и складывание оболочки по центру пролета (Рисунок 15 слева). В месте излома присутствует расслоение обшивок. Учитывая место расположения и характер излома, а также характеристики материалов обшивок можно утверждать, что при нагреве значительная часть усилий от внешней нагрузки перешла на наружный слой (Рисунок 16). Ввиду этого в центре пролета при указанной нагрузке внешний слой потерял несущую способность, что привело к разрывам в армирующей ткани и постепенному нарастанию деформаций без увеличения внешней нагрузки. Внутренний слой из-за пониженных (с ростом температуры) характеристик не смог полностью воспринять усилия от частично разрушенного внешнего слоя. По достижению определенной степени разрушения внешней обшивки наступило полное исчерпание несущей способности образца.



**Рис. 15 – Общий вид разрушения опытного образца оболочки (слева – непосредственно после разрушения, справа – после снятия слоя шпаклевки)**  
**Fig. 15 – The total volume of destruction of the prototype shell (on the left – immediately after destruction, on the right – after removing the putty layer)**

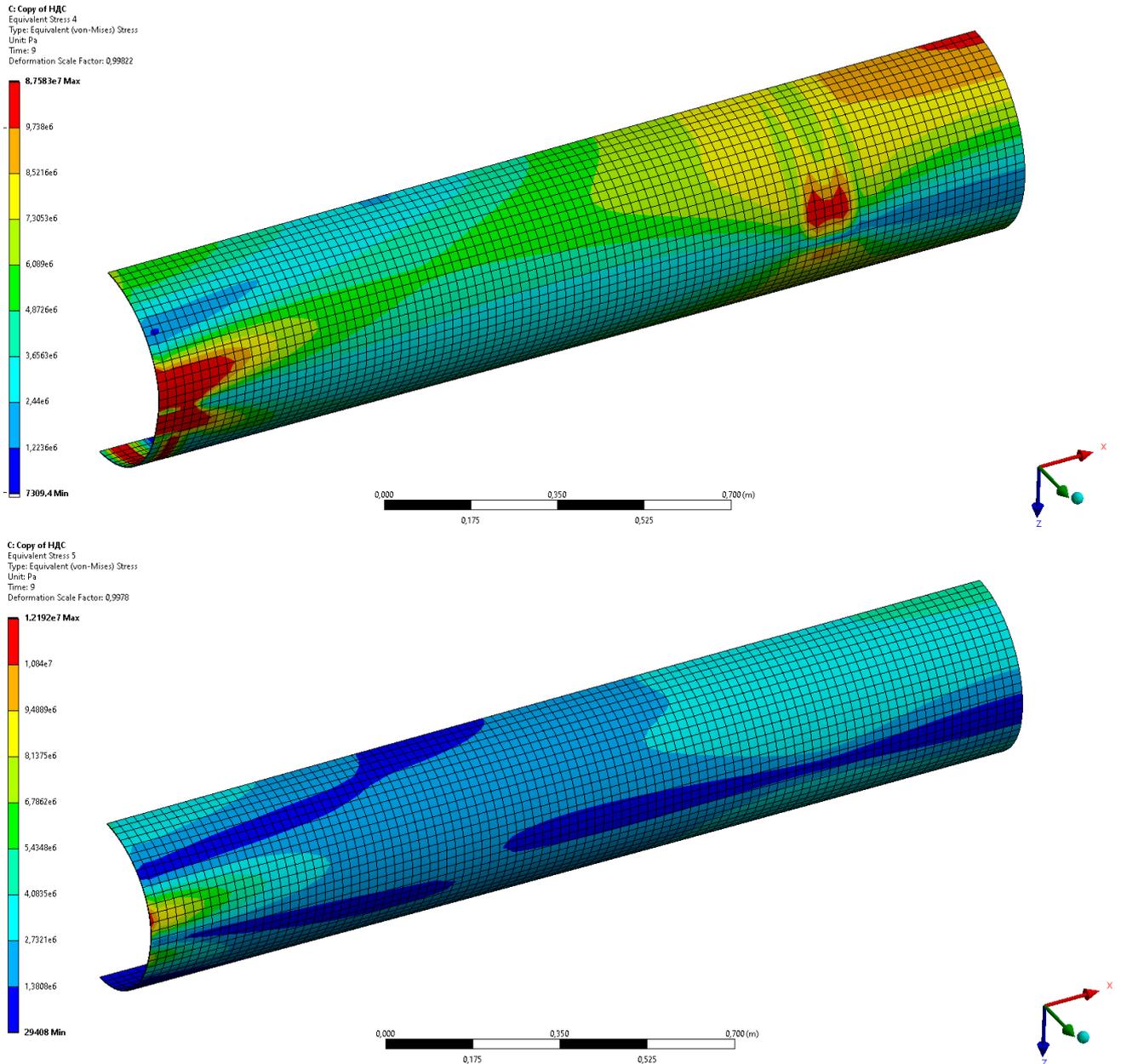
Изополя напряжений, полученные в ходе КЭ-ого моделирования (Рисунок 16) эксперимента указывают, что разрушение образца должно было произойти на опоре в зоне над ложементом. Но в условиях реального испытания такого не произошло. Объяснить подобное различие можно неплотным опиранием реального образца на ложементы и наличием слоя штукатурки на наружной поверхности оболочки, смягчающей данный контакт.

Необходимо отметить, что модель участка газоотводящего тракта, представленная для натурного испытания, содержала ряд дефектов, которые отразились на результатах. Например: различные диаметры торцевых сечений; неравномерность и неоднородность утеплителя (данный дефект мог повлиять в значительной мере на совместность работы слоев); на одном из концов трубы внутренняя поверхность «пошла волной» (что также в значительной мере могла повлиять на работу трубы в приопорной зоне); неплотное опирание торцов образца на опоры.

Расчет трехслойной оболочки методом конечных элементов на механическое воздействие показывает хорошую сходимость с реальным испытанием. В случае комбинированного термомеханического воздействия качественно результаты также близки, но конкретные значения прогибов различаются, и разница между ними растет с ростом температуры.

При температурах до 90°C влияние нагрева внутренней поверхности трубы на ее прогиб мало. На участке 90-120°C наблюдается резкое увеличение прогибов, которое можно связать с падением на данном участке значения КЛТР материала обшивок практически до 0. При дальнейшем нагреве характер деформаций линейный.

Различия в результатах расчета и испытания можно объяснить наличием в реальном образце ползучести, которая не учитывалась в КЭ расчете. Особенно это актуально при термомеханическом воздействии, где данный эффект потенциально более значим, чем в случае нагружения без нагрева.



**Рис. 16 – Изополя эквивалентных напряжений по Мизесу для внешней (сверху) и внутренней (снизу) обшивки**

**Fig. 16 – Isofields of equivalent Mises stresses for the outer (top) and inner (bottom) skin**

## 4 Conclusions

Основные выводы по работе:

- 1) разработана и верифицирована испытаниями конечно-элементная модель участка трехслойной стеклопластиковой оболочки, работающей по неразрезной схеме;
- 2) при температурах до 90°C влияние нагрева внутренней поверхности трубы на ее прогиб незначительно;
- 3) на участке температур 90-120°C имеет место резкое скачкообразное увеличение прогибов оболочки, связанное с падением КЛТР материала обшивок;
- 4) при расчете трехслойных стеклопластиковых оболочек необходимо учитывать температурное расширение материалов обшивок, расчет без учета данного фактора не является расчетом «в запас»;
- 5) при температурах эксплуатации ниже 90°C учетом изменения КЛТР в зависимости от температуры можно пренебречь.



Учитывая вышесказанное, создание рабочей расчетной модели требуется проведение более комплексного анализа напряженно-деформированного состояния рассмотренной оболочки и уточнения ряда параметров материала обшивок, в частности ползучести.

## References

- 1 Fangueiro, R. (2011) Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications. *Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications*. <https://doi.org/10.1533/9780857095583>.
- 2 Plecnik, J.M., Whitman, W.E., Baker, T.E. and Pham, M. (1984) Design Concepts for the Tallest Free-standing Fiberglass Stack. *Polymer Composites*, **5**. <https://doi.org/10.1002/pc.750050305>.
- 3 Astashkin, V., Shmatkov, S. and Shmatkov, A. (2016) Polymer Composite Rational Application Field in the Gas-Escape Channel Construction of Industrial Chimneys and Ventilation Pipes. *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, **150**, 1701–1708. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.07.158>.
- 4 Zhang, D.H. and Wang, J.H. (2013) The FRP Chimney Design and Construction Technology for Coal-Fired Power Plant FGD System. *Frontiers of Energy and Environmental Engineering - Proceedings of the 2012 International Conference on Frontiers of Energy and Environmental Engineering, ICIEEE 2012*. <https://doi.org/10.1201/b13718-122>.
- 5 Ding, A.X., Ni, A.Q. and Wang, J.H. (2013) Analysis of FRP Chimneys Liners under Wind and Seismic Load. *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications Ltd, **790**, 193–197. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.790.193>.
- 6 Honga, S.J., Honga, S.H. and Doh, J.M. (2007) Materials for Flue Gas Desulfurization Systems Operating in Korea and Their Failures. *Materials at High Temperatures*, **24**. <https://doi.org/10.3184/096034007X278374>.
- 7 Mishnev, M., Korolev, A., Ekaterina, B. and Dmitrii, U. (2022) Effect of Long-Term Thermal Relaxation of Epoxy Binder on Thermoelasticity of Fiberglass Plastics: Multiscale Modeling and Experiments. *Polymers 2022, Vol. 14, Page 1712*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 1712. <https://doi.org/10.3390/POLYM14091712>.
- 8 Li, K., Wang, K., Zhan, M.S. and Xu, W. (2013) The Change of Thermal-Mechanical Properties and Chemical Structure of Ambient Cured DGEBA/TEPA under Accelerated Thermo-Oxidative Aging. *Polymer Degradation and Stability*, **98**, 2340–2346. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2013.08.014>.
- 9 Mishnev, M., Korolev, A., Ekaterina, B. and Dmitrii, U. (2022) Effect of Long-Term Thermal Relaxation of Epoxy Binder on Thermoelasticity of Fiberglass Plastics: Multiscale Modeling and Experiments. *Polymers*, **14**, 1712. <https://doi.org/10.3390/polym14091712>.
- 10 Korolev, A., Mishnev, M., Vatin, N.I. and Ignatova, A. (2021) Prolonged Thermal Relaxation of the Thermosetting Polymers. *Polymers*, **13**, 4104. <https://doi.org/10.3390/polym13234104>.
- 11 Yang, Y., Xian, G., Li, H. and Sui, L. (2015) Thermal Aging of an Anhydride-Cured Epoxy Resin. *Polymer Degradation and Stability*, Elsevier Ltd, **118**, 111–119. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2015.04.017>.
- 12 Korolev, A., Mishnev, M., Zherebtsov, D., Vatin, N.I. and Karelina, M. (2021) Polymers under Load and Heating Deformability: Modelling and Predicting. *Polymers*, MDPI AG, **13**, 1–14. <https://doi.org/10.3390/POLYM13030428>.
- 13 Korolev, A., Mishnev, M., Vatin, N.I. and Ignatova, A. (2021) Prolonged Thermal Relaxation of the Thermosetting Polymers. *Polymers*, MDPI, **13**. <https://doi.org/10.3390/POLYM13234104>.
- 14 Mishnev, M.V. and Korolev, A.S. (2021) Solid Particle Erosion Wear of Thermosetting Polymers and Composites at Room and Elevated Temperatures: An Experimental Study. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **99**, 9804–9804. <https://doi.org/10.4123/CUBS.98.4>.
- 15 Gailitis, R., Sprince, A., Kozlovskis, T., Radina, L., Pakrastins, L. and Vatin, N. (2021) Long-Term Properties of Different Fiber Reinforcement Effect on Fly Ash-Based Geopolymer Composite. *Crystals*, MDPI AG, **11**. <https://doi.org/10.3390/CRYST11070760>.
- 16 Tariq, S.Z. and Abdullah, F.A. (2020) Effect of Wood Ash Additive on the Thermal Stresses of Random Fiberglass/Polyester Composite Pipes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, **745**. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012062>.
- 17 Marsi, N., Subramaniam, L., Rus, A.Z.M., Sulong, N., Fodzi, M.H.M., Huzaisham, N.A., Yusuf, N.A.A.N., Mahmood, S., Shaari, M.F. and Shariff, H.H. (2020) The Mechanical Performance of

Antipin, A.; Mishnev, M.

Three-layer fiberglass shell under thermomechanical action;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **111** Article No 11105. doi: 10.4123/CUBS.111.5



- Pipe Based on Fiberglass Reinforced with Plastic Waste (FRPW) Composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, **854**. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/854/1/012001>.
- 18 da Silva, T.R., de Azevedo, A.R.G., Cecchin, D., Marvila, M.T., Amran, M., Fediuk, R., Vatin, N., Karelina, M., Klyuev, S. and Szlag, M. (2021) Application of Plastic Wastes in Construction Materials: A Review Using the Concept of Life-Cycle Assessment in the Context of Recent Research for Future Perspectives. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma14133549>.
- 19 Astashkin, V.M. and Mishnev, M. V. (2016) On the Development of the Manufacturing Technology of Fiberglass Cylindrical Shells of Gas Exhaust Trunks by Buildup Winding. *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, **150**, 1636–1642. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.07.144>.
- 20 Astashkin, V.M. and Mishnev, M. (2017) Fiberglass Shells of a Three-Layer Structure with a Light Filler, Manufactured by the Winding Method. *ИВД. №2*. <https://cyberleninka.ru/article/n/stekloplastikovye-obolochki-treshloynnoy-strukturny-s-legkim-zapolnitelem-izgotavlivaemye-metodom-namotki>.
- 21 Astashkin, V.M., Zholudov V.S. and Korsunsky A.Z. (2011) Chimneys: Traditions and Innovations Monograph. Published. SUSU Center. [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_RU\\_NLR\\_bibl\\_1944002/](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_1944002/).
- 22 Chen, X. and Liu, Y. (2014) Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. <https://doi.org/10.1201/b17284>.
- 23 Dill, E.H. (2020) ANSYS Workbench. The Finite Element Method for Mechanics of Solids with ANSYS Applications. <https://doi.org/10.1201/b11455-19>.
- 24 Grebenisan, G., RADU, I.E. and Anton, I. (2014) FINITE ELEMENTS ANALYSIS OF THERMAL STEADY STATE, USING ANSYS. *ANNALS OF THE ORADEA UNIVERSITY. Fascicle of Management and Technological Engineering.*, **XXIII (XIII)**, **2014/2**. <https://doi.org/10.15660/auofmte.2014-2.3087>.
- 25 Sabarish, R. and Jeya Kumar, M.P. (2019) The Design and Analysis of Piston - Steady State Thermal Analysis Using “Ansys.” *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, **9**. <https://doi.org/10.24247/ijmperdjun201921>.
- 26 Anikanova, L., Volkova, O., Kurmangalieva, A. and Mesheulov, N. (2021) Solving Heat Engineering Problems Using the Finite Element Method. *Architecture and Engineering*, **6**. <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2021-6-3-03-10>.
- 27 Jikol, F., Akop, M.Z., Arifin, Y.M., Salim, M.A. and Herawan, S.G. (2021) A Study of Steady-State Thermal Distribution on Circular Plate Using ANSYS. *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, **14**. [https://ijneam.unimap.edu.my/images/PDF/IJNeaM%20Special%20Issue%202021%20\(1\)/Vol%2014%20SI%20Aug2021%20479-488.pdf](https://ijneam.unimap.edu.my/images/PDF/IJNeaM%20Special%20Issue%202021%20(1)/Vol%2014%20SI%20Aug2021%20479-488.pdf).
- 28 Bhagavathiyappan, S., Balamurugan, M., Rajamanickam, M., Vijayanandh, R., Raj Kumar, G. and Senthil Kumar, M. (2020) Comparative Computational Impact Analysis of Multilayer Composite Materials. AIP Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1063/5.0019380>.
- 29 National Standard GOST 19907–2015 Dielectric Fabrics Made of Glass. Twister Complex Threads. Specifications. <https://docs.cntd.ru/document/1200013963>.
- 30 Bi, S., Liu, S., Wang, S., Zhang, L., Korolev, A., Mishnev, M. and Ulrikh, D.V. (2022) Non-Linearity of Thermosetting Polymers and GRPs; Thermal Expanding: Experimental Study and Modeling. *Polymers 2022, Vol. 14, Page 4281*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 4281. <https://doi.org/10.3390/POLYM14204281>.