

Химикотехнологичен и Металургичен Университет – София

Факултет по Химични Технологии

Катедра „ Приложна механика ”

Дипломна работа

на тема:

Влияние на свойствата на полимерните материали върху енергийните характеристики, топлинните и механичните процеси при многокамерна PVC – дограма

ОБРАЗОВАТЕЛНА КВАЛИФИКАЦИОННА СТЕПЕН: Магистър

Ръководител на катедра:

/ доц. д-р инж. А. Александров /

Научен ръководител:

/ доц. д-р инж. В. Илиев /

/ доц. д-р инж. Н. Пенкова /

Дипломант:

/инж. Златка Николаева Гешкова МХ 0648 /

София, ноември, 2014 г.

ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет: Химични технологии

Дата на задаване: 26.06.2014 г.

Катедра: Приложна механика

Утвърждавам,

Ръководител на катедра:

/ доц. д-р инж. А. Александров /

ЗАДАНИЕ

за изработване на дипломна работа

на студента: инж. Златка Николаева Гешкова

фак. № МХ 0648, степен „Магистър“

специалност: CAD/CAE в химичните технологии

1. Тема: Влияние на свойствата на полимерните материали върху енергийните характеристики, топлинните и механичните процеси при многокамерна PVC дограма
2. Изходни данни: конструкции и чертежи на многокамерни PVC дограми, стандарти за числено и експериментално определяне на енергийните характеристики на прозорци, врати и щори, протоколи от експериментални изследвания, технически каталог на PVC системи (www.weissprofil.bg).
3. Съдържание на дипломната работа
 - 3.1. Увод, цел и задачи
 - 3.2. Литературен обзор за периода от 1900 г. до 2014 г. върху типове конструкции на многокамерни PVC дограми, съвременните материали, използвани в прозоречните системи, методите за експериментално и числено изследване на топлинните и механичните процеси в конструктивните им елементи
 - 3.3. Обекти на изследване: четирикамерни и петкамерни PVC прозоречни системи с EPDM уплътнение и двоен стъклопакет
 - 3.4. Методи за изследване на термомеханичните процеси в PVC
 - 3.5. Математично моделиране и числена симулация на термомеханичните процеси и полета в среда ANSYS
 - 3.6. Числени резултати относно температурните и хидродинамични полета и вътрешното натоварване на прозоречните системи. Определяне на коефициента на топлопреминаване на прозоречните системи
 - 3.6. Сравнителен анализ на резултатите

Научен ръководител:

/ доц. В. Илиев /

/ доц. Н. Пенкова /

Съдържание

I. Увод.....	4
II. Литературен обзор	
1. Кратка история и класификация на полимерите.....	6
2. Поливинил хлорид (PVC) – същност, свойства и технология за производство	7
3. Конструктивни материали и елементи на прозоречните системи тип “PVC дограма”.....	10
4. Теплопреминаване през прозоречните системи	13
5. Енергийни характеристики на прозорците.....	16
6. Поведение на прозоречните структури под механично натоварване	18
7. Експериментално тестване на PVC дограмата и на нейните елементи.....	19
III. Експериментална част	
1. Математичен модел на топло- и хидродинамичните процеси в прозорчните системи	
1.1 Основни уравнения.....	23
1.2 Условия на еднозначност	27
2. Числена симулация на термомеханичните процеси и полета в среда ANSYS	
2.1 Обект на изследване и условия на числените експерименти.....	29
2.2 Изграждане на геометричен модел и мрежа от крайни елементи в среда ANSYS	
2.3 Числени експерименти	
2.3.1 Числени експерименти при геометричен модел, включващ отваряемата и неотваряемата част на дограмата	38
2.3.2 Числени експерименти със симулационно моделиране на топло-и хидродинамичните процеси в системата	39
2.3.3 Числени резултати при отчитане на слънчевия радиационен поток	43
Изводи	45
IV. Литература	47

I. Увод

Пластмасите на база поливинил хлорид (PVC) понастоящем се използват широко в строителния сектор в прозоречни системи (дограми), щори, окабеляване, тръби, покрития и др.

Важен параметър на PVC дограмата е топлоизолационната ѝ способност, изразяваща се в сравнително ниски коефициенти на топлопреминаване. Топлинното съпротивление на прозорците пряко въздейства върху енергийната ефективност на сградите: води до намаляване на топлинните загуби и до рационално оползотворяване на слънчевата енергия.

Коефициентът на топлопреминаване на прозорците в голяма степен зависи коефициентът на топлопроводност на материалите, използвани за рамката. Коефициентите на топлопроводност на дървото и поливинилхлорида (PVC) са около 0.18 W/(mK) , а тези стоманата и алуминия са както следва: 50 W/(mK) и 150 W/(mK) .

Предимство на пластмасовите прозоречни профили е възможността при изработката им в тях да се формират въздушни камери. Съвременните профили се изработват с повече от две камери. Въздухът има нисък коефициент на топлопроводност, прозрачен е за топлинното излъчване и естественото му движение в камерите е при сравнително ниски скорости. Това води до увеличаване на топлинното съпротивление на многокамерните PVC дограми.

Основна част на PVC дограмата е стъклопакетът - конструкция от едно или повече стъкла, между които има херметично затворено газово пространство - въздух или инертен газ (аргон, криптон, ксенон). Системите с двойни стъклопакети намаляват топлинните загуби с около 50% в сравнение с единичните прозорци и предотвратяват кондензацията и образуването на скреж по вътрешните повърхности на прозореца. Разстоянието между стъклата в стъклопакета се фиксира от т. нар. дистанционер - кух профил, съединен в краищата и изпълнен със специален обезводнител, който изсушава газа в стъклопакета. Материалите, от които обикновено се изработва, са алуминий или галванизирани стомана.

При експлоатацията на прозоречните системи възникват разлики в налягането в херметизираното газово пространство и налягането на околната среда. Тези разлики зависят от флуктуациите на метеорологичното налягане, надморската височина на прозореца и температурата на херметизирания газ и определят т. нар. вътрешно натоварване, водещо до изкривяване на стъклата. Вътрешното натоварване в комбинация с външни (вятър, звук...) и с топлинно натоварване са причина за възникване на напрежения и деформации в елементите на прозорците, които е трудно да бъдат предсказани чрез класическите изчислителни и експериментални подходи.

За детайлно числено определяне на триизмерните температурните полета, топлинното съпротивление и вътрешното натоварване на прозоречните системи, е необходимо да бъдат проведени моделни изследвания на топло – и хидродинамичните процеси с прецизно отчитане на конструкционното оформление.

Целта на настоящата работа е да бъде анализирано и оценено влиянието на свойствата на конструкционните полимерни материали върху енергийните характеристики, топлинните и механичните процеси при многокамерни прозоречни системи със стъклопакети.

За постигане на целта на дипломната работа бяха поставени за решаване следните задачи:

1. Формулиране на концепция за моделни изследвания на топлинните, хидродинамичните процеси и коефициентите на топлопреминаване при избрани типове многокамерни прозоречни системи със стъклопакети. Съставяне на математични модели на процесите.

2. Анализ на топлофизичните свойства на PVC материалите и на границите на варирането им.
3. Изграждане на геометричен модел и елементна мрежа на многокамерна прозоречна система.
4. Числени симулации на топлинните и хидродинамичните полета на прозоречната система при вариране на топлофизичните свойства на елементите от PVC.
5. Анализ на топлинните полета и определяне на коефициента на топлопреминаване на изследваните варианти.
6. Оценка на влиянието на температурните полета в прозоречната система върху вътрешното натоварване на стъклопакетите.

II. Литературен обзор

1. Кратка история и класификация на полимерите

Полимерите са високомолекулни съединения, чиито молекули са съставени от множество периодически повтарящи се елементарни звена. Вследствие на своите уникални свойства полимерите намират многостранни приложения за нуждите на строителния бранш, бита, електрически и електронни оборудвания, земеделието, леката промишленост, медицинския и спортния сектор.

Разнообразието на полимерните материали се основава на факта, че физико-химичните им свойства могат да бъдат приспособени чрез подходящо вариране на разпределението на тяхната структура и на молекулното тегло.

Най-често използваните видове пласмаси са:

- полипропилен (PP) от когото се изработват капачки на бутилки, сламки за пиене и други;
- полиетилен (PE) използван за произвеждане на пликове за еднократна употреба и други;
- поливинил хлорид (PVC) използван в строителството за изработка на тръби, дограма, подови настилки и други;
- полиетилен терефталат (PET) от когото се изработват бутилки за газирани напитки, опаковки, подходящи за използване в микровълнови печки;
- полистирен (PS) от когото се произвеждат кутии за храна, чаши за кафе, сокове и други;
- полиамид (PA) използван за изработване на специални форми и части за двигатели, влакна и други;
- полиестер (PES) използван за изработка на влакна и текстилни изделия.

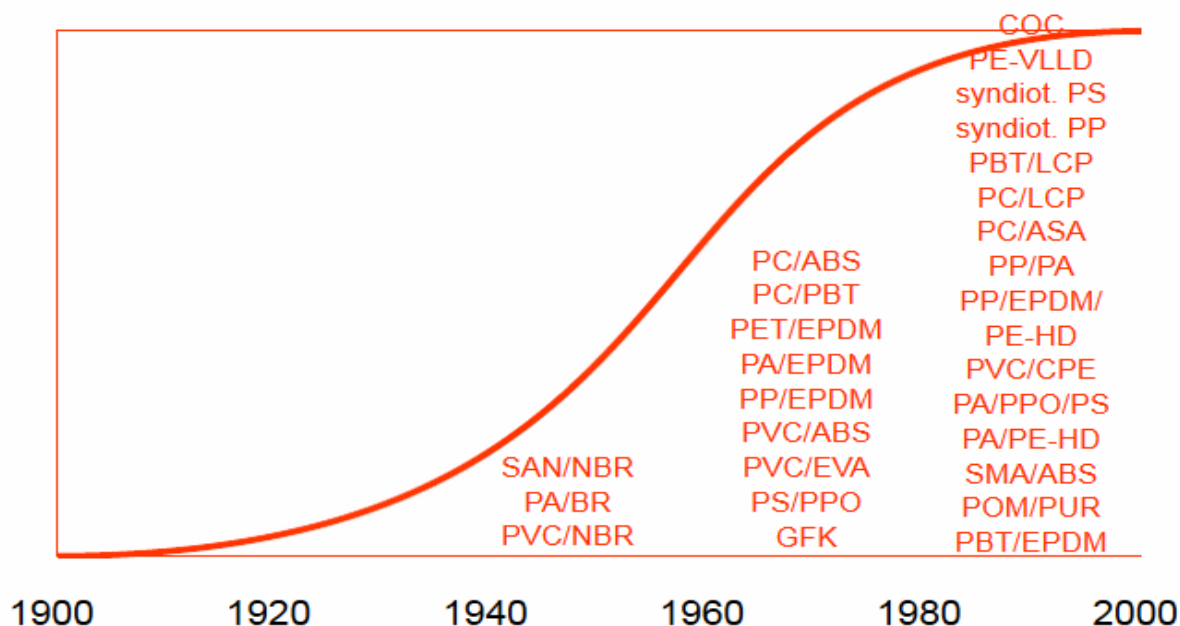
Ако бъдат разделени според топлинното поведение пластмасовите материали биват:

- термопласти – PVC, PP, PE, PS, PET полимери, чиито свойства под топлинно въздействие се изменят обратимо: при нагряване се размекват, а при охлаждане отново се втвърдяват;
- реактопласти – PES полимери, които при нагряване преминават в нетопимо и неразтворимо състояние;

По характера на образуване на надмолекулни структури полимерните материали са:

- кристални: полиетилен, полипропилен, полиетилентерефталат;
- аморфни: полиметилметакрилат, полистирен, поливинилхлорид.

Производството на полимерните материали датира от началото на 20-ти век. Развитието на полимерния синтез [1] е онагледено на фигура 1. Забелязва се засилено развитие на производството на смеси от пласмаси и каучуци между 1940 и 1980 година. След 1980 г. развитието на полимерния синтез се забавя.



Фиг. 1: Развитие на полимерния синтез

Първият синтетичен полимер е бакелитът, който е открит в САЩ през 1909 г. Той е синтезиран от фенол и формалдехид и има подходящи свойства за части на електрически уреди. На 4 юли 1913 г немският химик Фриц Клатте получава патент за производствен процес на поливинил хлорид (PVC), който става с течение на времето един от най-често използваните пластмаси в света.

През 1933 г е произведен първият PVC с търговска цел. През същата години в САЩ се произвежда друг вид PVC, който се използва като изолация за кабели. През 1955 г. започва развитието на отделните компоненти в PVC смес.

През 1973 г стартира производството и разпространението на PVC профили за прозорци и врати [2].

Първите продажби на PVC профили за прозорци и врати в България започват през 1997 година, а предлаганата профилна система е Universal [2].

2. Поливинил хлорид (PVC) – същност, свойства и технология за производство.

Около 20% от пластмасите, произведени днес в света са PVC. В зависимост от крайното приложение PVC може да бъде прозрачен или цветен, твърд или гъвкав. Химичната формула на поливинил хлорид е $(CH_2CHCl)_n$.

Основният начин за получаване на PVC материалите е чрез полимеризация.

Полимеризацията е бърз процес, при когото към полимерната верига последователно се присъединяват молекулите на един или няколко мономера към нарастващ активен център. Следва разкъсване на ненаситените връзки. За разлика от поликондензацията в реакционната смес присъстват само мономер и полимер.

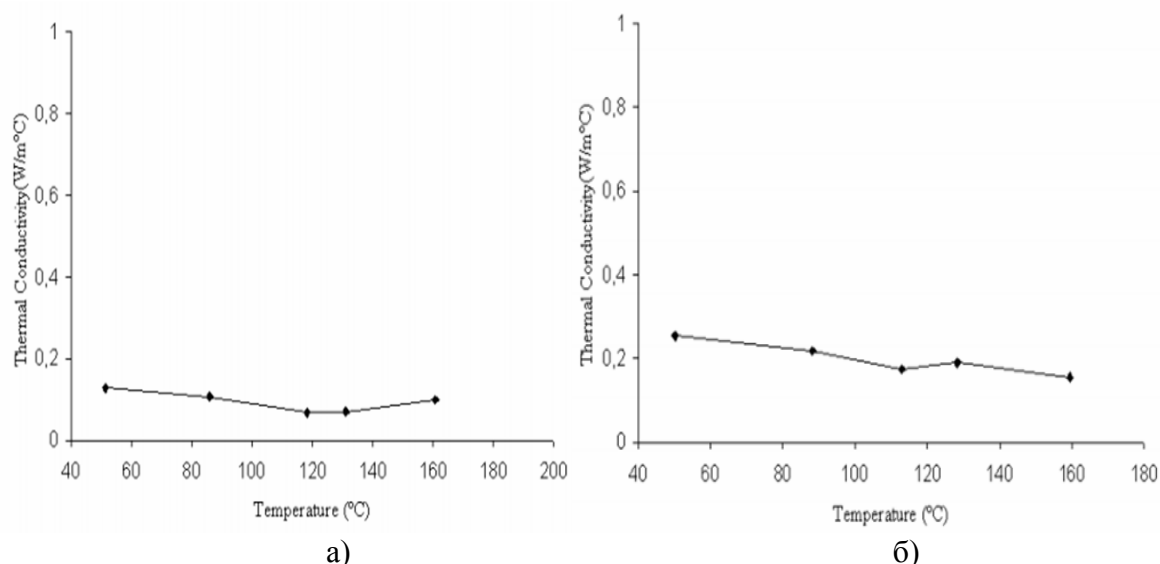


Фиг. 2 Получаване на PVC

PVC се отличава с:

- висока механична якост и твърдост;
- не голямо относително удължение;
- ограничена разтворимост;
- добра химическа устойчивост;
- отлични електроизолационни свойства.

За подобряване на експлоатационните характеристики на тези материали те се подсилват с добавки /инградиенти/, които освен другите свойства, променят и коефициента на топлопроводност λ . Като пример може да бъде посочено изследване [3] върху топлофизичните свойства на чистия PVC и смес от PVC изоборнилакрилат (PIBA) получени експериментално. Термофизичните свойства са измерени чрез DSC (Differential scanning calorimetry). Получените зависимости на коефициента на топлопроводност λ като функция на температурата T за чист PVC са представени графично на фиг. 3а. Същата зависимост но за 50% смес от PVC и изоборнилакрилат (PIBA) е онагледена на фиг. 3б.



Фиг.3: Зависимости на коефициента на топлопроводност λ от температурата T за чист PVC (а) и смес от 50% PVC и 50% изоборнилакрилат (б)

Сравнението на двете графики показва, че добавянето на PIBA повишава коефициента на топлопроводност λ над $0,20 \text{ W/(mK)}$, докато за чистия PVC коефициентът е под тази стойност.

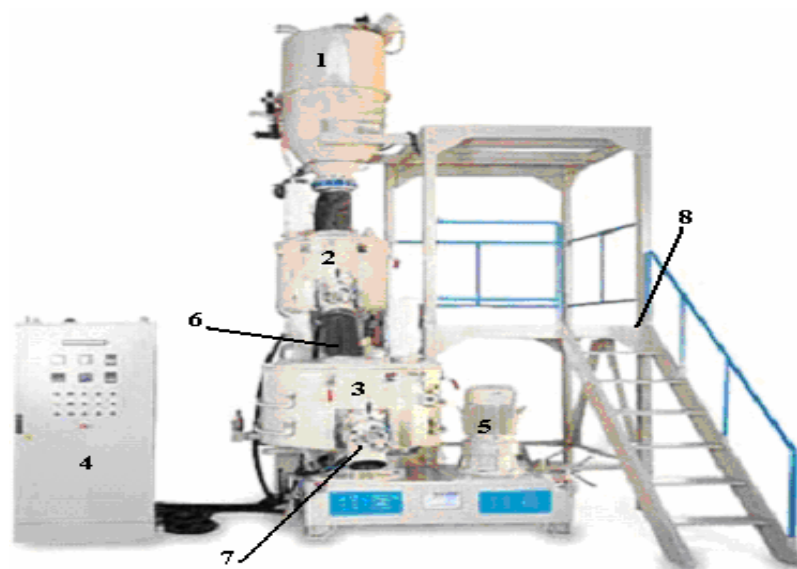
Непластифицираният поливинил хлорид (PVC-U) или PVC unplasticised, е продукт, при когото не се добавя пластификатор. Използва се при производството на PVC профили, чието съединение е под формата на прах или гранули, които се смесват с добавки (инградиенти), за да се постигне по-висока здравина на конструкцията и избран цвят.

Спрямо своето предназначение инградиентите могат да се разделят на:

- стабилизатори – вещества, подобряващи химичната или структурната стабилност на полимерите. Такива са например стабилизаторите от фенолен тип, способни да прекъснат верижният процес на окисление и автоокисление.
- пълнители – вещества от минерален, неорганичен или органичен произход. Добавянето им има за цел да подобри показателите на PVC. Такова минерално неорганично вещество е кредата, която придава мекота и еластичност, подобрява преработваемостта и физикомеханичните свойства на готовите изделия.

- пигменти и багрила – багрилата са оцветители от органичен произход, разтворими в полимерната смес. Пигментите изпълняват същата функция, но са с неорганичен характер и са неразтворими. Най- използваният пигмент е TiO_2 .

Поради малката подвижност на молекулите на полимерите, те не могат да се смесват помежду си спонтанно или с други вещества [4]. Поради тази причина се използва принудително смесване, което се осъществява в специални смесители. За изготвянето на поливинилхлоридните композити се използват двустепенни смесители, състоящи се от гореща и студена смесителна камера (фиг.4).



фиг. 4: Двустепенен вертикален смесител

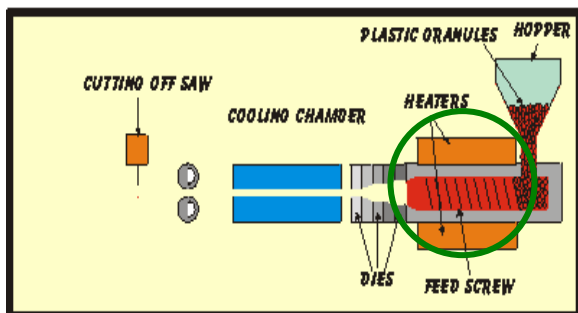
- 1 – бункер с материал за автоматично зареждане на топлия смесител; 2 – топлия смесител; 3 – студен смесител; 4 – пулт за управление; 5 – електродвигател за студения смесител; 6 – връзка между двата смесителя; 7 – щупцер за изваждане на готовата смес; 8 – платформа за обслужване на топлия смесител.

Топлият смесител и перките са проектирани с цел да се извършва автогенно нагряване. Качеството на смесване се контролира чрез изменение на температурата T . Охлаждането на сместа се извършва във втория (студен) смесител. В него се разбиват и евентуално получени агломерати от повишената температура в топлия смесител.

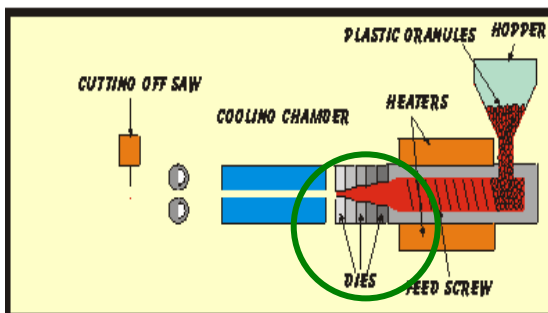
За направата на различни полимерни материали се използват разнообразни методи на преработка. Методите за преработка на термопластичните материали биват пресоване, лееене под налягане, екструзия и каландриране. Непластифицираният поливинилхлорид за производство на профили се преработва чрез екструзия. Екструзия е процес, при който вискозно течен материал се изтласква през профилираща дюза и придобива определена желана форма. Машините, на които се осъществява този процес, се наричат екструдери или шнекови машини, тъй като в работния им цилиндър се движи шнек. Конструкцията на екструдерите е разнообразна. Класификацията им може да се извърши в зависимост от броя на шнековете, техния диаметър и конфигурация. Най-широко използвани са едношнековите екструдери. При наличие на шнек, посредством неговото въртене се създава налягане, което изтласква материала извън машината. Екструзията се осъществява чрез описаните по-долу етапи [5].

Стопен полимер се прекарва през серия от матрици за постепенно намаляване на размера на полимера (**Етап 2**). Полимерът след това преминава през охлаждаща водна баня или струи

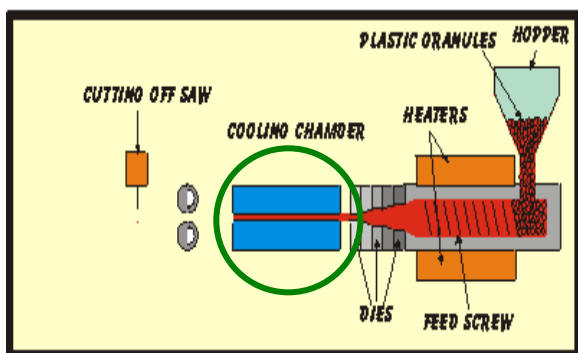
въздух (**Етап 3**). Процесът продължава до достигане на определена ширина (**Етап 4**). Накрая профилите се нарязват до определена дължина (**Етап 5**).



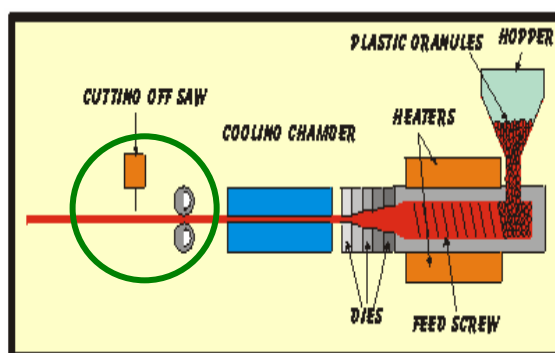
Фиг. 5 **Етап 1:** Пластмасови гранули се движат надолу по шнека и се нагреват.



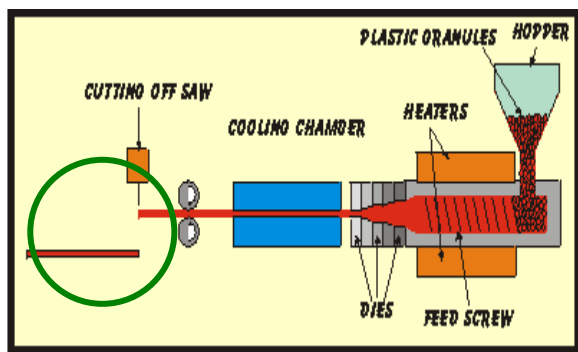
Фиг. 6 **Етап 2:** Стопената пластмаса се прекарва през серия от матрици.



Фиг. 7 **Етап 3** Пластмаса се охлажда чрез преминаване през водна баня



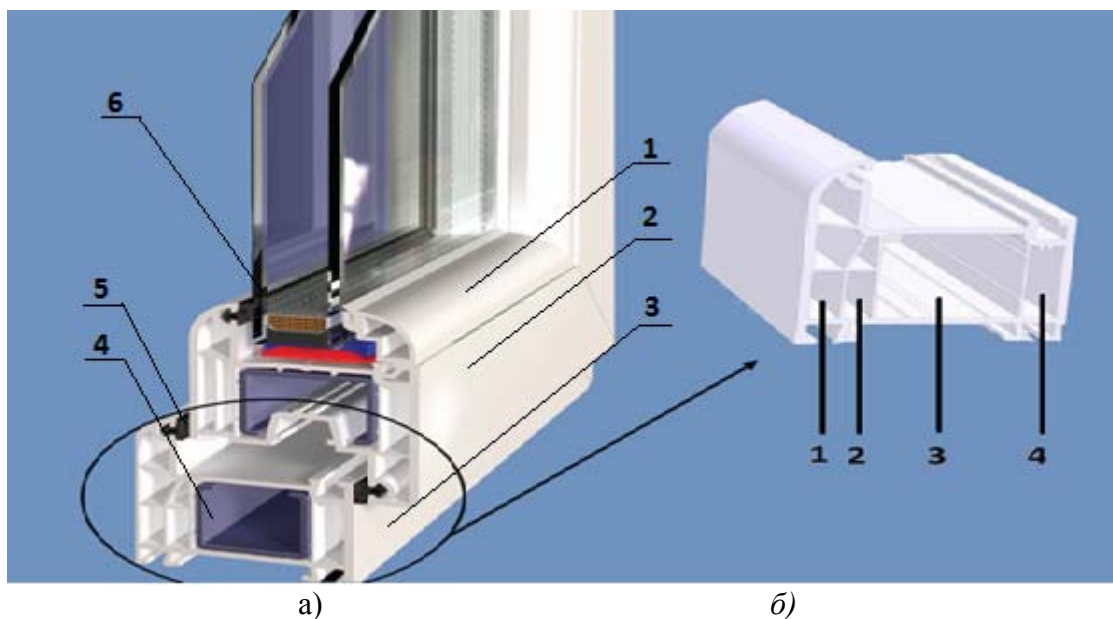
Фиг. 8 **Етап 4** Екструзията продължава до достигане на предварително определена дължина



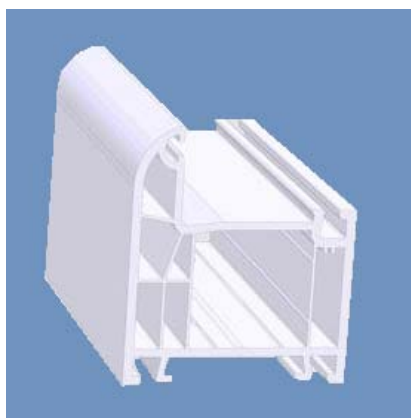
Фиг. 9 **Етап 5** Фиксира се дължината на профилите

3. Конструктивни материали и елементи на прозоречните системи тип “PVC дограма”

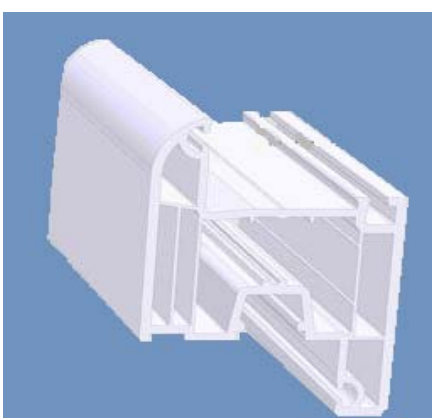
Прозоречните системи (фиг. 10) се състоят от каса (фиг. 11), крило (фиг. 12), където е необходимо делител (фиг. 13), стъкодържател (фиг. 14), стъклопакет (фиг. 15) и уплътнения (фиг. 16) [6]. Отделните елементи на прозоречната система са изработени от полимерни, метални и силикатни материали. Полимерните материали се използват с цел изработването на различни части от PVC профилите.



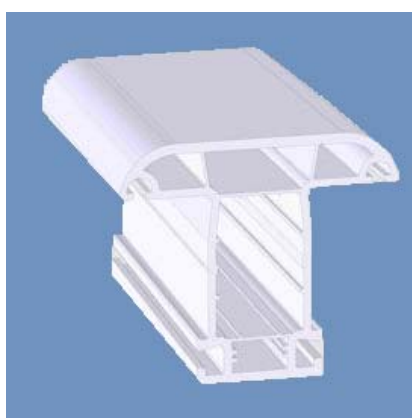
Фиг. 10 (а) Прозоречна система: 1 – стъклодържател; 2 – крило; 3 – каса; 4 – усилващ профил; 5 – уплътнение. б) Въздушни камери



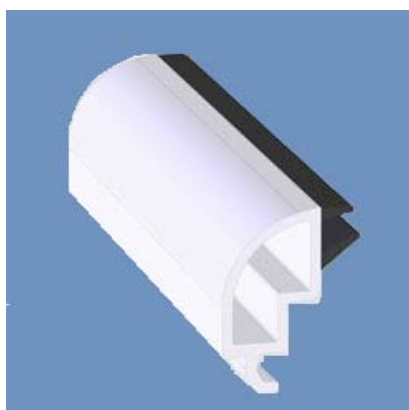
Фиг. 10 Каса



Фиг. 11 Крило



Фиг. 12 Неподвижен делител



Фиг. 14 Стъклодържател



Фиг. 15 Стъклопакет



Фиг. 16 Уплътнение

По-долу са описани накратко отделните елементи на прозоречните системи и материалите, от които са изградени.

Основните елементи на рамката са:

- **Каса** - се изработва се от PVC-U. Материалът PVC-U е един от най-широко използваните пластмаси за производство на профили. Стандартната монтажна широчина на касата е 60 mm. В нея се формират въздушни камери.

- **Крило** - изработва се също от PVC – U. Крилото е основен елемент на отваряемата част на прозореца.

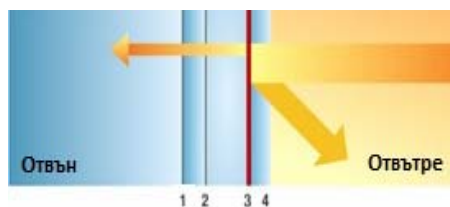
- **Делител** - изработва се от PVC – U. Делителят може да бъде подвижен и неподвижен. Той разделя отваряемата част от неотваряемата.

- **Стъклодържател** – изработва се от PVC – U.

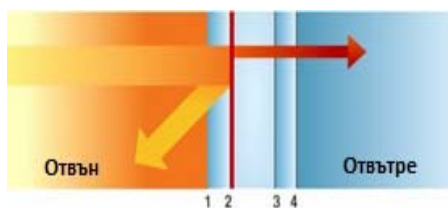
- **Уплътнение** - изработва се от EPDM. Постава за уплътнение от вятър, вода и др. между касата и крилото, касата (крилото) и стъклопакета, между стъклодържателя и стъклопакета.

- **Усилващ профил** – изработва се от стомана, която осигурява нужната здравина на дограмата.

Стъклопакети – система от два или повече стъклени листа, с или без покрития и уплътняваща система, които ограничават херметизирано газово пространство (въздух, аргон, ксенон...). Номерацията на стъклените повърхности (фиг 17 и 18) е отвън навътре съгласно стандартите [ISO 15099]



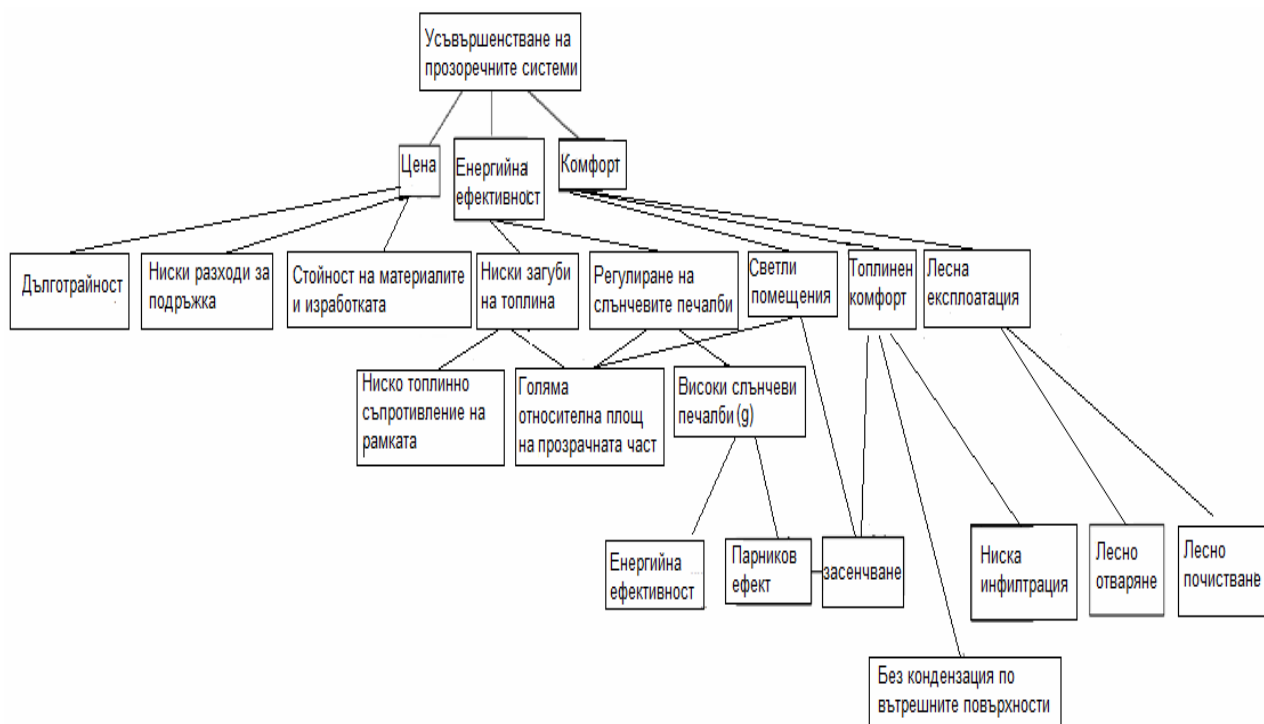
Фиг. 17 Стъклопакет с нискоемисионно покритие на повърхност 3 (К-стъкло)



Фиг. 18 Стъклопакет с слънцезащитно покритие на повърхност 2

Съвременната стъкларска индустрия е ориентирана към производството на нови типове покрития за плоското стъкло с възможности за регулиране на спектрално селективните оптични свойства на стъклените листа в прозоречната система, възможности за самопочистване, фотоволтаични ефекти и др. На пазара се предлагат и различни по цвят стъкла, които в зависимост от предназначението им могат да бъдат химически и топлинно закалени или temperирани.

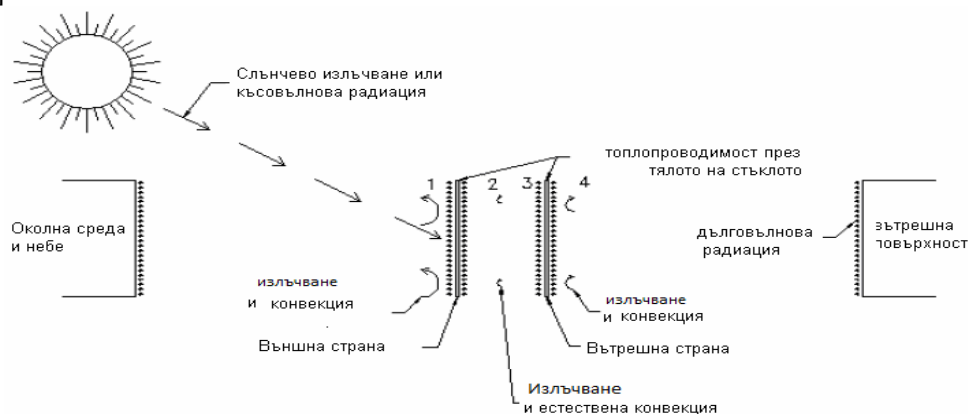
Конструкцията на рамката, и материалите, използвани за отделните елементи също са в процес на непрекъснато усъвършенстване с цел намаляване на цената, повишаване на енергийната ефективност, удължаване на жизнения цикъл и подобряване на експлоатационните характеристики на прозоречната система (фиг. 19) [7].



Фиг. 19 Ефекти при подобряване на прозрачните системи

4. Топлопреминаване през прозрачните системи

Топлопреминаването през прозрачните системи е физичен процес, при който се осъществява пренос на топлина от средата с по-висока температура към средата с по-ниска температура. Процесът се осъществява чрез топлопроводност, топлопредаване или излъчване (фиг. 20)[8].



Фиг. 20: Топлообмен при двоен стъклопакет

❖ Преносът на топлина чрез топлопроводност (кондукция) е характерен за твърдите елементи от системата: стъкла, рамка, уплътняваща система. Важен параметър за този процес е коефициентът на топлопроводност λ , който показва количеството топлина, която преминава през 1 m^2 повърхност при пад на температурата от 1 K за дебелина на пласт 1 m :

$$\lambda = \frac{\dot{q}}{\text{grad}t} = \frac{\dot{Q}}{f \cdot \text{grad}t}, \quad W / m.K \quad (1)$$

където:

$\dot{Q}$ - топлинен поток, [W]

$\dot{q}$ - плътност на топлинния поток, [W/m²]

$gradt$ - температурен градиент, [K/m];

Следователно, колкото по-нисък е коефициентът на топлопроводност, толкова подходящ е материалът за изолация. В най - общия случай λ зависи от температурата T , налягането p и състава на веществото.

❖ Теплопредаването чрез конвекция се осъществява се между твърдите повърхности на отделните елементи на системата и флуидните среди на външната околна среда, газовото пространство в помещението и херметизираното газово пространство в стъклопакета. Процесът на конвективен топлообмен протича в резултат на движението на флуидите. В зависимост от причината, която предизвиква движението на флуида, се различават теплопредаване при принудителна и свободно движение на флуидите. Теплообменът чрез конвекция се описва със закона на Нютон:

$$\dot{q} = h(T_s - T_\infty) \cdot F \quad (2)$$

$\dot{q}$ – плътност на топлинен поток, [W/m²]

h – коефициент на теплопредаване, [W/(m²K)]; F – площ, [m²]

T_s – температура на повърхостта, [K] T_∞ – температура на околната среда, [K]

❖ Теплопредаването чрез излъчване (радиация) включва процесите на частично преминаване, поглъщане и отражение на слънчевите лъчи в системата в слънчевия спектър на електромагнитните вълни, и топлообмена чрез излъчване между твърдите повърхности на елементите на дограмата и околната среда в инфрачервения спектър (фиг.21).

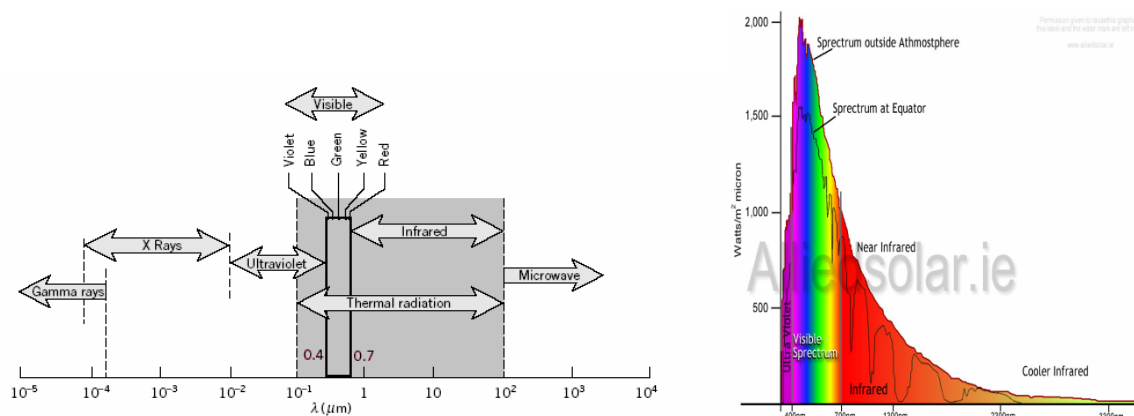
Топлинното излъчване включва:

- Ултравиолетова област: 0,1 – 0,4 μm ;
- Видимата област: 0,4 – 0,7 μm ;
- Инфрачервената област: 0,7 – 100 μm .

Излъчената от слънцето енергия е в топлинния спектър и е в границите 0.3 μm - 3 μm (Gordon 2001; ASHRAE 2005). Тя включва:

- 5% ултравиолетова радиация (0.3 $\mu\text{m} < \lambda < 0.4 \mu\text{m}$);
- 40% видима радиация (0.4 $\mu\text{m} < \lambda < 0.7 \mu\text{m}$);
- 55% инфрачервена радиация (0.7 $\mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$).

Отделните елементи на прозоречната система поглъчат частично слънчевата енергия и я излъчват в инфрачервената област на топлинното излъчване.



Фиг. 21: Спектър на топлинното и на слънчевото излъчване

Важна характеристика за радиационния топлообмен е степента на чернота, което показва колко пъти излъчването на сивите тела е по - малко от излъчването на обсолютно черно тяло. Плътността на топлинния поток чрез излъчване между две тела с различна температура е:

$$\dot{q} = \varepsilon_{np} \cdot C_s \cdot \varphi_{1,2} \cdot \left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right], \quad W / m^2 \quad (3)$$

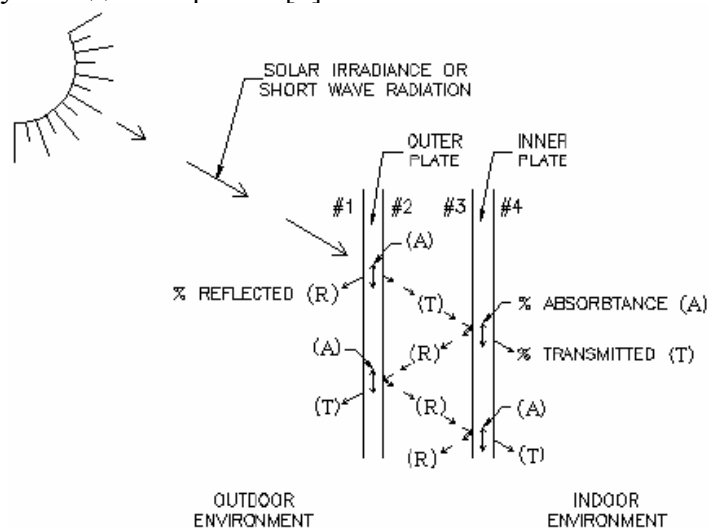
където:

ε_{np} - приведена степен на чернота – зависи от взаимното разположение на повърхностите в пространството;

C_s - константа на Ст. Болцмант;

$\varphi_{1,2}$ - ъглов коефициент.

Когато системата включва стъклопакет с две или повече стъкла, математическото описание на разпределената погълната, отразена и пропусната слънчева енергия в системата (ray tracing) се определя съгласно стандартизирани техники за изчисление [ISO 15099]. Погълнатата от елементите на прозоречната система слънчева енергия се предава чрез излъчване в инфрачервения спектър, чрез конвективен топлообмен и топлопроводност. Сложният процес на поглъщане, отражение и преминаване на слънчевите лъчи е известен като **Ray tracing** и е унагледен на фиг. 22[8].



Фиг. 22 Процес на поглъщане, отражение и преминаване на слънчевите лъчи

Погълнатата, отразена и пропусната енергия за отделните стъклени листа в прозоречната система се определя чрез сумарните оптични свойства, получени при сумиране на частично погълнатите, отразени и преминали лъчи, които се явяват членове на геометрична прогресия.

Сумарна поглъщателна способност на стъклен лист 1

$$\hat{A}_1^f = A_1^f + \frac{T_1 R_2^f \cdot A_1^b}{1 - R_1^b \cdot R_2^f} \quad (4)$$

Сумарна поглъщателна способност на стъклен лист 2

$$\hat{A}_2^f = \frac{T_1 \cdot A_2^f}{1 - R_1^b \cdot R_2^f} \quad (5)$$

Сумарна пропускателна способност на системата от 2 стъкла.

$$T_{12} = \frac{T_1 \cdot T_2}{1 - R_1^b \cdot R_2^f} \quad (6)$$

където:

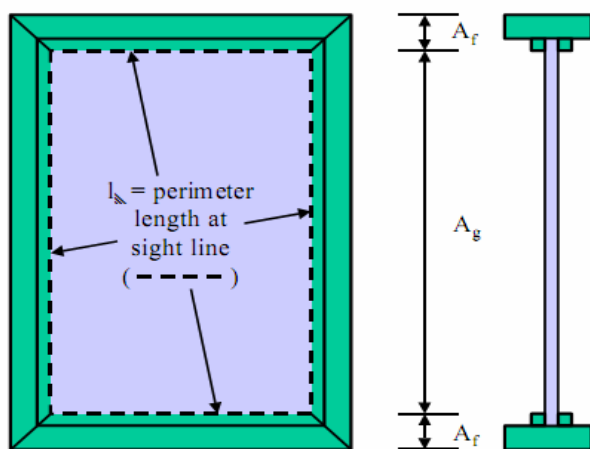
A^f , R^f , R^b , T - са съответно поглъщателната, отражателната способност на стъклата от към страната поглъщаща слънчевите лъчи.

5. Енергийни характеристики на прозорците

Основната цел на прозорците е да пропускат слънчевата енергия, за да се намалят разходите за осветление и отопление през студените периоди на годината. Но тази слънчева енергия води до повишаване на температурата в помещението и съответно до по-високи разходи за климатизация през лятото, което налага прецизен подбор на прозоречната система в зависимост от климатичните условия, предназначението на сградата и ориентацията на фасадите. При този процес е важно да се подберат стъкла (стъклопакети) с подходящи покрития на стъклените повърхности, рамка и каса с високо съпротивление на топлопреминаване.

Основните енергийни характеристики, които се взимат под внимание при определяне на топлопритоците и топлинните загуби през прозорците са коефициентът на топлопреминаване – U , [$W/m^2.K$], g – действителен коефициент на сумарна пропускливост на слънчевата енергия [%], и възможността за инфилтрация на въздух от околната среда към помещението или обратно, която зависи от уплътнителните системи на дограмата.

• U - фактор - общият коефициент на топлопреминаване [9], който дава количеството топлина, преминаващо за единица време през един квадратен метър от конструкцията на прозоречната система от горещата към студената среда, при температурна разлика между средите 1 K.



Фиг. 23 Обща схема на прозоречна система

Коефициентът на топлопреминаване е основна величина, използвана за определяне на топлопритоците през прозоречната система. Колкото е по-ниска U -стойността, толкова по-висока е изолационна способност. В съответствие със стандарта ISO 10077-1, коефициентът на топлопреминаване на прозорец може да бъде изчислена по формулата:

$$U_w = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f + \sum l_g \psi_g}{\sum A_g + \sum A_f} \quad (7)$$

където

U_f – стойност на коефициента на топлопреминаване на рамката [W/m^2K]

U_g – стойност на коефициента на топлопреминаване на стъклата [W/m^2K]

ψ_g – линеен коефициент на топлопреминаване, отразяващ влиянието на топлинното взаимодействие между стъклата и рамката [W/mK]

A_f – площ на рамката, $[m^2]$

A_g – площ на стъклото, $[m^2]$

l_g – реален периметър на стъклото, $[m]$

При стационарни условия и допускане, че топлинният поток се предава само в посока, перпендикулярна на фасадата, и при известни температури на външните и вътрешните повърхности, коефициентът на топлопреминаване може да се определи от приложението на закона за запазване на енергията:

$$\dot{Q}_f = U_f (T_{in} - T_{out}) F_f^{av} = h_{out} (T_1 - T_{out}) F_f^{out} = h_{in} (T_{in} - T_4) F_f^{in} \quad W \quad (8)$$

Където: $F_f^{av}, F_f^{out}, F_f^{in}$ за площите на средногеометричната, вътрешната и външната повърхност на рамката. Ако вътрешните и външните повърхности на рамката са равни, може да бъде използвана зависимостта за плътността на топлинния поток:

$$\dot{q}_f = U_f (T_{in} - T_{out}) = h_{out} (T_1 - T_{out}) = h_{in} (T_{in} - T_4) \quad W / m^2 \quad (9)$$

Аналогично може да бъде определен и коефициентът на топлопреминаване на стъклопакета при приемането, че вътрешните и външните повърхности на стъклата са равни:

$$\dot{q}_g = U_g (T_{in} - T_{out}) = h_{out} (T_1 - T_{out}) = h_{in} (T_{in} - T_4) \quad W / m^2 \quad (10)$$

В горните изрази коефициентите на топлопредаване от външните повърхности на прозореца към околната среда h_{out} и от помещението към вътрешните повърхности h_{in} включват топлопредаването чрез конвекция и излъчване:

$$h_{out} = h_{out}^c + h_{out}^r \quad \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (11)$$

и

$$h_{in} = h_{in}^c + h_{in}^r \quad \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (12)$$

където коефициентите на топлопредаване чрез излъчване h_{in}^r и h_{out}^r се изчисляват чрез степента на чернота, температурата на повърхността и температурата на околната среда:

$$h_{in}^r = \frac{\varepsilon C_s \left(\left(\frac{T_{in}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right)}{T_{in} - T_s} \quad (13)$$

$$h_{out}^r = \frac{\varepsilon C_s \left(\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{out}}{100} \right)^4 \right)}{T_s - T_{out}} \quad (14)$$

Определянето на температурата на външната околна среда е обяснено в експерименталната част на дипломната работа.

- g - фактор - коефициент на сумарна пропускливост на слънчевата енергия (соларен фактор). Включва директно преминалата топлинна слънчева енергия плюс частта от нея, погълната от стъклата и отдадена към помещението с излъчване и конвекция.

Коефициентът на сумарна пропускливост на слънчевата енергия g се определя съгласно

$$g = F_w \cdot g_{gl,n} \cdot (1 - F_F) \quad (15)$$

където:

F_w – коригиращ фактор вследствие неперпендикулярност на лъчението; $F_w = 0,90$;

$g_{gl,n}$ - действителен коефициент на сумарна пропускливост на слънчевата енергия при перпендикулярно лъчение. За широко използваните в националния сграден фонд системи се приема: двойно остъкляване $g_{gl,n} = 0,75$, еднослойно $g_{gl,n} = 0,85$, стъклопакет $g_{gl,n} = 0,67$.

F_F – фактор на рамката.

6. Поведение на прозоречните структури под механично натоварване.

Важно за прозоречните системи е да бъдат надеждни и с дълъг жизнен цикъл. Надеждността и дълготрайността зависят от поведението на прозорците под механично натоварване, което може да бъде външно, вътрешно и комбинация между двете.

Външните натоварвания включват:

- натоварване от вятър;
- натоварване от удар;
- звуково натоварване;
- топлинно натоварване;
- статични товарвания и др.

Вътрешните натоварвания възникват при дограма със стъклопакети вследствие на разлики между налягането в херметизираното газово пространство и наляганията на външната околна и вътрешната (на помещението) среда.

Тези разлики се дължат на промени в метеорологичното налягане, промени в надморската височина, на която е монтиран прозореца и промени на температурата на газа в херметизираното газово пространство спрямо тези при процеса на херметизация:

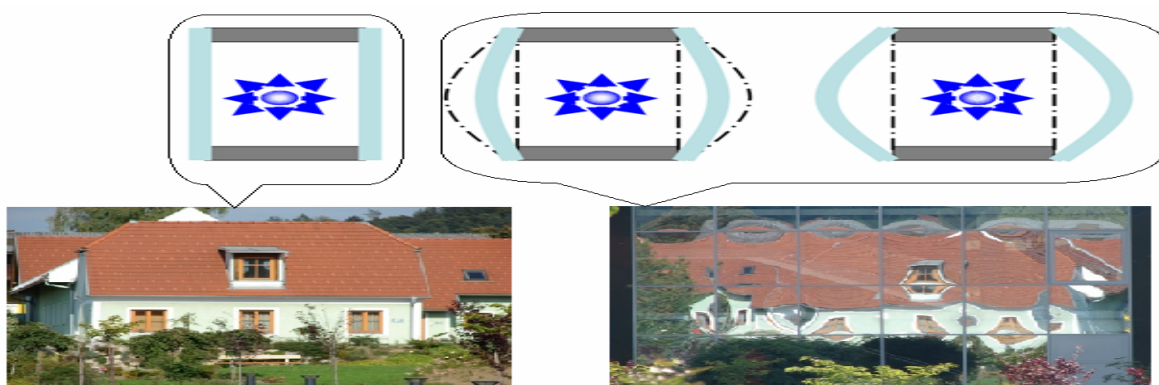
$$\Delta P_{is} = C_1 \cdot \Delta T - \Delta P_{met} + C_2 \cdot \Delta H \quad (16)$$

където: $C_1 = 0,34$ [kPa/K] $C_2 = 0,012$ [kPa/m]

ΔT - изменението на температурата на газа в стъклопакета, [K];

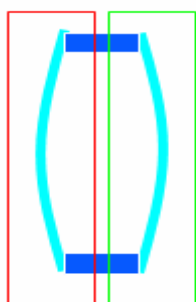
ΔP_{met} - изменение на атмосферното налягане, [Pa];

ΔH - изменение на надморската височина, [m];

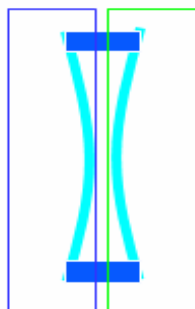


Фиг. 24 Изглед на сграда и отражение на сградата в деформирана стъклена фасада

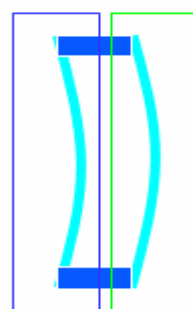
На долните фигури е представена деформацията на стъклопакети вследствие на вътрешно натоварване при различни условия:



Фиг. 25 Летни условия



Фиг. 26 Зимни условия



Фиг. 27 При наличие на вятър

Изменението на температурата на газа спрямо температурата по време на процеса на херметизация на стъклопакетите се дължи на топлинното натоварване на прозорците и фасадите. Топлинното натоварване води и до неравномерно температурно поле в отделните елементи на дограмата, температурни градиенти в твърдите тела, които са с различен коефициент на температурно разширение и съответно до възникване на температурните напрежения [8].

Те опростено могат да се изчислят по формулата

$$\sigma = \alpha_T \cdot E \cdot (T_C - T_P) \quad (17)$$

където:

α_T - коефициент на линейно напрежение, K^{-1}

E - модул на еластичност, N/m^2

T_C - температура на центъра на стъклото, K

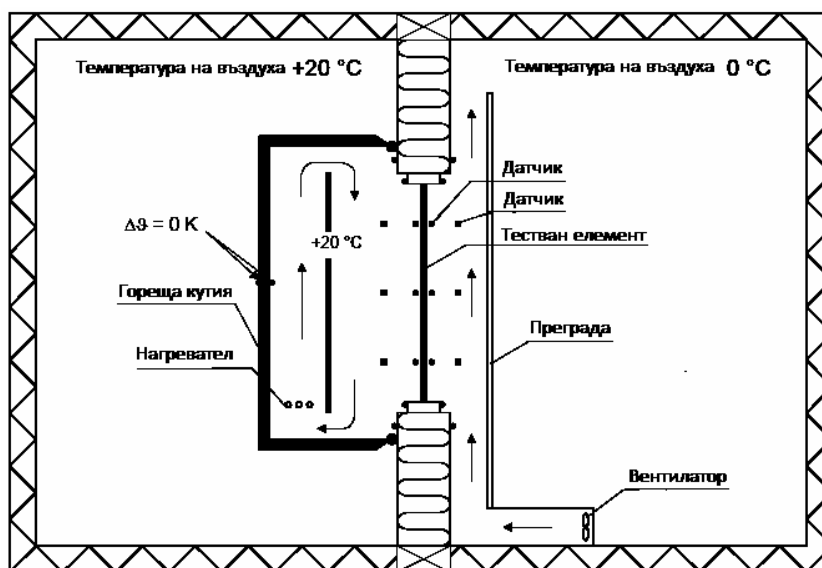
T_P - температура на периметъра на стъклото, K

За да бъде оценено поведението на прозоречните системи при външни и вътрешни натоварвания е необходимо да бъде проведен анализ на топлообмена и на температурното поле в отделните елементи на дограмата.

Литературното проучване показва, че понастоящем се работи върху комплексни задачи, включващи съвместното числено симулиране на топлообмена, механичните процеси и полета в прозоречните системи. Публикувани са резултати относно термомеханичните полета и процеси за стъклопакети и прозорци, като при последните задачите са решени двумерно (2D). Триизмерното им решаване води до необходимост от значителни компютърни ресурси и машинно време.

7. Експериментално тестване на PVC дограмата и на нейните елементи

- **Коефициент на топлопреминаване** – определя се по метода на „горещата кутия“ [10]. Методът се свежда до определяне на топлинното съпротивление R на прозоречната система (реципрочно на коефициента на топлопреминаване) при условия на топлообмен през нея между среди с температури $20^\circ C$ и $0^\circ C$.



Фиг. 28 Схема на опитна инсталация тип „гореща кутия“.

Подаването на топлина в „горещата“ камера на инсталацията се контролира така, че температурата да е еднаква с заобикалящото помещение. При поддържаните температури m/y

двете среди се подава топлина от електрически нагреватели, за която се счита, че преминава от горещата към студената камера само през тествания прозорец. Коефициентът на топлопреминаване и топлинното съпротивление се изчисляват на базата на измерената температурна разлика между двете среди и плътността на топлинния поток през прозореца, определен на базата на отделената от нагревателите мощност:

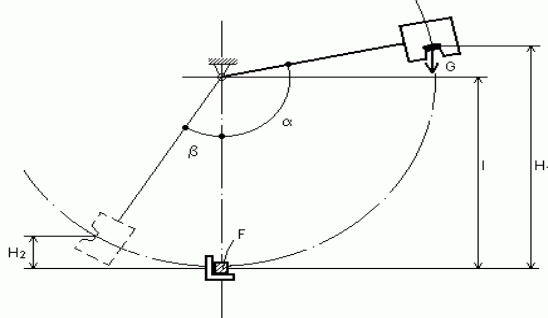
$$\dot{q} = U \cdot (\Delta t) = \frac{\Delta t}{R} \quad W / m^2 \quad (18)$$

- **Коефициент на сумарна пропускливост на слънчевата енергия** – състои се в измерване на слънчевата пропускливост с помоща на пиранометър при стандартни тестови условия. Това е сензор, който измерва плътността на топлинния поток [11].
- **Отклонения в геометричните размери чрез сканиране**
- **Определяне на якост на удар с падаща тежест**
- **Сила на разцепване на заварени съединения от профили** – тества се якостта на връзката, която се прави при заваряване на профилите на дограмата [12]. Заваряването се осъществява чрез контактно нагряване и последващо притискане.



Фиг. 29 Видове дефекти на профилите

- **Степен на белота и блясък** – изпитването се провежда само за бели профили.
- **Изкуствено стареене под въздействие на ксенонов източник на светлина** – определя се намаляването на повърхностната твърдост и промяната на цвета след определен период от време.
- **Определяне на индекс на стопилка по масата и индекса на стопилка по обем на термопласти с електронен реометър**
- **Якост на удар, инструментално изпитване с чук на Шарпу** – изследва се ударната жилавост на материалите, което се извършва с чук закачен на негъвкаво рамо (махало) [13]. Намиращото се в начално статично състояние махало се освобождава и огъваният нож нанася удар, като деформира и разрушава пробното тяло. Махалото изминава още кратък път и постепенно преустановява движението си. Изследваното тяло се разрушава и по отклонението на чука след разрушаването на тялото се съди за неговата ударна жилавост.



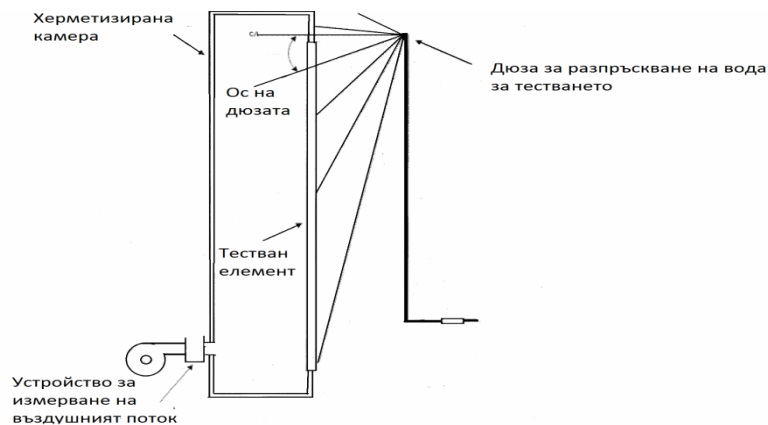
Фиг. 30 Схема на изследването „чук на Шарпи“

H_1 и H_2 са височините на повдигане на махалото, G – масата на махалото, l – дължина на лоста, α, β – ъгълът на отклонение преди и след удара

- **Въздухопроницаемост** – изследва се количеството въздух, което преминава за определено време, при стандартна разлика в наляганията от двете страни на дограмата.

- **Водонепропускливост**

Водата се разпръсква върху тествания елемент. Водната струя продължава като се увеличава налягането в следната последователност: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 450 и 600 Pa. Всеки етап се провежда за 5 min. Ъгълът на разпръскване на дюзите е 120° , работно налягане 2 - 3 бара, а дебита - 2 l/min. Дюзите са разположени на 400 mm по оста на лентата, страничното разстояние между ръбовете е от 50 – 250 mm [14].



Фиг. 31 Схема на тестването "Водонепропускливост"

- **Устойчивост на вятър** – изследват се деформациите, които се получават при натоварване от вятър при три различни стандартизирани натоварвания.

- **Звукоизолация.**

Изводи от теоретичната част:

1. Съвременните прозоречни системи са в непрекъснат процес на усъвършенстване, свеждащ се до подобряване на конструкционното им оформление и на материалите, от които са изградени основните им елементи. Целта на тези подобрения е повишаване на топлоизолационната им способност, уплътняемостта, надеждността и дълготрайността им.
2. Основните характеристики на прозоречните системи, важни за енергийната ефективност, надеждността и комфорта в сградите се определят чрез стандартизирани методи при определени (стандартизирани условия). В процеса на експлоатацията на прозорците те са подложени на комбинации от топлинни и механични натоварвания, които са различни от тестовите.
3. Математичното моделиране и компютърната симулация са удобни варианти за предсказване на термо-механичното поведение на прозоречните системи при различни експлоатационни и при стандартни тестови условия.

Целта на настоящата работа е да бъде анализирано и оценено влиянието на свойствата на конструкционните полимерни материали върху енергийните характеристики, топлинните и механичните процеси при многокамерни прозоречни системи със стъклопакети.

За постигане на целта на дипломната работа бяха поставени за решаване следните задачи:

1. Формулиране на концепция за моделни изследвания на топлинните, хидродинамичните процеси и коефициентите на топлопреминаване при избрани

типове многокамерни прозоречни системи със стъклопакети. Съставяне на математични модели на процесите.

2. Анализ на топлофизичните свойства на PVC материалите и на границите на варирането им.
3. Изграждане на геометричен модел и елементна мрежа на многокамерна прозоречна система.
4. Числени симулации на топлинните и хидродинамичните полета на прозоречната система при вариране на топлофизичните свойства на елементите от PVC.
5. Анализ на топлинните полета и определяне на коефициента на топлопреминаване на изследваните варианти.
6. Оценка на влиянието на температурните полета в прозоречната система върху вътрешното натоварване на стъклопакетите.

III. Експериментална част

1. Математичен модел на топло- и хидродинамичните процеси в прозорените системи

1.1 Основни уравнения

За детайлно описание на температурното поле в твърдите части на прозоречната система и на температурното, скоростно поле, и разпределението на налягането в газовото пространство на стъклопакета, е необходимо за триизмерен геометричен модел, разбит на мрежа от крайни елементи, да се реши долната система уравнения при гранични условия, описващи топлообмена между външните и вътрешните повърхности на прозореца и съответно околната среда, и помещението.

Флуидно пространство (херметизирано газово пространство на стъклопакета и камерите):

- уравнение за непрекъснатост;
- уравнения на движението;
- енергийно уравнение;
- κ - ε модел на турбулентност;
- модел на топлинен и динамичен граничен слой;

Нефлуидна среда (стъкла, дистанционер, рамка, метални елементи и др.):

- енергийно уравнение (уравнението на топлопроводността при нулеви скорости $V=0$).

От литературата са известни моделни изследвания, при които газовете в херметизираните газови пространства в дограмата (в стъклопакета и в камерите), се разглеждат като неподвижни среди [15], [21]. В тези случаи конвективния топлообмен при свободното му движение на газовете и радиационния топлообмен между ограничаващите го повърхности с различна температура се моделират чрез въвеждане еквивалентен коефициент на топлопроводност $K_{екв}$ на газовете. Той включва молекулярния коефициент на топлопроводност, съставка, отразяваща конвективния топлообмен, която се определя съгласно теорията на подобие и критериални уравнения и част, отразяваща радиационния топлообмен между твърдите повърхности през прозрачната газова среда. За точното определяне на $K_{екв}$ се налага провеждането на итерационни процедури, включващи изчисление на температурното разпределение на дограмата и на конвективната, и радиационната съставка на еквивалентния коефициент на топлопроводност.

• Уравнение за непрекъснатостта:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

Изменението на плътността с времето може да бъде изразено като функция на налягането:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial \tau} \quad (20)$$

При свиваеми флуиди производната на плътността по отношение на налягането се извежда от уравнението на състоянието. Например при идеален газ:

$$\rho = \frac{p}{RT} \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{1}{RT} \quad (21)$$

• Уравнения за движението

Уравнения за движението на реалните флуиди могат да се получат, като се излезе от закона за запазване на количеството на движение или от втория принцип на Нютон. За ламинарни течения на Нютонови флуиди са получени независимо един от друг от Навие

(1827), и от Стокс (1845). В Декартова координатна система уравненията на движението могат да бъдат представени в общ вид (Навие-Стокс), в сила и за ламинарни и за турбулентни течения. При турбулентните течения те са получени чрез преобразуване на Рейнолдсовите уравнения за турбулентните движения [16], преобразувани съгласно хипотезите на Прандтл и Бусинеск:

$$\frac{\partial \rho \cdot \bar{V}_x}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho \cdot \bar{V}_x \cdot \bar{V}_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \cdot \bar{V}_y \cdot \bar{V}_x)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho \cdot \bar{V}_z \cdot \bar{V}_x)}{\partial z} = \rho \cdot g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \quad (22)$$

$$+ R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial \rho \cdot \bar{V}_y}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho \cdot \bar{V}_x \cdot \bar{V}_y)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \cdot \bar{V}_y \cdot \bar{V}_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho \cdot \bar{V}_z \cdot \bar{V}_y)}{\partial z} = \rho \cdot g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \quad (23)$$

$$+ R_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial \rho \cdot \bar{V}_z}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho \cdot \bar{V}_x \cdot \bar{V}_z)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \cdot \bar{V}_y \cdot \bar{V}_z)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho \cdot \bar{V}_z \cdot \bar{V}_z)}{\partial z} = \rho \cdot g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \quad (24)$$

$$+ R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial z} \right)$$

където:

g_x, g_y, g_z – компоненти на вектора на земното ускорение

μ_e - ефективен динамичен вискозитет: $\mu_e = \mu + \mu_t$

При ламинарни течения ефективният вискозитет е равен на молекулярния. Турбулентният вискозитет μ_t се определя чрез модел на турбулентност.

• Закон за запазване на енергията (ЗЗЕ)

ЗЗЕ е математичен израз на първи принцип на термодинамиката. За несвиваеми флуиди може да се запише чрез израза:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T_0) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho V_x c_p T_0) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho V_y c_p T_0) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho V_z c_p T_0) = \quad (25)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_e \frac{\partial T_0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_e \frac{\partial T_0}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_e \frac{\partial T_0}{\partial z} \right) + \dot{q}_v$$

където c_p е специфичен топлинен капацитет, T_0 - термодинамична температура при нулева скорост на флуида (total (stagnation) temperature), K_e - ефективен коефициент на топлопроводност: $K_e = K + K_t$, $\dot{q}_v$ - обемен източник на топлина.

При $V=0$ (нефлуидна среда на твъргите елементи от прозоречната система) ЗЗЕ преминава в уравнение на топлопроводността:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_v \quad (26)$$

Обемният източник на топлина може да бъде използван за моделиране на погълнатата от отделните стъклени листа на стъклопакета слънчева енергия, която се излъчва от тях в инфрачервения дълговълнов спектър:

$$\dot{q}_v = \frac{S_i}{l_i} = \frac{\hat{A}_i q_{sj}}{l_i} \quad (27)$$

За непрозрачните елементи на системата той се приема за 0.

- **Стандартен k-ε модел на турбулентност**

Моделът на турбулентност е една от най-важните съставни части на математичната постановка на задачите, свързани с турбулентното движение и топлообмена. Понятието “модел на турбулентност” означава съвкупността от емпирични и аналитични съотношения, които е необходимо да се внесат като допълнение към осреднените във времето Рейнолдсови уравнения на движението и енергията в системата, за да може тя да се реши. Счита се, че колкото повече диференциални уравнения са използвани при построяването на модела на турбулентност, толкова по-универсален е той. Но по-голям брой уравнения изисква съответно голям брой експериментални данни за моделиране на членовете, влизащи в уравненията като характеристики на турбулентност.

В настоящата работа е избран стандартен k-ε турбулентен модел, охарактеризиран в специализираната литература като най-използвания и универсален модел за моделиране на турбулентни течения:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho \cdot V_x \cdot k)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \cdot V_y \cdot k)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho \cdot V_z \cdot k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \mu_t \Phi - \rho \cdot \epsilon + \frac{C_4 \cdot \beta \cdot \mu_t}{\sigma_t} \cdot \left(g_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (28)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho \cdot V_x \cdot \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \cdot V_y \cdot \epsilon)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho \cdot V_z \cdot \epsilon)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + C_{1\epsilon} \mu_t \cdot \frac{\epsilon}{k} \cdot \Phi - C_{2\rho} \rho \cdot \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{C_\mu \cdot (1 - C_3) \cdot \beta \cdot \mu_t \cdot \rho}{\sigma_t} \cdot \left(g_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (29)$$

$$\text{като: } \mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (30)$$

$$K_t = \frac{\mu_t \cdot C_p}{\sigma_t}; \quad (31)$$

В горните уравнения C_μ е константа на турбулентност; k - турбулентна кинетична енергия; ϵ - скорост на дисипация на турбулентната кинетична енергия; σ_k , σ_ϵ – съответно критерии на Шмид за турбулентната кинетична енергия, скоростта на нейната дисипация, σ_t - турбулентен критерии на Прандтл (Шмид).

Настоящите изследвания са проведени при $C_\mu = 0,09$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\epsilon = 1,3$; $\sigma_t = 1$; $C_3 = 1$; $C_4 = 0$; $\beta = 0$.

- **Модел на граничен слой**

При теченията на реалните флуиди вследствие на свойствата им полепваемост и вътрешно триене в непосредствена близост до обтечени стени, в тясна област, наречена граничен слой, скоростта намалява бързо от стойността си в потенциалното течение до стойност нула при стените (ако те са неподвижни). Турбулентният граничен слой може да се раздели условно на две основни области – **ламинарен (вискозен) подслой** с почти линейно разпределение на скоростта, в който се проявяват вискозните сили на триене, и **турбулентен подслой**, с преобладаващо действие на турбулентните напрежения. Между тези две области е разположена сравнително тънка преходна област, наречена “**буферна зона**”, в която ламинарното течение се нарушава и се наблюдава интензивно генериране на турбулентност.

Граничен слой, характеризиращ се с голям напречен градиент на надлъжните компоненти на скоростта, се нарича **динамичен**. **Дебелина на граничния слой** се нарича условна величина, определена като разстояние по нормалата на стената, на която надлъжните

компоненти на скоростта нарастват от нула на повърхността на стената, до големина, равна на големината на скоростта на несмутения поток.

Изследванията показват, че интензивен пренос на топлина между твърдото тяло и умиващия го флуид се осъществява в тънък слой, прилепващ по повърхността на тялото. Този слой се нарича **топлинен граничен слой** и се характеризира с голям градиент на температурата, под действието на който се осъществява напречен пренос на топлина. Температурното разпределение в него се определя от уравнението на топлинния граничен слой, получено след преобразуване на закона за запазване на енергията.

При съвместното решаване на уравненията на непрекъснатостта, енергията, движението модела на турбулентност и модел на граничния слой се определят скоростното и температурното разпределение в граничния слой, напреженията на триене на стената, пристенните турбулентни параметри на потока, топлинния поток към стената и коефициента на топлоотдаване флуид- стена.

В настоящата работа за изчисление на величините в динамичния граничен слой в газовото пространство е използван метод на Ван Дрийст, като в граничните крайни елементи тангенциалните пристенни напрежения при известни стойности на $\bar{V}_{\tan}$ на разстояние δ от стената се определят съгласно логаритмичната зависимост:

$$\frac{\bar{V}_{\tan}}{\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}} = \frac{1}{k} \cdot \ln \left[\frac{E \cdot \delta}{\nu} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \right] \quad (32)$$

където: $\kappa=0,4$; $E=9,0$ (за гладка стена).

От напрежението на триене се определя пристенния турбулентен вискозитет:

$$\mu_w = \delta \cdot \frac{\tau}{\bar{V}_{\tan}} \quad (33)$$

В близост до стената турбулентната кинетична енергия κ_w се определя непосредствено от κ - ε модела. Пристенната скорост на дисипация на турбулентна кинетична енергия ε_w се определя от формулата:

$$\varepsilon_w = \frac{C_{\mu}^{0.75} \cdot \kappa_w^{1.5}}{k \cdot \delta}; \quad (34)$$

Радиационен топлообмен през прозрачна газова среда в затворената система, ограничена от вътрешните повърхности на стъклата и дистанционерите.

Повърхностите, ограничаващи газовата среда са с различни температури, вследствие на което топлообменят чрез излъчване помежду си. Газовете в херметизираното пространство не участват в този процес, тъй като те са прозрачни за топлинното излъчване.

При моделирането на този процес се изчислява радиационния топлообмен между отделните елементи на дискретизирани повърхности на затворената система, ограничаваща газовата среда в стъклопакета:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - F_{ji} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \frac{1}{A_i} \dot{Q}_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - F_{ji}) \sigma T_i^4 \quad (35)$$

При тези изчисления се отчитат ъгловите коефициенти между отделните повърхности на крайните елементи. Тази задача се решава успешно по **Hemicube method в средата на ANSYS**. Процесът на изчисляване на радиационния топлообмен се реализира чрез Radiosity solver method (ANSYS) и се провежда успоредно с решаването на основната система уравнения по метода на крайните елементи.

1.2. Условия на еднозначност

- **Геометрични условия** - свеждат се до построяването на геометрията на прозоречната система. Съвременните компютърни системи позволяват моделирането на триизмерните полета и процеси при прецизно отчитане на 3D конструкцията на прозорците.

- **Физични условия (свойства на материалите)**

Свежда се до задаване на топлофизичните и хидродинамичните характеристики на материалите: коефициент на топлопроводност - λ , плътност - ρ , специфичен топлинен капацитет - c_p като функция на температурата и налягането или като константи.

Табл.1: Граници на варирането на топлофизичните свойства

материал	Коефициент на топлопроводност $W / m K$	Плътност kg / m^3	Специфичен топлинен капацитет J / kgK	Степен на чернота
PVC-U	0,17	1390	1500	Бял – 0,9 Сребрист– 0,26
EPDM	0,25	1150	2000	0,8
Стомана	60,5	7800	466	0,8
Алуминий	160	2800	900	0,06
Аргон	0,017	1,65	520	-
Въздух	0,026	1,29	1000	-
Силикагел	0,198	2100	921	0,7
Стъкло	1,00	2500	840	Безцветно стъкло без покритие – 0,84 Безцветно стъкло с нискоемисионно покритие – 0,03

Стойностите на вискозитета и топлофизичните характеристики за газовете в горната таблица са приблизителни. Те могат да бъдат прецизно определени като функция на температурата от зависимостите за идеални газове.

Въздух:

$$\mu = 17,1 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{T}{T_o} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{T_o + 89,77}{T + 89,77} \right) \quad (36)$$

$$K = 0,02454 \cdot \left(\frac{T}{T_o} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{T_o + 147,7}{T + 147,7} \right) \quad (37)$$

$$\rho = 1,293 \cdot \frac{p}{T} \cdot \frac{273,15}{101325} \quad (38)$$

Аргон:

$$\mu = 13,61 \cdot 10^{-7} \cdot (T)^{1,5} \left(\frac{141,54}{T + 140,54} \right) \quad (39)$$

$$K = 1,01634 \cdot 10^{-5} \cdot (T)^{1,5} \left(\frac{151,12}{T + 150,12} \right) \quad (40)$$

$$\rho = 1,786 \cdot \frac{p}{T} \cdot \frac{273,15}{101325} \quad (41)$$

Литературното проучване на топлофизичните свойства на полимерните материали не варират извън рамките на 10 %, тъй като структурата и химичният състав на самите материали не варират. Изключение прави степента на чернота на PVC материала, която варира в големи граници:

Таблица 2 Степен на чернота на различни по цвetoва гама на PVC материал [17].

ЦВЯТ	степен на чернота
Paint: Acme, quality spray enamel, #801 brilliant black	0.945
Paint: Aquadag, 4 coats on copper aluminum	0.490
Paint: aluminum	0.450
Paint: Broma, alkyd enamel #113 light blue	0.95
Paint: Broma, alkyd enamel #113 light blue	0.960
Paint: Broma, alkyd enamel #102, gold leaf	0.98
Paint: Broma, alkyd enamel #102, gold leaf	0.98
Paint: cadmium yellow	0.33
Paint: chrome green	0.70
Paint: Chromatone stabilized silver finish (Alumatone)	0.26
Paint: TiO ₂ , white	0.940

- Гранични условия

Външна повърхност на рамката:

$$\dot{q}_{1f} = h_{out} (T_{out} - T) + \sigma \varepsilon_{frame} (T_{r,m}^4 - T^4) + A_{frame} q_s \quad (42)$$

В горния израз коефициентът на топлопредаване h_{out} отразява конвективния топлообмен между повърхността и средата. При използване на коефициент на топлопреминаване, включващ топлопредаването чрез конвекция и излъчване:

$$h_{out} = h_{out}^{convection} + h_{out}^{radiation} \quad (43)$$

граничното условие се модифицира във вида:

$$\dot{q}_{1f} = h_{out} \Delta T + A_{frame} q_s = h_{out} + \varepsilon_{frame} q_s \quad (44)$$

Външна повърхност на стъклото

$$\dot{q}_{1g} = h_{out} (T_{out} - T) + \sigma \varepsilon_1 (T_{r,m}^4 - T^4) \quad (45)$$

където:

$T_{r,m}$ - средна температура на околната среда. Определя се на базата на ъгловите коефициенти F1 и F2 за топлообмена чрез излъчване между външните повърхности на прозоречната система, небосвода и твърдата околна среда (сгради, почви ...).

T_{sky} - температура на небосвода. Равна е на температурата на околната среда в облачно време или се изчислява по формулата на Swinbank в ясно време:

$$T_{r,m} = (F1.T_{out}^4 + F2.T_{sky}^4)^{1/4} \quad (46)$$

$$T_{sky} = 0,0552.T_{out}^{1,5} \quad (47)$$

$$F2 = \cos(\theta / 2)^2 \quad (48)$$

$$F1 = 1 - F2$$

Вътрешни повърхности на рамката и стъклото

$$\dot{q}_4 = \sigma \varepsilon_{env} F_{env} (T_{in}^4 - T^4) + h_{in} (T_{in} - T) \quad (49)$$

където h_{in} отразява конвективния топлообмен между повърхността и средата.

Повърхности, ограничаващи херметизираното газово пространство

Те се дефинират като топлообменящи радиационна енергия повърхности, на които е необходимо да бъдат зададени степените на чернота:

$$Enclouser \text{ (затворена система)} \left\{ \begin{array}{l} \text{Surface 2 : } \varepsilon_2 \\ \text{Surface 3 : } \varepsilon_2 \\ \text{Surface 5 : } \varepsilon_2 \\ \text{Surface 6 : } \varepsilon_6 \\ \text{Surface 7 : } \varepsilon_7 \\ \text{Surface 8 : } \varepsilon_8 \end{array} \right.$$

$$V_x = V_y = V_z = 0 \quad (50)$$

Обем на стъклени листа на стъклопакета:

$$\dot{q}_{v1} = \frac{S_1}{l_1} = \frac{\hat{A}_1 \dot{q}_s}{l_1} \quad (51)$$

$$\dot{q}_{v2} = \frac{S_2}{l_2} = \frac{\hat{A}_2 \dot{q}_s}{l_2} \quad (52)$$

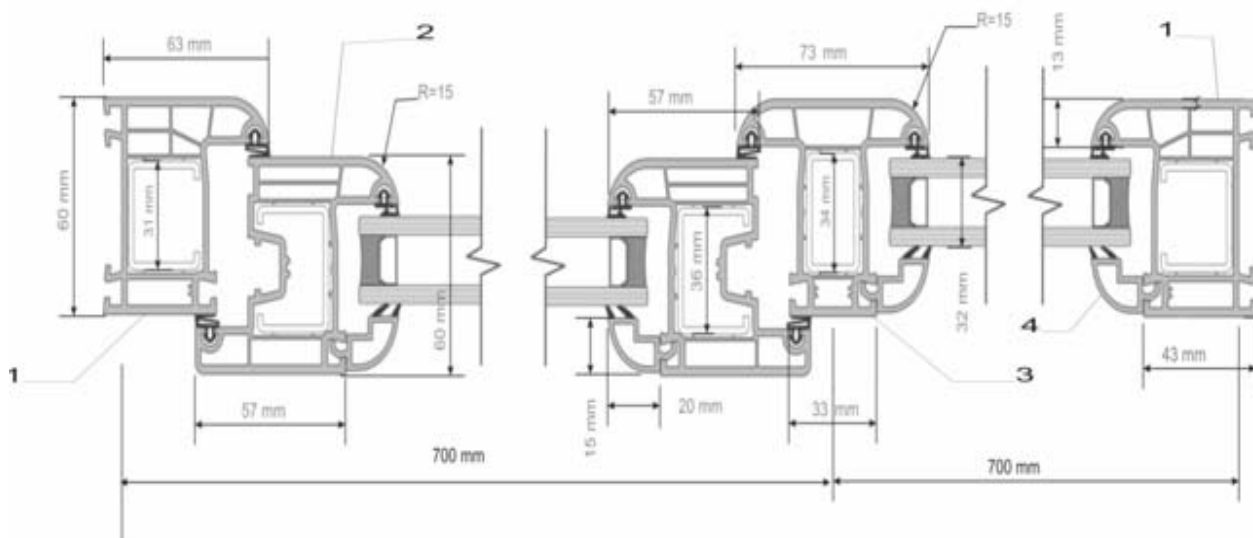
2. Числена симулация на термомеханичните процеси и полета в среда ANSYS

2.1 Обект на изследване и условия на числените експерименти

• Обект на изследване

Обект на изследване е четерикамерна PVC дограма с двоен стъклопакет, съдържаща отворяема и неотворяема част. Габаритните ѝ размери са: 1400 x 1000. Стъклопакета на отворяемата част включва стъкла с височинна - 818,7 мм, широчина - 540 мм, дебелина 4 мм, и газов слой (аргон) с дебелина - 24 мм. Стъклопакета на неотворяемата част включва стъкла с височинна - 914 мм, широчина 640 мм, дебелина - 4 мм, и газов слой (аргон) с дебелина - 24мм. Прието е, че дограмата е монтирана вертикално.

В средата на ANSYS APDL е моделирана само неотвараемата част на дограмата, която е с габаритни размери 700 x 1000.



Фиг. 28 Надлъжен хоризонтален разрез на четирикамерна система
1 – каса 2 – крило 3 – делител 4 – стъклодържател

Размерите на отделните елементи са приети съгласно технически каталог [6].

Каса

Широчина на профила – 60 мм

Височина на профила – 63 мм

Закръгление – R=15 мм

Дебелина на стените отвън на профила – 2,5 мм

Широчина на голямата камера – 36 мм

Крило

Широчина на профила – 60 мм

Височина на профила – 57 мм

Закръгление – R=15 мм

Дебелина на стените отвън на профила – 2,5 мм

Широчина на голямата камера – 36 мм

Делител

Широчина на профила отвън – 73 мм

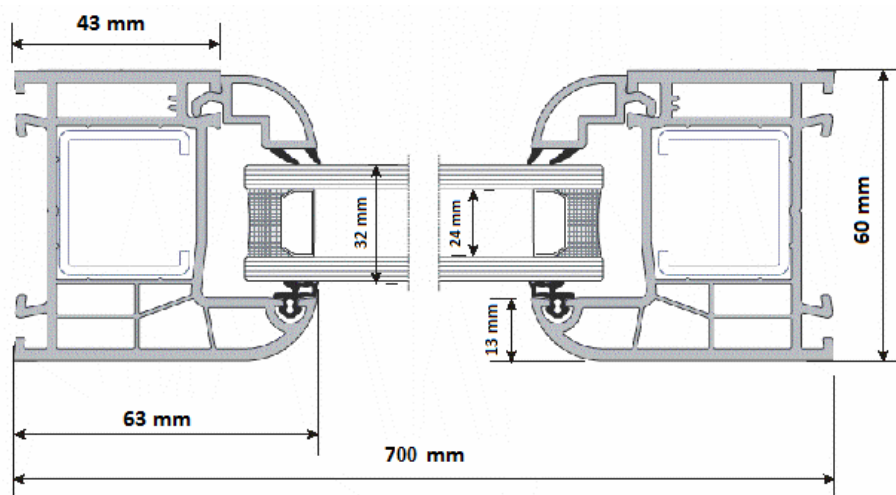
Широчина на профила отвътре – 33 мм

Широчина на голямата камера – 21 мм

Закръгление от двете страни – R=15 мм

Дебелина на стените отвън на профила – 2,5 мм

Височина на голямата камера – 34 мм



Фиг. 29 Надлъжен хоризонтален разрез на неотвараема част

• Условия на числените експерименти

Проведени са моделни изследвания при:

- условията на топлообмен в стандартната тестова камера без наличие на слънчево греене (таблица 3). При тези условия се определя коефициента на топлопреминаване U . Условията съответстват на зимните в региона на София в часовете без слънчево греене (през нощта).

- условията на топлообмен в през зимния период в региона на София в часовете със слънчево греене (през деня). При приетата температура на околната среда (3°C) и ъглови коефициенти $F_1 = F_2 = 0,5$ е определена температурата на небосвода: $t_{\text{sky}} = -10^{\circ}\text{C}$ и средната температура на околната среда при моделирането на радиационния топлообмен в инфрачервения спектър: $T_{r,m} = 270\text{ K}$. Плътността на топлинния поток е средна за деня за южно ориентирана фасада през зимните месеци.

Таблица 3 Условия на провеждане на числените експерименти

При отчитане на слънчевото греене	Без отчитане на слънчевото греене
$q_s = 350\text{ W/m}^2$	$h_{\text{out}} = 25\text{ W/(m}^2\text{K)}$
$h_{\text{out}} = 25\text{ W/(m}^2\text{K)}$	$h_{\text{in}} = 7,7\text{ W/(m}^2\text{K)}$
$h_{\text{in}} = 7,7\text{ W/(m}^2\text{K)}$	$t_{\text{out}} = 3^{\circ}\text{C}$
$t_{\text{sky}} = -10^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{in}} = 21^{\circ}\text{C}$
$t_{\text{out}} = 3^{\circ}\text{C}$	Външна повърхност $T_{r,m} = 276\text{ K}$
$t_{\text{in}} = 21^{\circ}\text{C}$	Вътрешна повърхност $T_{r,m} = 294\text{ K}$
Външна повърхност $T_{r,m} = 270\text{ K}$	
Вътрешна повърхност $T_{r,m} = 294\text{ K}$	

2.2 Изграждане на геометричен модел и мрежа от крайни елементи в среда ANSYS

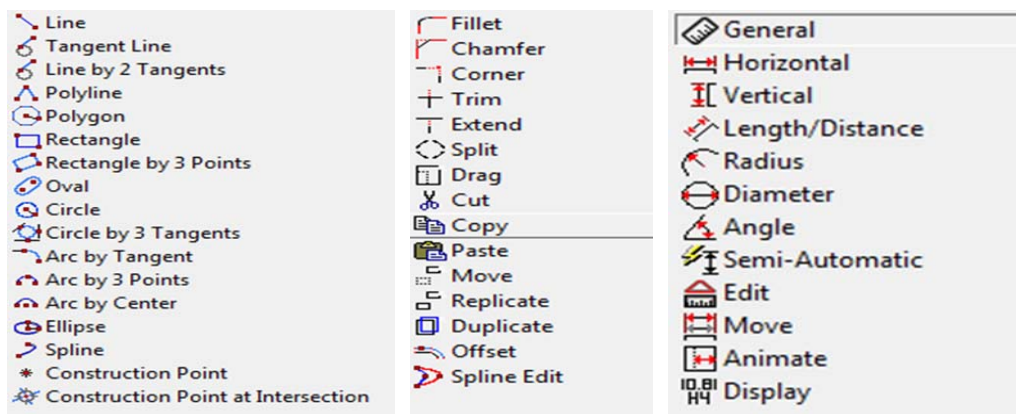
• Изграждане на геометричен модел

За изграждането на триизмерен (3D) модел е генериран 2D чертеж (Sketch). За създаването на последния за касата, крилото, делителя, уплътненията, стъклата и стъклодържателя в средата на ANSYS Workbench Design Modeler са използвани някои от основните функции (Фиг. 31) за изчертаването на скетحوвете (Фиг. 32).

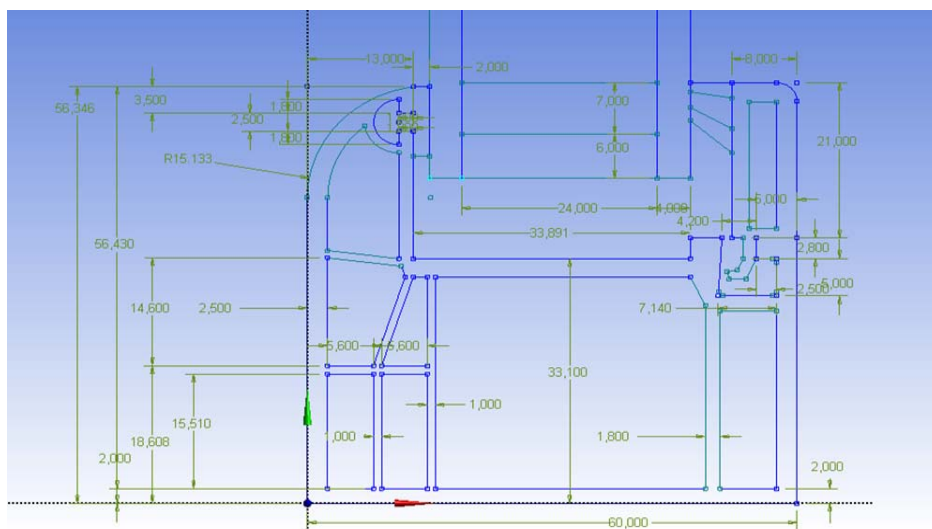
- Line – за построяване на линии;
- Rectangle – за изчертаване на правоъгълник, квадрат;
- Circle – за изчертаване на окръжност;
- Arc by 3 points – за изчертаване на дъга по 3 точки;
- Arc by centre – за изчертаване на дъга по 2 точки и център;
- Fillet – за създаване на закръгление, където е необходимо;
- Trim – за изтриване на ненужните линии;
- Move – за преместване.

За оразмеряване на чертежа се използват следните функции:

- Horizontal – за хоризонтални размери;
- Vertical – за вертикални размери;
- Length / Distance – размери под наклон;
- Radius – за радиус;
- Diameter – за диаметър;
- Angle – за ъгъл;
- General – линейни размери;
- Move – за по - голямо разстояние между размерите.

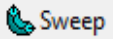


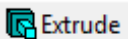
Фиг. 31 Основни функции за генериране на 2D чертеж



Фиг. 32 Сборен чертеж (Sketch).

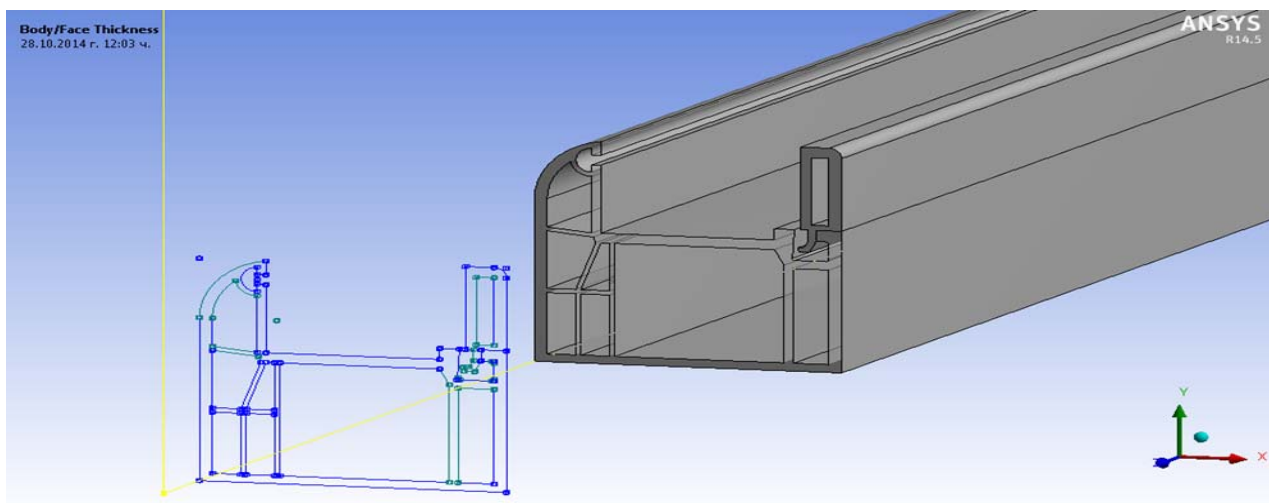
Построяването 3D геометричния модел се извършва, като се използват вече създаденият Sketch и основните функции в среда ANSYS Workbench Design Modeler, описани по-долу.

Функцията Sweep  се използва при създаване на рамката, която се състои от каса и стъклодържател (Фиг.33), крило (Фиг.35), и кухините на профилите, изпълнени с въздух.

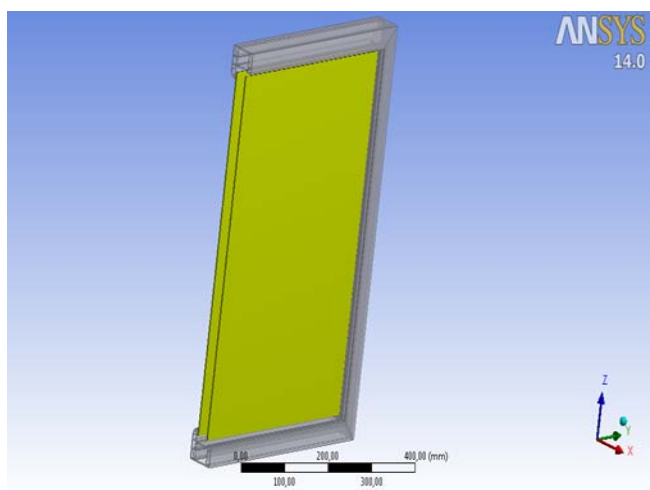
Функцията Extrude  е използвана при генериране на стъклата (Фиг.34) и херметизираното газово пространство (аргон) между тях.

Функцията Freeze  е използвана “замразяване” на телата, където е необходимо (при уплътненията, които са до касата и крилото, за въздуха в профилите) за да избегне обединяването на телата.

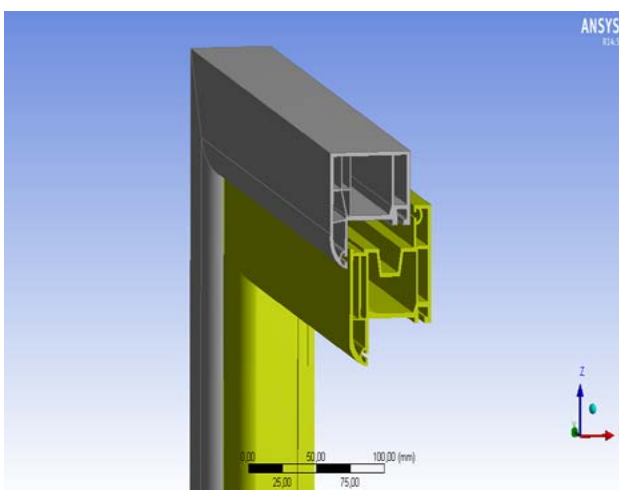
Функцията Symmetry  е използвана за разделяне на геометричния модел спрямо равнина на симетрия.



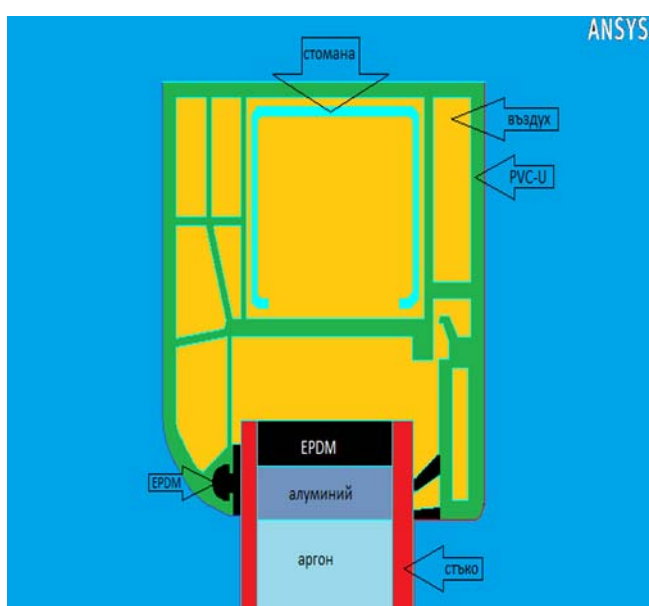
Фиг. 33 Sketch на каса и стъклодържател, използван за генериране на триизмерния модел.



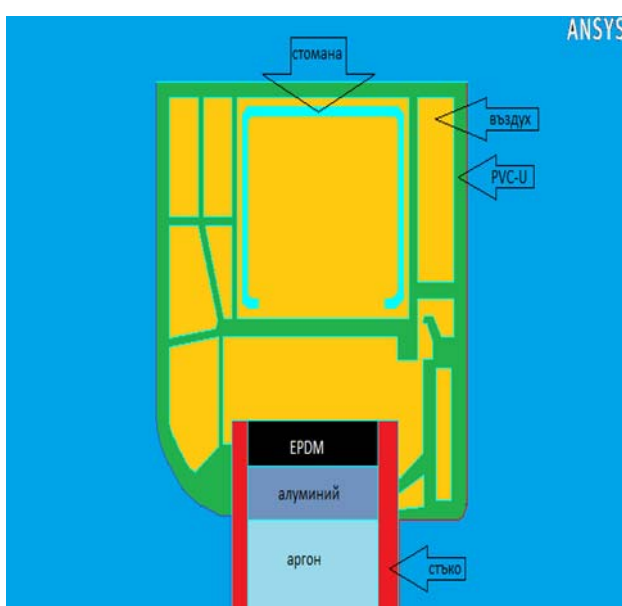
Фиг.34: Каса и стъкла



Фиг.35: Каса и крило



а)



б)

Фиг. 36 Подробен (а) и опростен (б) геометричен модел на четирикамерна дограма.

Геометричният модел, който е създаден в ANSYS Workbench Design Modeler съдържа отваряема и неотваряема част. Направени са опити да бъде направена компютърна симулация при решаване на пълната система уравнения, описващи топло- и хидродинамичните процеси при цялостната геометрия на дограмата, но предвид сложната ѝ геометрична конфигурация, изискването за фина мрежа от крайни елементи и наличните компютърни ресурси, са направени някои опростявания на модела, описани по долу.

1. При пълната конфигурация на дограмата, разделена спрямо хоризонтална равнина на симетрия, приети за неподвижни газови среди са проведени числени симулации на температурното поле при решаване на уравнението на Фурие-Кирхоф за цялата изследвана област. За целта е използван еквивалентен коефициент на топлопроводност $K_{екв}$ на газовете, приет съгласно други подобни изследвания [15],[21]. Не са проведени числени симулации на топло - хидродинамичните полета в газовата среда, тъй като при радиационен топлообмен между повърхностите в затворена система не е допустимо системата да бъде разделена спрямо граници на симетрия.
2. Пълната система уравнения, описваща топло- и хидродинамичните процеси и радиационния топлообмен в дограмата, е решена само за отваряемата част на прозореца с принадлежащата и част от касата. Опростяването е направено с цел оптимално използване на разполагаемите компютърни ресурси. За опростяване на геометрията и на изчислителната мрежа допиращите се твърдите полимерни елементи на дограмата с приблизително еднакви коефициенти на топлопроводност са обединени геометрично и е прието, че са изработени от един материал (елементите от PVC-U ($\lambda=0,17$ W/(m.K)) и EPDM ($\lambda=0,25$ W/(m.K)) са моделирани като PVC-U). Въздухът в камерите на рамката е разгледан като неподвижна среда с еквивалентен коефициент на топлопроводност $K_{екв} = 0,0958$ W/(m.K)[15], [21], а за аргона в стъклопакета е решена пълната система уравнения, с която се моделира свободното му движение и радиационния топлообмен между ограничаващите го повърхности. Еквивалентен коефициент на топлопроводност е използван и за дистанционера състоящ се от Al и силикагел ($K_{екв} = 1,1$).

• Мрежа от крайни елементи

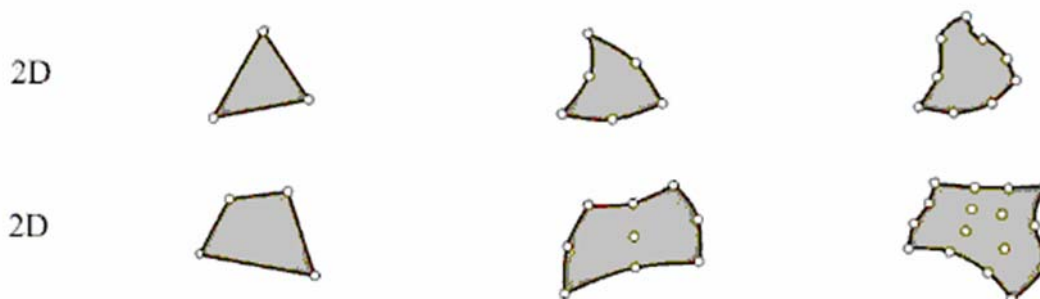
Методът на крайните елементи (МКЕ) е подходящ за решаването на широк клас полезни задачи, описващи се със сходни частни диференциални уравнения. С него могат да се изследват полета в хомогенни и нехомогенни, изотропни и анизотропни, линейни и нелинейни среди, да се решават задачи в двумерни и тримерни области, и да се анализират стационарни и нестационарни задачи. Основната идея на метода е, че всяка непрекъсната величина (температура, налягане) може да се апроксимира с дискретен модел, който се състои от множество непрекъснати функции (полиноми), определени за краен брой подобласти (крайни елементи). В рамките на всеки краен елемент се дефинират краен брой точки (възли) в които стойностите на величината са неизвестни и трябва да бъдат получени при решението на системата уравнения или уравнението, описващо процеса.

При компютърно симулиране на топлообмена през прозоречната система чрез решаването на гореописания математичен модел по МКЕ, за всеки възел от твърдата среда: профили, каса, стъкло, поддържаща и уплътнителна система се изчислява температурата, а за всеки възел от херметизираната газова среда – скорост, налягане, температура и величини, характеризиращи турбулентното движение.

Първата стъпка при решаване на задача с метода на крайните елементи (МКЕ) е дискретизацията на изследваната област. Тя включва определяне на броя, формата и размерите на крайните елементи, на които се разбива областта при долуописаните етапи[18].

- **Разбиване на изходната област на подобласти - елементи**

- триъгълници, правоъгълници – в двумерните области (2D);



Фиг. 37 Елементи в двумерната област

- тетраеди и паралелепипеди – в тримерното пространство (3D);



Фиг. 38 Елементи в тримерната област

- **Дефиниране на подходяща функция за дадената задача**

Като такава се използват полиноми, които за всеки елемент на подобластта са полиноми на определена степен с неизвестни коефициенти, а за цялата област са непрекъснати.

Еднозначността на определяне на полинома във всяка област се обуславя от това, че във възловите точки на подобластта се задават фиксирани стойности на полинома.

В настоящата задача са използвани линейни полиноми.

- **Формиране и решение на система дискретни (алгебрични) уравнения.**

В качеството на приблизително решение на метода на крайните елементи се приема допустима функция, параметрите на която се определят по вариационен начин или с някакво интегрално тъждество. В резултат на това, изходната задача се свежда до система дискретни алгебрични уравнения, решение на която представляват търсените параметри (коефициенти) от приблизителното решение.

- **Оценка на точността на полученото решение**

Това е точността, с която допустимата функция апроксимира търсеното решение на изходната задача. Математичното изследване на метода показва, че крайните полиномни функции, при известна непрекъснатост на търсеното решение, обезпечават много точно решение, ако се въведат достатъчен брой подобласти (елементи) или се използва полином от по-висока степен.

- **Верификация и валидация на модела**

Оценка за достоверността на резултатите се прави на базата на валидация и верификация на модела. Валидацията на модела е процедура, при която резултатите получени при решението с математичния модел се сравняват с епирични данни получени от експерименти. По този начин се прави оценка на реалистичността на модела. Освен това е необходимо да бъде направени и оценки на модела за неговата способност да дава вече известни резултати както и неговото съответствие с общи принципи като закон за запазване на масата и енергията и др. Този процес се нарича верификация на модела.

В настоящата дипломна работа е извършена верификация на модела по отношение на гъстотата на елементната мрежа. За целта са използвани мрежите, генерирани в среда ANSYS Workbench

В средата ANSYS Workbench построяването на елементната мрежа на четирикамерната дограма (фиг. 40) се извършва със следните функции (фиг.39):

- **Advanced Size Function Off** - когато я използваме, могат да бъдат контролирани размерите на крайните елементи [16].

- **Relevance Center – Coarse** - определя вида и големината на елемента. Опциите са Coarse, Medium и Fine. Стойностите по подразбиране може да се настройват автоматично в зависимост от настройките на предпочитанията.

- **Element Size** – позволява задаването на размера на елементите, който се използва за целия модел.

- **Smoothing – Medium** – подобрява качеството на елементите чрез преместване на възлите по отношение на околните възли и елементи. Възможностите са: Low, Medium и High.

- **Transition – Slow** – оказва влияние върху скоростта, с която размерите на съседните елементи нарастват. Възможните опции са: Slow и Fast. **Slow** води до плавни преходи, а **Fast** – до резки преходи.

- **Span Angle Center – Fine** – служи за усъвършенстване на закръглянето на елемента. Има следните възможности: Coarse, Medium и Fine. Като Coarse – 91° до 60°, Medium - 75° до 24° и Fine – 36° до 12°.

- **Inflation Option – Smooth Transition** – използва тетраедърен елемент за изчисляване на всеки местен и обща размер, така че скоростта на изменението на обема да е гладко.

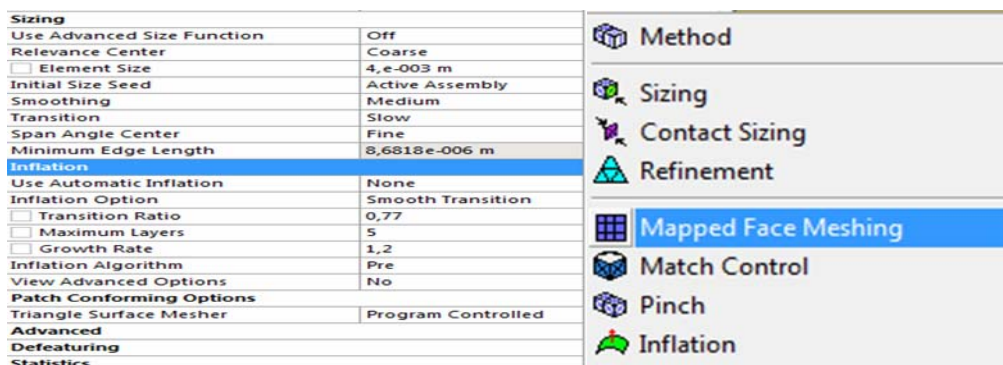
- **Transition Ratio** – определя скоростта, с която съседните елементи нарастват.

- **Maximum Layers** – определя максималния брой на слоевете, които да бъдат създадени в мрежата.

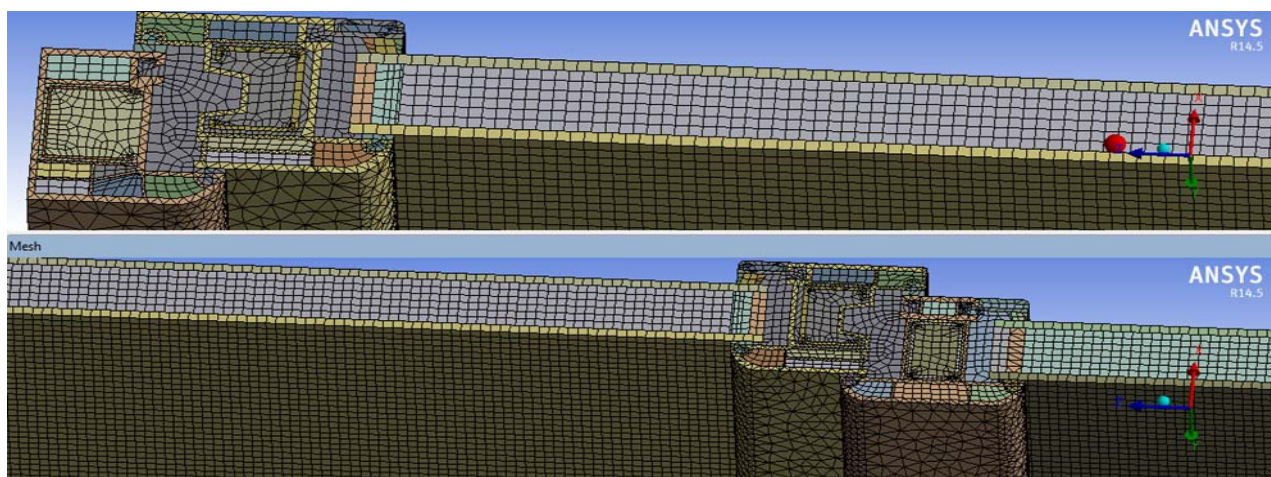
- **Growth Rate** – определя относителната дебелина на съседните слоеве.

- **Inflation Algorithm – Pre (Previewing Inflation)** – определя алгоритъма, който се използва за изчисление на мрежата. Когато е избрано **Pre**, първо се дискретизира повърхността и след това обема.

- **Mapped Face Meshing** – образува контролирани четиристранни и триъгълни елементи на повърхностни тела и шестъгълни елементи за твърди тела. Дискретизацията на линиите се задава с sizing control.



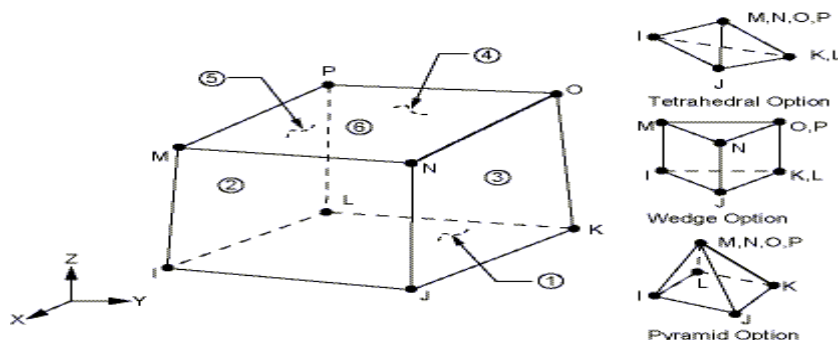
Фиг. 39 Настройки по мрежата



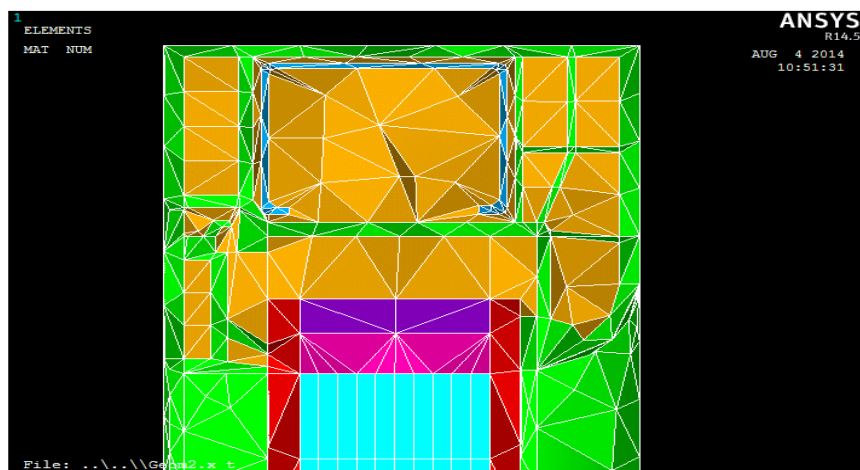
Фиг. 40 Елементна мрежа на пълния геометричен модел, съдържаща отваряемата и неотваряемата част на четирикамерната дограма. 1290829 елементи.

В среда ANSYS Workbench за геометричния модел на целия прозорец (каса, отваряема и неотваряема част) са генерирани мрежи при пет различни гъстоти с брой на елементите (1290829, 1816145, 1894433, 2277070 и 2378949).

В средата ANSYS APDL за моделирането на елементната мрежа се използва тип на елемента Fluid 142 (фиг. 41) [19]. За редуцирания геометричен модел е генерирана мрежа с форма на тетраедър за нефлуидните части и на паралелепипед за херметизираното газово пространство в стъклопакета. Общият брой на елементите е 502304.



Фиг. 41 Геометрия на Fluid 142



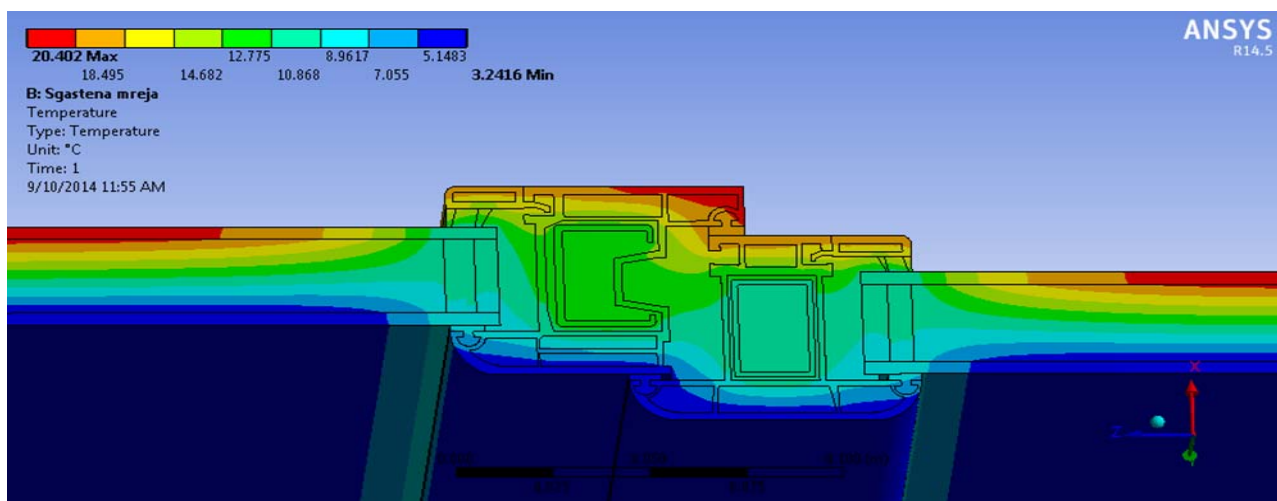
Фиг. 42 Елементна мрежа при среда ANSYS APDL с 502304 на брой елементи

2.3 Числени експерименти

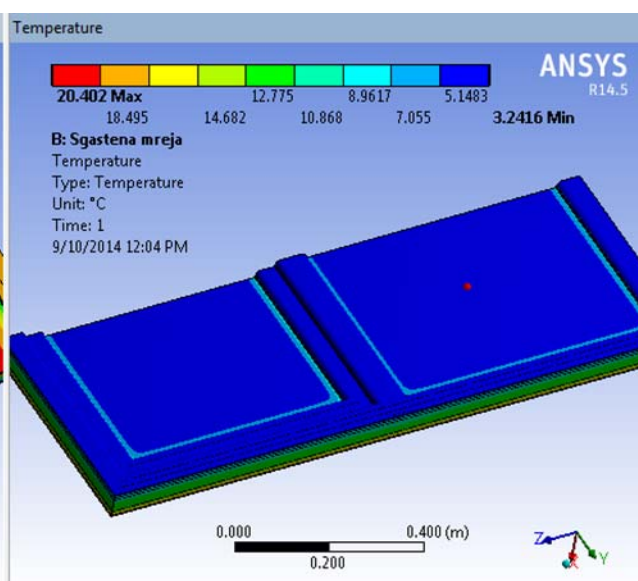
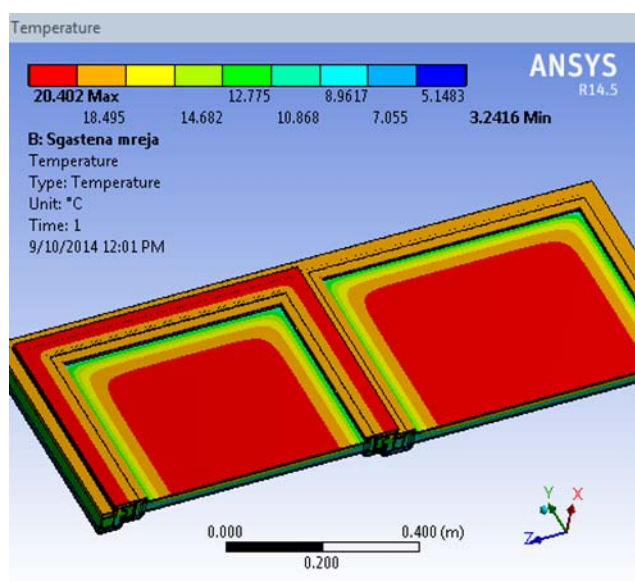
2.3.1 Числени експерименти при геометричен модел, включващ отваряемата и неотваряемата част на дограмата.

Проведено е числено решаване на уравнението на Фурие-Кирхоф за цялата изследвана област при допускане, че газовите среди са неподвижни с $K_{\text{гкв}} = 0,032 \text{ W/(mK)}$. Симулирани са температурните полета при петте генерирани мрежи елементната мрежа дефинирани (с брой на елементите 1290829, 1816145, 1894433, 2277070 и 2378949). Резултати са показани на фигури 43, 44 и 45.

На фигура 46 е показано графично обобщение на резултатите за U при петте решения с различна гъстота на мрежата. От графиката се вижда, че след брой на елементите 1816145 резултатите се установяват около стойността $1,508 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, което потвърждава достоверността на модела. Освен това може да се направи заключение, че оптималния брой на елементите е 1800000, тъй като при по малък брой се влошава точността на решението а увеличаването на елементите над този брой отнема ресурс на компютъра без да подобрява точността.

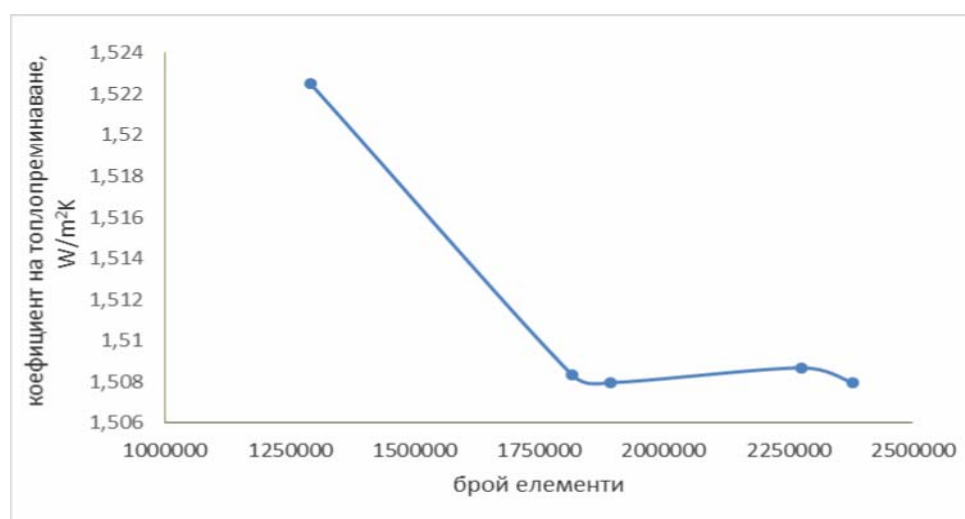


Фиг. 43 Напречно сечение на PVC система с температурно разпределение при брой елементи 2378949



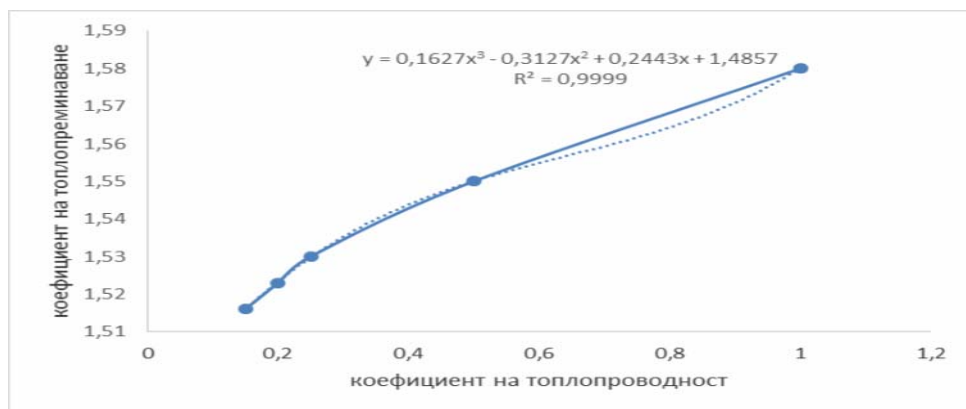
Фиг. 44 Температурно разпределение отвътре с брой елементи 2378949

Фиг. 45 Температурно разпределение отвън с брой елементи 2378949



Фиг. 46 Коефициент на топлопреминаване при вариране броя на елементите

Същият модел е използван с цел верификация на подхода за геометрично обединяване на полимерните материали PVC и EPDM при допускането, че EPDM има коефициент на топлопроводност като този на PVC. От долната фигура е видно, че при вариране на коефициента на топлопроводност м/у 0,17 и 0,25 W/(m.K) коефициентът на топлопреминаване се изменя под 1%. Проведени са изчисления и при по-високи стойности на K с цел проверка на хода на зависимостта и оттам и на достоверност на модела. При обработка на получените резултати с MS Excel е установено че тази връзка може да бъде дадена с полином от трета степен при значителна точност на приближение (фиг. 47).



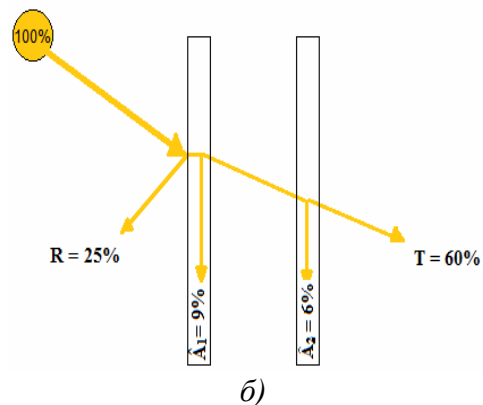
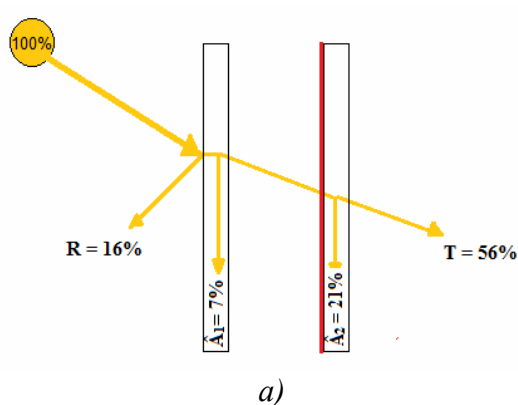
Фиг. 47 Коефициент на топлопреминаване при вариране на коефициента на топлопроводност

2.3.2 Числени експерименти със симулационно моделиране на топло-и хидродинамичните процеси в системата.

Направени са числени експерименти при избрания тип варианти с вариране на степента на чернота на PVC елементите, с използване на покритие и без покритие на стъклата от стъклопакета.

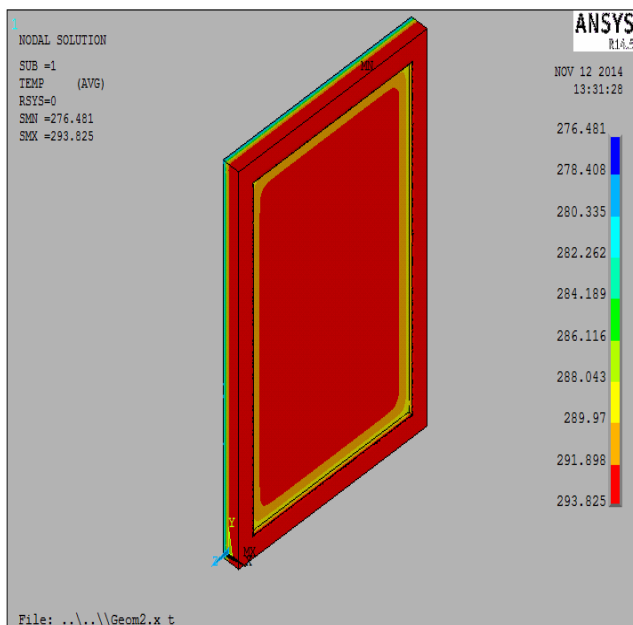
Таблица 4 Степени на чернота на излъчващите повърхности

Изследвани варианти	ϵ_{pvc}	ϵ_{glass1}	ϵ_{glass2}	ϵ_{glass3}	ϵ_{glass4}
Вариант 1. Нискоемисионно покритие на повърхност 3: к-стъкло. Бяла PVC рамка	0,9	0,84	0,84	0,03	0,84
Вариант 2. Нискоемисионно покритие на повърхност 3: к-стъкло. Сребриста PVC рамка	0,26	0,84	0,84	0,03	0,84
Вариант 3. Стъкла без покрития. Бяла PVC рамка	0,9	0,84	0,84	0,84	0,84
Вариант 4. Стъкла без покрития. Сребриста PVC рамка	0,26	0,84	0,84	0,84	0,84

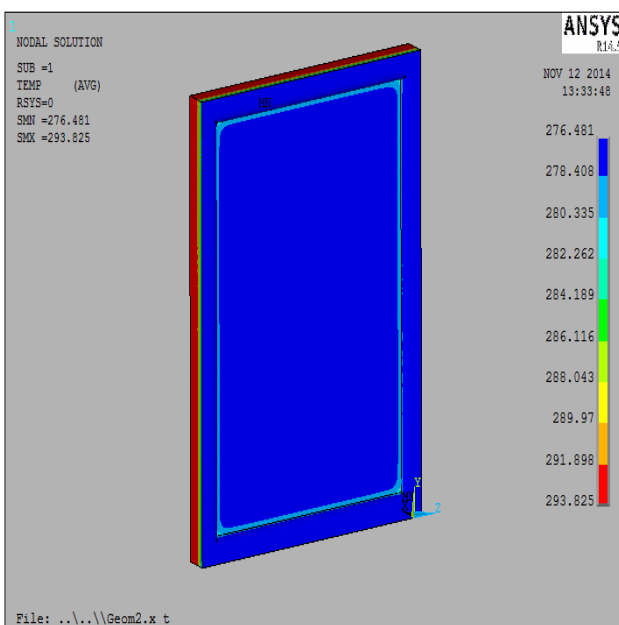


Фиг. 48 Разпределение на слънчевата енергия при стъклопакет с нискоемисионно покритие на пов. 3 (а) и стъклопакет без покритие (б)

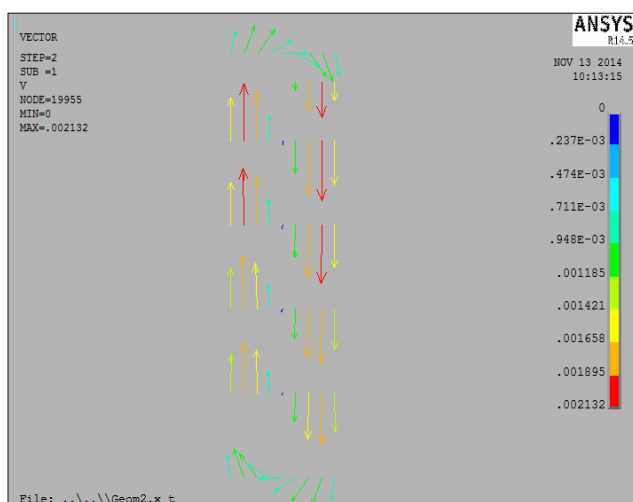
Вариант 1: Бяла PVC дограма със стъклопакет с нискоемисионно стъкло



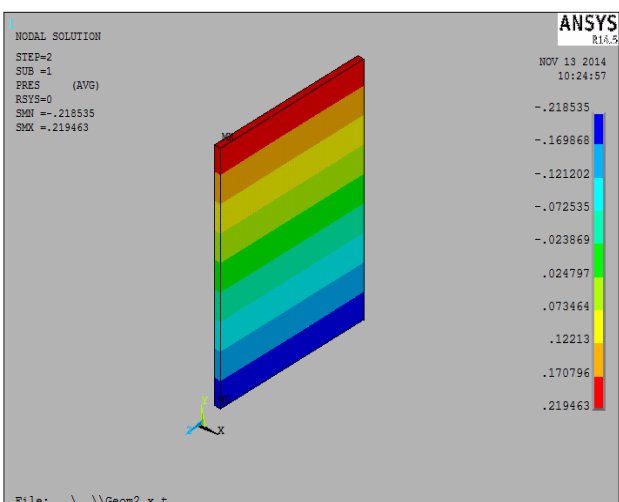
Фиг. 49 Температурно поле отвътре, K



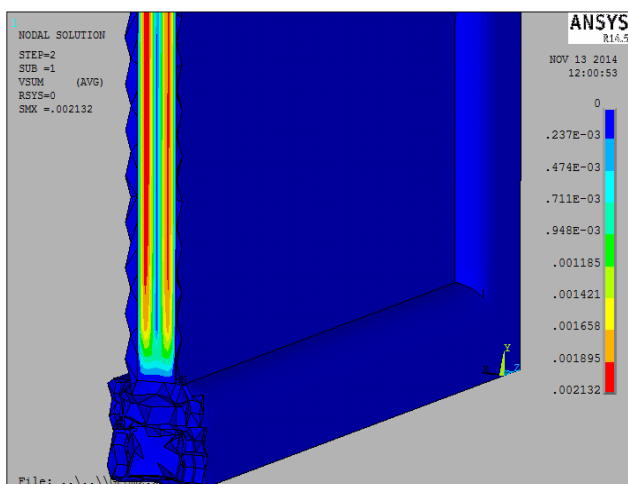
Фиг. 50 Температурно поле отвън, K



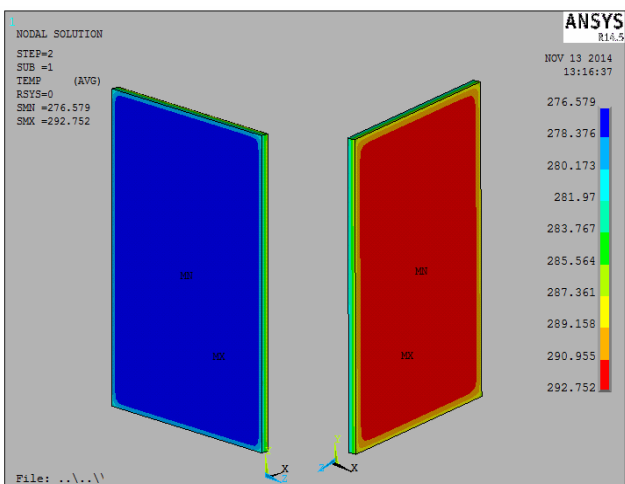
Фиг.51 Векторното скоростно поле в газовото пространство (аргон), m/s



Фиг.52 Налягане в газовото пространство (аргон), Pa

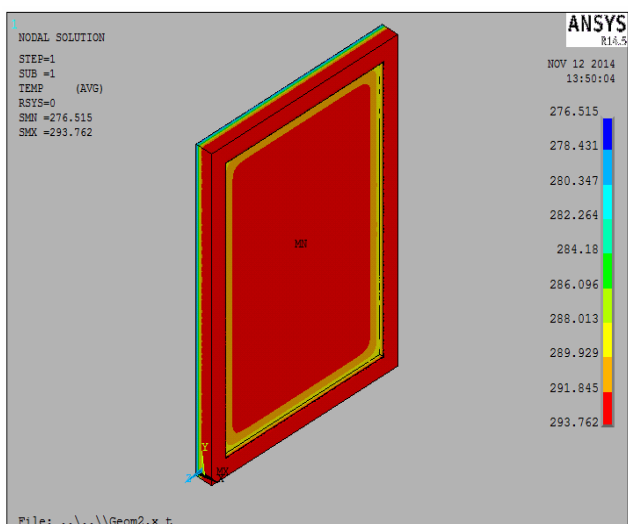


Фиг.53 Скалярно скоростно поле в газовото пространство (аргон), m/s

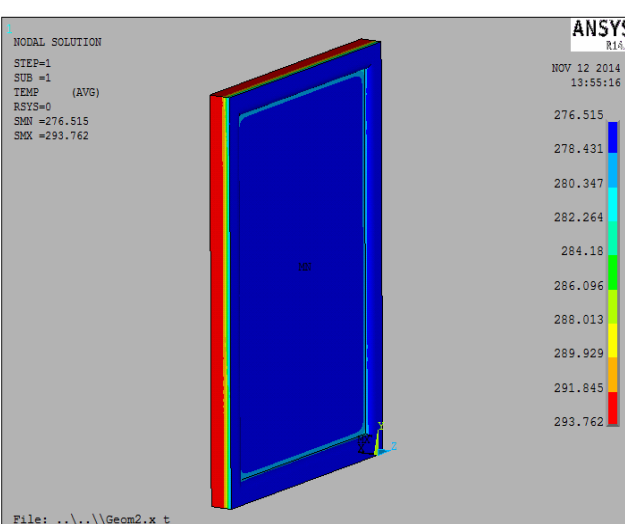


Фиг.54 Температурно поле в газовото пространство (аргон), K

Вариант 2: Сребриста PVC дограма ($\epsilon = 0,26$) със стъклопакет с нискоемисионно стъкло

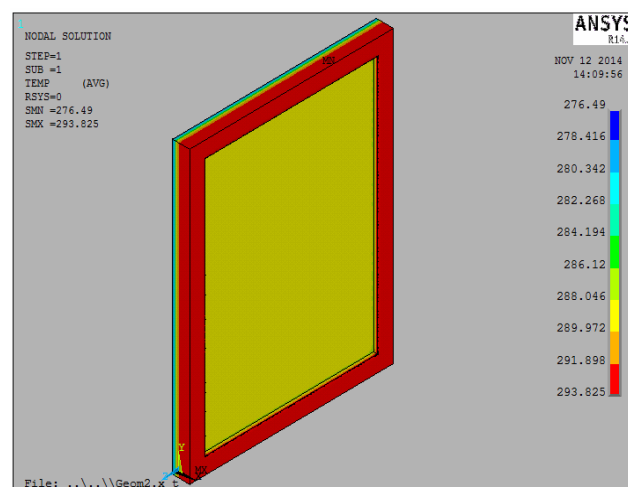


Фиг. 55 Температурно поле отвътре, K

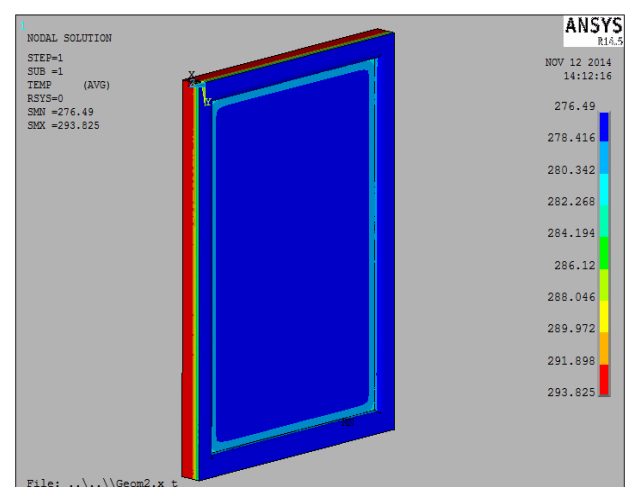


Фиг. 56 Температурно поле отвън, K

Вариант 3: Бяла PVC дограма ($\epsilon = 0,9$) със стъклопакет със стъкла без покритие

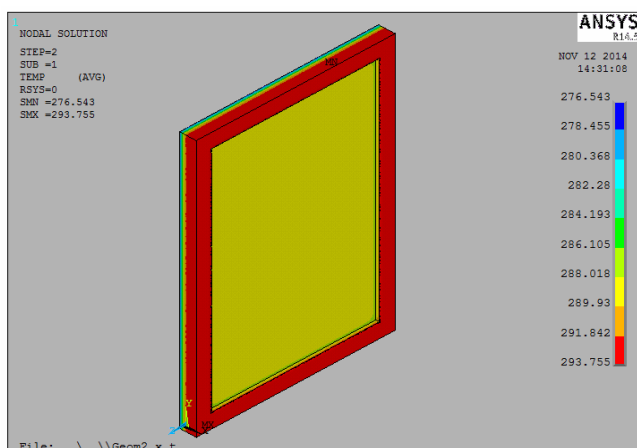


Фиг. 57 Температурно поле отвътре, K

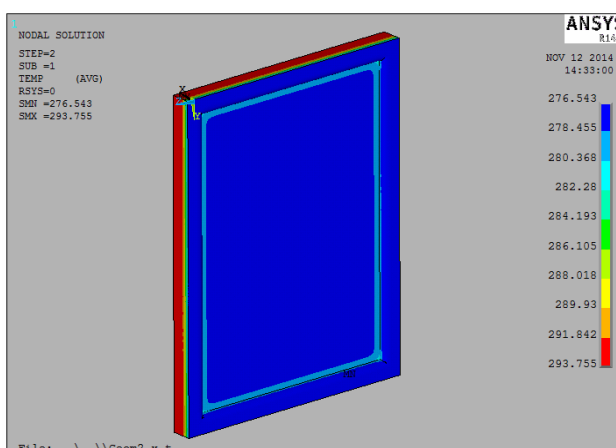


Фиг. 58 Температурно поле отвън, K

Вариант 4: Сребриста PVC дограма ($\epsilon = 0,26$) със стъклопакет със стъкла без покритие



Фиг. 59 Температурно поле отвътре, K



Фиг. 60 Температурно поле отвън, K

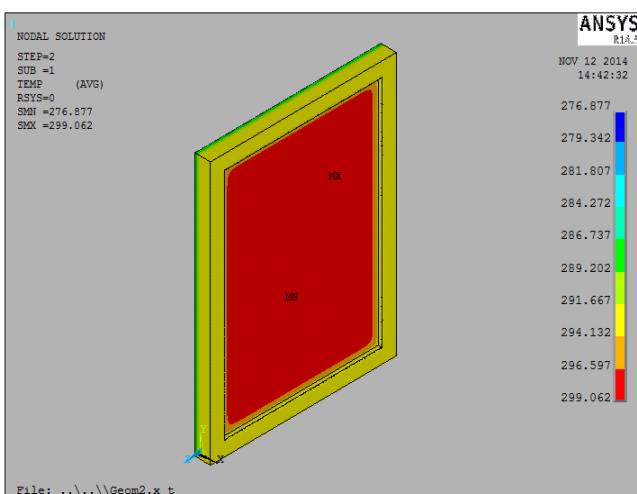
2.3.3 Числени резултати при отчитане на слънчевия радиационен поток

В долната таблица са представени оптичните свойства на единичните стъкла и интегралните оптични свойства на стъклата в стъклопакета при двата изследвани варианти

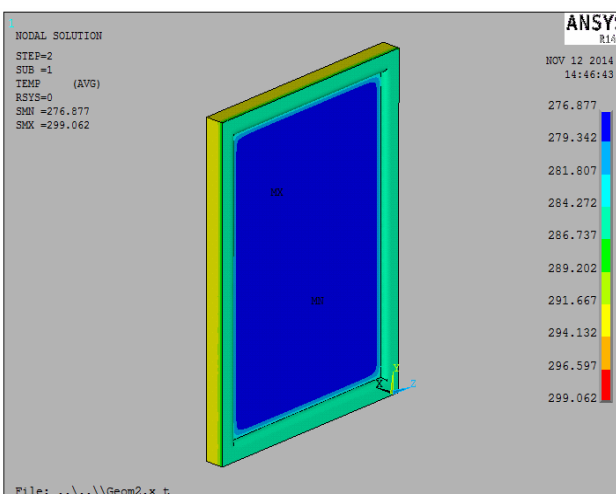
Таблица 5 Оптични свойства на стъклата

Изследвани варианти	Външен стъклен лист	Вътрешен стъклен лист	Система от стъкла
Вариант 1. Бяла PVC рамка и нискоемисионно покритие на повърхност 3: к-стъкло.	$A_1=0,08$; $T_1=0,82$; $R_1=0,11$	$A_2=0,25$; $T_2=0,68$; $R_2=0,07$	$\hat{A}_1=0,07$; $\hat{A}_2=0,21$; $T_{12}=0,56$
Вариант 3. Бяла PVC рамка и стъкла без покрития.	$A_1=0,08$; $T_1=0,82$; $R_1=0,11$	$A_1=0,08$; $T_1=0,76$; $R_1=0,16$	$\hat{A}_1=0,09$; $\hat{A}_2=0,06$; $T_{12}=0,6$

Вариант 5: Бяла PVC дограма със стъклопакет с нискоемисионно стъкло

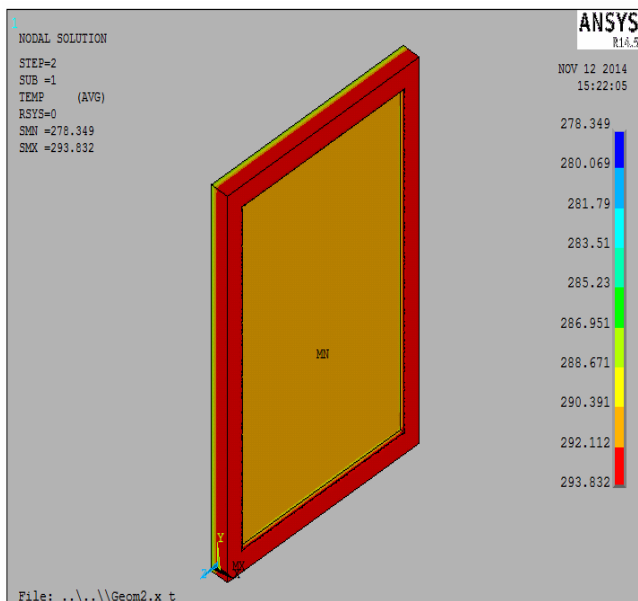


Фиг. 61 Температурно поле отвътре, K

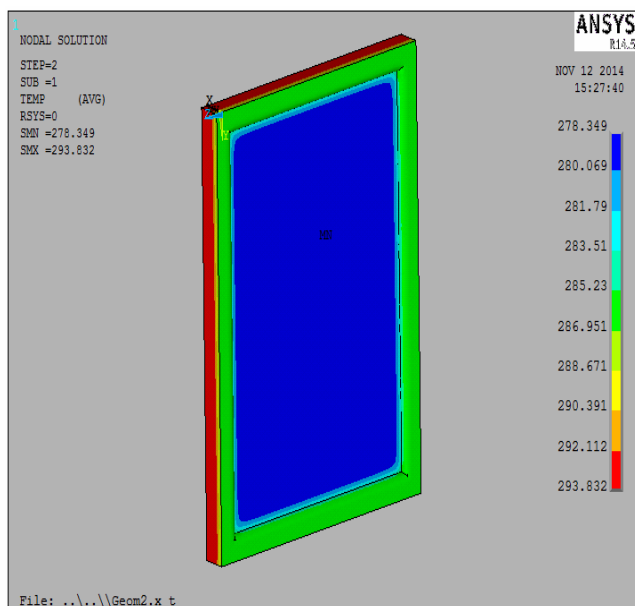


Фиг. 62 Температурно поле отвън, K

Вариант 6: Бяла PVC дограма ($\epsilon = 0,9$) със стъклопакет със стъкла без покритие



Фиг. 63 Температурно поле отвътре, K



Фиг. 64 Температурно поле отвън, K

От получените температурни разпределения на вариантите от 1 до 4 се изчисляват средните температури на вътрешните и външните повърхности на рамката и стъклопакета, коефициентите на топлопреминаване и топлопредаване, и изменението на налягането на газа в херметизираното пространство, дължащо се на изменението на температурата спрямо тази при процеса на херметизация: $T_{av,f}$, $h_{in,f}$, $T_{av,g}$, $h_{in,g}$, U_f , U_g , $T_{av,gas}$ и Δp . Във вариантите 5 и 6 са изчислени само $T_{av,gas}$ и Δp . Получените резултати са нанесени в таблица 6.

Таблица 6 Числени резултати от изследваните варианти

Изследвани варианти	$T_{av,f}$ K	$h_{in,f}$ W/(m ² K)	$T_{av,g}$ K	$h_{in,g}$ W/(m ² K)	U_f W/(m ² K)	U_g W/(m ² K)	U W/(m ² K)	$T_{av,gas}$ K	$\Delta p = c_1 \cdot \Delta T$ кPa
Вариант 1	293,01	12,86	292,11	12,49	0,70	1,31	1,13	284,56	-2,87
Вариант 2	292,81	9,18	292,09	12,49	0,61	1,33	1,12	284,59	-2,86
Вариант 3	292,93	12,86	289,55	12,43	0,76	3,07	2,40	283,84	-3,11
Вариант 4	292,66	9,19	289,47	12,43	0,68	3,13	2,42	283,80	-3,13
Вариант 1 с отчитане на сл. греене	--	--	--	--	--	--	--	288,10	-1,67
Вариант 3 с отчитане на сл. греене	--	--	--	--	--	--	--	285,25	-2,63

От получените числени резултати е видно, че коефициентът на топлопреминаване на рамката е по – нисък (в някои от случаите неколкостранно) в сравнение с коефициента на топлопреминаване на прозрачните части. Най-малка стойност има коефициентът на топлопреминаване при варианта със сребриста PVC рамка и к – стъкло. Установена е разлика в коефициентите на топлопреминаване на едни и същи рамки при комплектоването им с различни стъклопакети. Тя се дължи на наличието на компоненти на векторите на плътността на топлинния поток и на температурните градиенти по трите направления (x, y и z). При

едномерни изчисления се приема, че векторите на плътността на топлинния градиент и на температурния градиент са само по направление, перпендикулярно на рамката, но на практика това не е съвсем точно.

Интегралните коефициенти на топлопреминаване на изследваните варианти с бяла PVC рамка и к – стъкло се различават с измерените с $\approx 6,7 \%$. ($U_{\text{изчислено}} = 1.12 \text{ W/(m}^2\text{K)}$; $U_{\text{измерена}} = 1.05 \text{ W/(m}^2\text{K)}$) Тази разлика може да бъде намалена чрез уточняване на коефициента на топлопредаване чрез конвекция и температурата на вътрешната и външната среда в граничните условия на модела. В модела те са приети за равномерно разпределени по външната и вътрешната повърхност на стъклата, а при условията на експеримента варират по височина на камерата и за окончателното пресмятане на U се използват средноаритметичните им стойности.

При всички изследвани варианти температурите на вътрешните повърхности са по – високи от температурата на оросяване при стандартни условия (14°C), което е предпоставка за предотвратяване на конденз при приетата външна температура и още едно доказателство за ефективността на изследваната дограма.

При наличие на слънчево греене температурите на елементите на прозоречната система са по – високи в сравнение с тези при стандартните тестови условия без слънцегреене, а температурата на покритото стъкло е по – висока от тази на помещението с 4K . Това се дължи на високата поглъщателна способност на стъклото с нискоемисионното покритие. Това ще доведе до топлообмен чрез излъчване от стъклената повърхност към помещението, който ще повлияе положително на необходимата енергия за отопление през зимата – ще я намали.

При изследваните варианти най – голямо е вътрешното натоварване при стъклопакетите със стъкла без покритие и при двата цвята на дограмата $\approx -3 \text{ kPa}$. Отрицателните стойности на Δp ще доведат до „хлътване на стъклените листа“. Разликите при ниските стойности на Δp при двата цвята на PVC рамка е незначителна. Следователно покритията на стъклата оказват по – голямо влияние на вътрешното натоварване в сравнение с типа (цвета) на ползвания полимерен материал.

Изводи

- 1. Коефициентът на топлопроводност и степента на чернота са основните свойства на полимерните материали, влияещи върху коефициента на топлопреминаване на прозоречните системи при стационарен топлообмен. Коефициентът на топлопроводност не варира съществено поради използването на едни и същи по структура и химичен състав полимери (PVC и EPDM) в съвременните дограми, но степента на чернота може да се измени над 70% в зависимост от цвета на материала. При проведените в настоящата работа изследвания е установено, че такава разлика (73%) в степента на чернота на рамката не води до съществено изменение (под 2%) на коефициента на топлопреминаването ѝ. По-голямо влияние върху U на рамката (разлика в интервала $8-10 \%$) оказва типа на комплектования с нея стъклопакет.**
- 2. Коефициентът на топлопреминаване на рамките, изградени предимно от полимерни материали, е по-нисък в сравнение с коефициента на топлопреминаване на прозрачните части на прозоречната система. Той може да бъде намален допълнително чрез замяна на материала на усилящите профили (стомана) с полимерни, силикатни или хибридни материали.**

3. Влиянието на рамката върху вътрешните натоварвания при изследваните варианти на прозоречната система е несъществено (под 1%) в сравнение с влиянието на типа на стъклопакета и на използваните в него покрития (около 8%). Най-големи изменения върху вътрешните натоварвания оказва наличието на слънцегрее и плътността на радиационния слънчев поток.
4. Получените температурни и хидродинамични полета в прозоречната система могат да бъдат използвани за детайлен анализ на механичните процеси, напреженията и деформациите във всеки един елемент на дограмата. За целта е необходимо при генерираната мрежа от крайни елементи да се реши пълната система уравнения, описващи механичните процеси в прозореца, с отчитане на полето на налягането в херметизираното газово пространство на стъклопакета и температурно разпределение в резултат на топлинния анализ.
5. Предложената концепция за моделни изследвания може да бъде използвана за детайлно изследване на топло, хидродинамичните полета и коефициента на топлопреминаване при съвременни PVC дограми с различни видове стъклопакети, форма, размери, и материали на рамката при тестови и експлоатационни условия. Такава информация трудно може да бъде получена по експериментален път.

IV. Литература

- [1] <http://www.scribd.com/doc/23541999/LEKCIA-1>
- [2] Данни за PVC дограма - salamander, www.saav-bg.com/c/107/116/pvc-дограма-salamander-германия
- [3] web.firat.edu.tr
- [4] П. Велев, „Преработване на пластмаси“ ХТМУ, София, 2005
- [5] http://wsdt.duckdns.org/resources/AS_DT_WEB/Process_and_Manufacture/extrusion.htm
- [6] http://www.weissprofil.bg/catalogues/TechnicalCatalogue_WP4000.pdf
- [7] Appelfed D, Christian S. Hansen, S. Svendsen, Development of a slim window frame made of glass fibre reinforced polyester, Energy and Buildings 42 (2010), 1918-1925
- [8] JEREMY WAYNE KLAM, Development of a simplified thermal analysis procedure for insulating glass units, Thesis, August 2007
- [9] EN ISO 10077 – 2
- [10] SP Technical Research Institute of Sweden, www.sp.se, 2008
- [11] <http://www.astm.org/Standards/E1084.htm>
- [12] Сборник доклади от VIII конференция „Машинознание и Машинни елементи“ 2012, Диков В, Якост на опън на заварени ПВХ – профили за прозрачна дограма, стр. 162-169,
- [13] <http://www.castingarea.com/education/charpy-test/ct.htm>
- [14] <http://www.clementconservationrooflights.co.uk/documents/wintech-rooflight-test-report.pdf>
- [15] Gustavsen A, Heat Transfer in Window Frames with Internal Cavities, Department of Building Construction Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Norway, Thesis, September, 2001
- [16] Gustavsen A, and Jan Vincent Thue, Numerical Simulation of Natural Convection in Three – Dimensional Cavities with a High Vertical Aspect Ratio, Department of Building Construction Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Alfred Getz v 3, N – 7491 Trondheim, Norway
- [17] <http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm>
- [18] <http://processmodeling.org/bglang/math/mke.htm>
- [19] Mechanical APDL Theory Reference
<<https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent14/help/ans_elem/Hlp_E_FLUID142.html>>

- [20] Gustavsen A, Dalehaug A, Two – Dimensional Computational Fluid Dynamics and Conduction Simulations of Heat Transfer in Horizontal Windows Frames with Internal Cavities <<<http://eetd.lbl.gov/sites/all/files/publications/1132.pdf>>>
- [21] Kumar S, Investigation of 3D heat transfer effect in fenestration product, Thesis, September, 2010
- [22] Gustavsen A, Experimental and Numerical Examination of the Thermal Transmittance of High Performance Window Frame, 2010