

УДК 666.11:004.94:536.5

Е. В. МАРЦЕНЮК, А. В. ПОТАПОВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»***ПОЛУЧЕНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
ОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКОЛ**

Полимеры широко применяются во многих отраслях промышленности. Для изготовления качественных заготовок отработаны режимы отжига, которые позволяют получать изделия с характерным размером не более 0,05 метра. Попытки использования существующих программ для получения крупногабаритных заготовок не дают положительных результатов. На базе экспериментальных данных разработана и идентифицирована математическая модель остывания полимера. По результатам численных экспериментов предложены рекомендации по получению крупногабаритных заготовок. На основе составленных рекомендаций получена заготовка с характерным размером 0,5 метра. Разработанная методика может быть использована при получении полимерных органических стекол на основе полистирола, полиметакрилата, и др.

Ключевые слова: полимер, органическое стекло, отжиг, модель, температура, напряжения.

Введение

Полимерные органические стекла на основе полистирола, полиметакрилата и т.д. находят широкое применение в электродинамике планарных систем для создания диэлектрических волноводов и оптических системах большой площади, применяемых в антенных устройствах, полосковых линиях и других. Кроме того, полимеры могут применяться в экспериментальном методе определения напряженного состояния деталей и конструкций на прозрачных моделях, основанном на поляризации света и свойстве прозрачных изотропных материалов приобретать под действием нагрузки способность двойного лучепреломления [1]. Так, например, известно использование полистирола для изготовления моделей ферм мостов и кранов для изучения распределения напряжений.

Гарантированно получить полимер высокого качества можно в отливках с сечением, размеры которого не превышают 50х50 мм. При увеличении размеров сечения молекулярная масса отливки в ее центральной части оказывается меньшей, чем в наружной части. Это обстоятельство приводит к различию в прочностных характеристиках внутренних и наружных областей полимера. В связи с этим, важной стадией получения полимерных органических стекол является отжиг – полимер выдерживают при высокой температуре и затем охлаждают. Эмпирически найдены режимы отжига для стекол малой толщины с темпом снижения температуры 5...2 градуса в час [2]. Однако попытки получения по существующему режиму отжига заготовок с характерным размером более 50 мм часто приводят к получению брака.

Постановка задачи

В процессе получения аморфных полимеров, типичным представителем которых является атактический полистирол, основным фактором, приводящим к получению напряженных заготовок, является температурный режим материала.

Для получения картины распределения напряжений мысленно выделим в блоке n отдельных слоев в виде эллиптических поверхностей с конечной толщиной Δ и постоянной температурой t_i . Если предположить, что поперечные связи между выделенными слоями отсутствуют, то свободная температурная деформация i -го слоя с температурой t_i была бы больше, чем свободная температурная деформация $(i+1)$ -го слоя с температурой t_{i+1} при условии, что $t_i > t_{i+1}$. Однако реальное поведение материала приводит к установлению у всех слоев одинаковой деформации ε , отличающейся от свободной температурной. Для определения величины возникающих при этом температурных напряжений воспользуемся принципом скрытой деформации [3], применяя его к отдельным слоям:

$$\sigma_i = E(\varepsilon - \alpha(t_i - t_0)), \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала;

α – коэффициент линейного теплового расширения;

t_0 – начальная температура.

Условие равновесия границы между двумя выделенными слоями есть равенство нулю суммы действующих на нее сил:

$$\sigma_i F_i + \sigma_{i+1} F_{i+1} = 0, \quad (2)$$

где F_i – площадь срединной поверхности i -го слоя.

Рассматривая выражения (1) и (2), как систему уравнений, получим:

$$\sigma_i = \alpha E (t_{cp} - t_i), \quad \varepsilon = \alpha (t_{cp} - t_i), \quad (3)$$

где $t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i t_i}{\sum_{i=1}^n F_i}$ – средняя температура детали.

Таким образом, проблема получения крупногабаритных заготовок из полимерных материалов заключается в разработке режима отжига, исключающего большие градиенты температур в объеме заготовки.

Кроме того, следует отметить, что процесс полимеризации мономеров является энергоемким, а стремление сократить время производственного цикла и, тем самым, снизить его стоимость, накладывает дополнительное условие на программу отжига.

Для достижения поставленных целей были намечены следующие задачи:

- 1) построение и верификация математической модели процесса остывания полимера, описывающая его тепловое состояние;
- 2) определение напряженного состояния полимера, соответствующего известным режимам отжига для малогабаритных заготовок (2...5 градусов в час);
- 3) разработка режима отжига для крупногабаритных полимерных стекол.

Формирование расчетной модели

В данном исследовании проводится анализ теплового состояния процесса остывания блока из полистирола. Установка представляет собой полимеризатор цилиндрической формы, внутрь которого помещается прямоугольная ампула, заполненная мономером. Пространство внутри полимеризатора заполняется атмосферным воздухом. Принудительная циркуляция этого воздуха отсутствует. В ампуле с мономером есть свободное пространство. Воздух из этого пространства вытесняется инертным газом, после чего емкость герметизируется. Управление тепловым режимом осуществляется на цилиндрической стенке полимеризатора с внешней ее стороны. Торцевые стенки полимеризатора покрыты термоизоляционным материалом.

Для упрощения модели и сокращения времени расчетов примем следующие допущения:

– внешние поверхности торцов полимеризатора идеально заизолированы и передача тепла через них не происходит, т.е. тепловое воздействие на исследуемый объект осуществляется только с внешней стороны цилиндра;

– реальное положение нагревателей не учитывается, а величина теплового потока в любой точке цилиндра полимеризатора есть функция времени и не зависит от координаты точки;

– все применяемые материалы имеют изотропную структуру, и их свойства не зависят от направления.

Оговоренные предположения дают возможность вместо полноразмерного объекта моделировать сектор, для которого выполняются условия геометрической симметрии и симметрии нагружения. В данной задаче расчетный сектор ограничен двумя вертикальными плоскостями симметрии ампулы (параллелепипеда) и составляет $\frac{1}{4}$ часть от общего объема.

Под математической моделью будем понимать систему уравнений, полученную в результате представления расчетной области совокупностью конечного числа объемов наиболее простой формы [4]. В данную систему входят условия равновесия отдельных объемов, записанные для узловых точек, начальные и граничные условия, а также физические свойства используемых материалов [5, 6]. Уравнения равновесия формируются в автоматическом режиме при разбиении расчетной области на сетку конечных элементов. Для объемов, занимаемых полимером, инертным газом и воздухом использовался твердотельный объемный элемент первого порядка, а для стенок полимеризатора и ампулы – поверхностный четырехугольный элемент. Созданная таким образом конечно-элементная сетка, включающая порядка 10^5 узлов, показана на рис. 1.

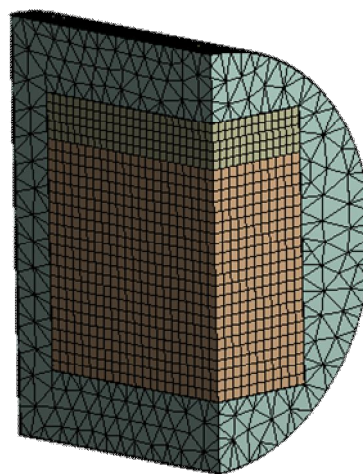


Рис. 1. Конечно-элементная модель объекта

В соответствии с отмеченными особенностями установки и протекающих в ней процессов можно выделить основные факторы теплового воздействия на исследуемый объект. Отсутствие принудительной циркуляции газообразной среды позволяет исключить из состава граничных условий конвекционный теплообмен. В качестве управляющего критерия, который контролировался в экспериментальной установке, задавались граничные условия первого рода – температура на внешней цилиндрической стенке полимеризатора. Передача тепла между полимеризатором и ампулой, а также между верхней частью ампулы и заполняющим ее полимером в газовом пространстве осуществляется как за счет теплопроводности газовой среды, так и путем лучистого теплообмена.

Верификация модели

Включение радиационных эффектов в анализе делает задачу крайне нелинейной. Учитывая, что рассматривается процесс изменения теплового состояния объекта, вызванного переменными во времени граничными условиями, анализ проводится в нестационарной нелинейной постановке. В связи с этим, для возможного упрощения задачи на первом этапе проводилась сравнительная оценка вклада лучистого теплообмена в процесс переноса тепла.

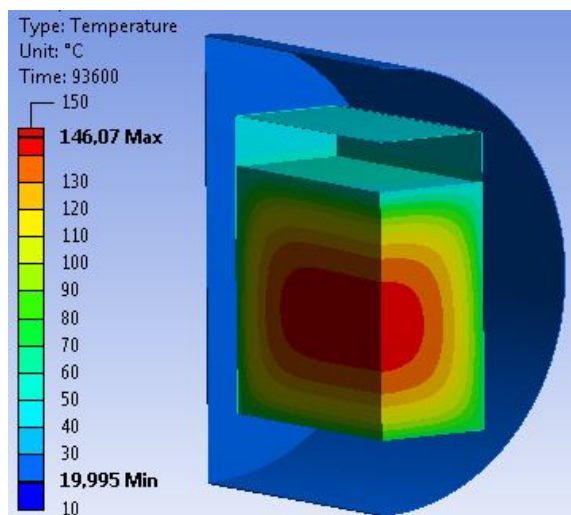


Рис. 2. Поле температур установки после 26 часов остывания с учетом лучистого теплообмена

На рисунках 2 и 3 приведены поля температур, соответствующие процессу отжига полимера с темпом 5 градусов в час. Охлаждение начинается с равновесного теплового состояния установки, а управляющая температура на стенках полимеризатора изменяется от 150°C до 10°C. Анализ показывает, что тепловое состояние модели с лучистым тепло-

обменом (рис. 2) при заданных условиях отличается по минимальной температуре полимера от модели, не учитывающей радиационные эффекты (рис. 3), более чем на 30%. Таким образом, отказ от использования радиационных эффектов в пользу упрощения расчетной модели неприемлем.

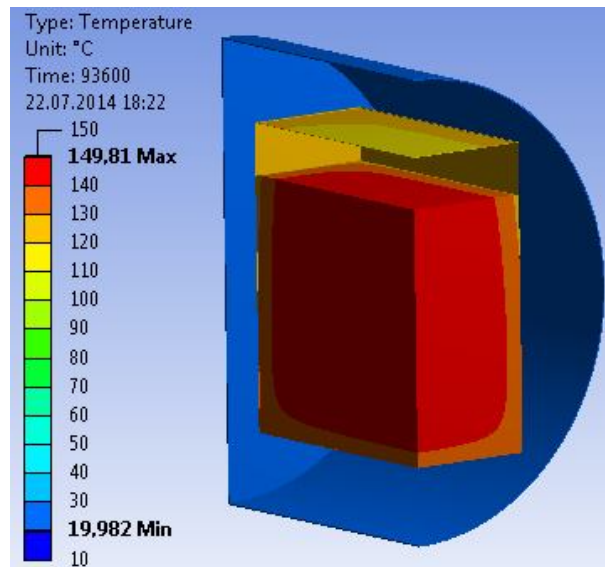


Рис. 3. Поле температур установки после 26 часов остывания без учета лучистого теплообмена

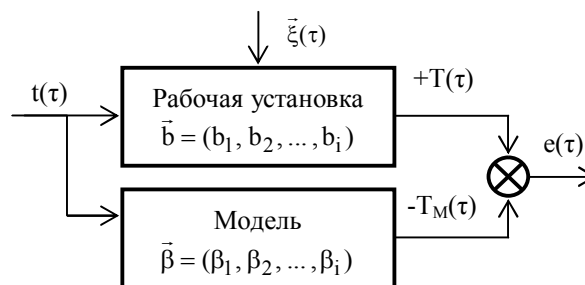


Рис. 4. Структурная схема идентификации расчетной модели

Реальный объект (рис. 4) обладает набором параметров b_i , отвечающих за формирование отклика $T(\tau)$ на внешнее воздействие $t(\tau)$. Математическая модель также обладает набором идентичных параметров β_i для генерации выходного сигнала $T_M(\tau)$. Однако выходная информация реального объекта получает некоторое искажение по сравнению с данными, генерируемыми идеализированной моделью. Это вызвано действием на рабочую установку помех $\bar{\xi}(\tau)$, которые связаны с утечками тепла с торцов полимеризатора, состоянием поверхностей стенок полимеризатора и ампулы (покрытие, налет, окалина) и т.д. Таким образом, между показаниями реаль-

ного объекта и математической моделью формируются невязка $e(\tau)$, а идентификация расчетной модели направлена на минимизацию этой невязки и заключается в коррекции параметров состояния модели β_i , в частности коррекции излучательной способности поверхностей применяемых материалов.

На рисунке 5 показаны результаты поиска оптимальных значений степени черноты. Для сужения диапазона поиска были рассчитаны переходные процессы, соответствующие ее крайним значениям для используемых материалов – $T(\varepsilon=0,2)$ и $T(\varepsilon=0,8)$. Затем были нанесены показания термопар T_{Σ} , и определена величина излучательной способности $T(\varepsilon=0,3)$, дающая минимум невязки.

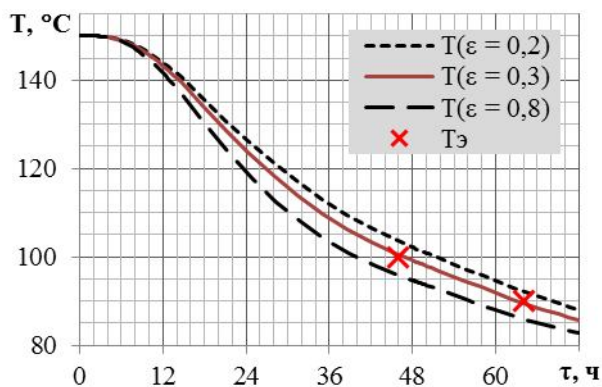


Рис. 5. Идентификация модели теплового состояния установки

Расчет термонапряженного состояния полимера по известному режиму отжига

После уточнения параметров модели был проведен анализ термонапряженного состояния полимера. В качестве режима отжига принят режим с темпом охлаждения 5 градусов в час.

На рисунке 6 изображено поле температур в объеме заготовки для такого состояния полимера, при котором температура участков, примыкающих к стенкам ампулы уже меньше температуры стеклования T_g , а в центральной части полимера температура материала больше T_g . Таким образом, на рис. 6 изображена стадия получения монолитного полимера, когда внешние области уже затвердели, образовав тем самым «корку», а внутренняя центральная часть еще находится в жидком состоянии. Данное обстоятельство следует учитывать при анализе результатов напряженного состояния, вызванного представленным полем температур. Из рисунка 7 видно, что зоны с максимальными напряжениями расположились на плоскостях симметрии заготовки (параллелепипеда). Кроме того уровни максимальных напряжений превышают предел прочности ма-

териала при разрыве. Исходя из выше сказанного, следует, что по мере затвердевания «корки» в теле заготовки будут возникать растягивающие температурные напряжения, приводящие к образованию микродефектов с последующим их развитием в глобальные макротрещины. При этом растрескивание материала будет происходить в ортогональных плоскостях симметрии параллелепипеда.

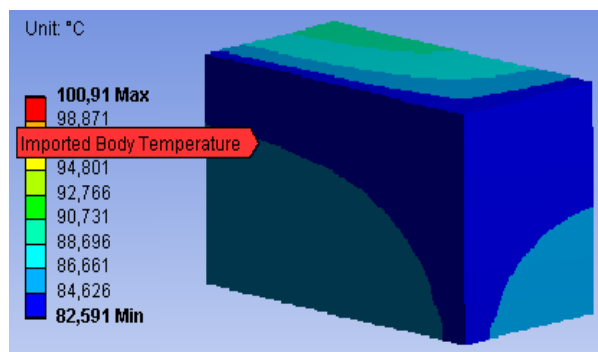


Рис. 6. Анализ теплового состояния полимера для режима отжига 5градусов в час

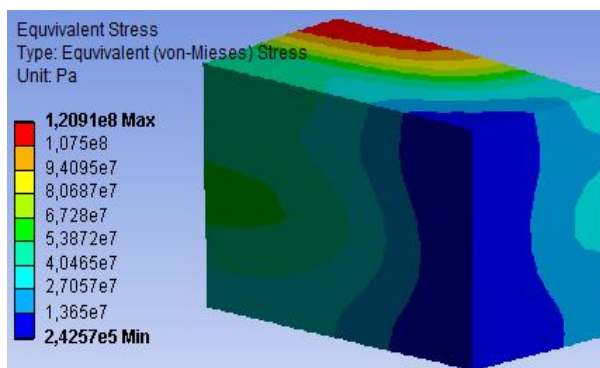


Рис. 7. Анализ напряженного состояния полимера для режима отжига 5градусов в час

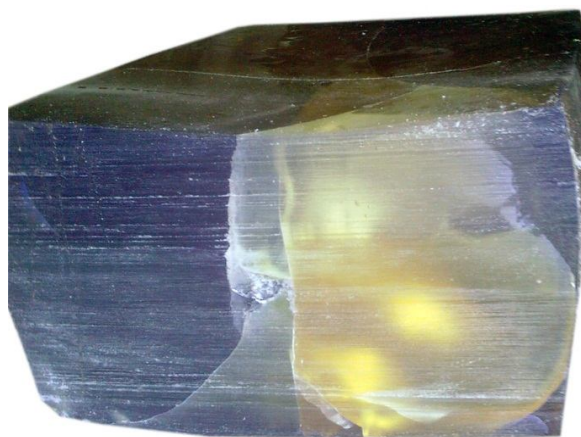


Рис. 8. Распил крупногабаритной заготовки, полученной по существующим режимам отжига

Для подтверждения полученных результатов аналогичный режим отжига задавался и на установке при попытке получения заготовки с минимальными размерами сечения 0,3x0,5 м. После извлечения из ампулы в блоке полимера было установлено наличие трещин, которые преимущественно сосредоточились в двух вертикальных взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 8). По распилу заготовки видно, что трещины являются сквозными и проходят через всю толщу материала. При этом можно утверждать, что рост трещины соизмерим с темпом остывания материала, а точнее со скоростью стеклования, т.е. она увеличивается по мере уменьшения расплавленной области в объеме заготовки. В итоге, трещины, зародившиеся на противоположных стенках, смыкаются в центре.

Разработка режима отжига для крупногабаритных полимерных стекол

На заключительном этапе работы был выполнен ряд расчетов для различных предложенных программ остывания. Расчеты были направлены на достижение двух целей: формирования программы остывания полимера, не приводящей к температурным напряжениям, превышающим прочностные свойства материала; минимизации времени технологического процесса получения заготовок с целью сокращения энергетических затрат.

В результате сравнительного анализа термонапряженных состояний заготовок, полученных для различных программ остывания сформулированы следующие рекомендации:

1) темп остывания до достижения минимальной температуры полимера значения, равного температуре стеклования материала, не влияет на последующий процесс возникновения внутренних напряжений в объеме заготовки;

2) для достижения полимером равновесного теплового состояния необходима продолжительная выдержка при постоянном значении управляющей температуры (температуры стенок полимеризатора), а величина управляющей температуры должна на несколько градусов превышать температуру стеклования материала;

3) при значениях управляющей температуры ниже температуры стеклования отжиг следует проводить ступенчато с небольшими приращениями температур и промежуточными выдержками.

На рисунке 9 представлена программа отжига, соответствующая составленным рекомендациям. Здесь линия 1 – управляющая температура T_u ; линия 2 – показания термопары, расположенной внутри полимера, а температура T_1 близкая к макси-

мальной температуре заготовки; линия 3 – осредненные показания термопар T_2 , расположенных на ампуле. Результаты экспериментов подтвердили, что применение данных рекомендаций позволяет получить заготовку с характерным размером 0,5 м. При этом заготовка не имеет как внешних, так и внутренних дефектов, а последующий распил заготовки не приводит к растрескиванию материала.

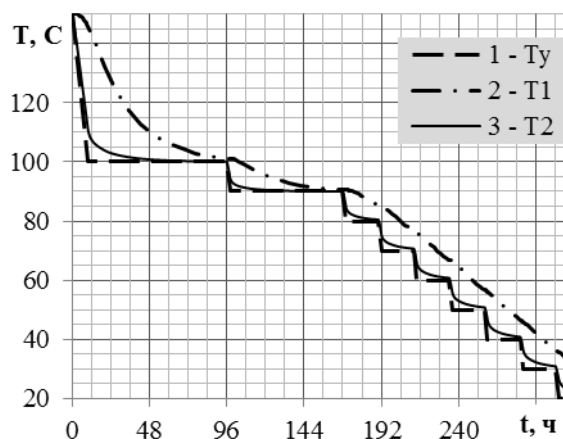


Рис. 9. Разработанная программа отжига полимера

Заключение

Создана математическая модель для расчета режима снижения температур при производстве полимерных органических стекол.

Показано, что существующие рекомендации по темпу снижения температуры в 2...5 градусов в час пригодны лишь для заготовок с характерным размером не более 50 мм.

Предложен режим снижения температуры с характерным размером более 50 мм.

По предложенному режиму отжига получена заготовка с характерным размером порядка 0,5 м и удовлетворительным уровнем термоупругих напряжений.

Литература

1. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений [Текст] / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др. – К. : Наукова думка, 1981. – 584 с.

2. Гринев, Б. В. Пластмассовые сцинтилляторы [Текст] / Б. В. Гринев, В. Г. Сеньчишин. – Х. : АКТА, 2003. – 320 с.

3. Олейник, А. В. Температурные напряжения в деталях газотурбинных двигателей [Текст] : консп. лекций / А. В. Олейник. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харк. авиац. ин-т», 2002. – 65 с.

4. Басов, К. А. *ANSYS в примерах и задачах [Текст]* / К. А. Басов ; под общ. ред. Д. Г. Красковского. – М. : КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.

5. Гуль, В. Е. *Физико-химические основы производства полимерных пленок [Текст]* / В. Е. Гуль, В. П. Дьяконова. – М. : Высшая школа, 1978. – 279 с.

6. *Полистирол. Физико-химические основы получения и переработки [Текст]* / А. Я. Малкин, С. А. Вольфон, В. Н. Кулезнев, Г. И. Файдель. – М. : Химия, 1975. – 288 с.

Поступила в редакцию 3.06.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры А. В. Белогуб, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ОТРИМАННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ПОЛІМЕРНИХ ОРГАНІЧНИХ СТЕКОЛ

Є. В. Марценюк, О. В. Потапов

Полімери широко застосовуються в багатьох галузях промисловості. Для виготовлення якісних заготовок відпрацьовано режими відпалу, які дозволяють отримувати вироби з характерним розміром не більш, ніж 0,05 метра. Спроби використання існуючих програм для отримання великогабаритних заготовок не дають позитивних результатів. На базі експериментальних даних розроблено та ідентифіковано математичну модель вистигання полімеру. За результатами чисельних експериментів запропоновано рекомендації щодо отримання великогабаритних заготовок. На основі запропонованих рекомендацій отримано заготовку з характерним розміром 0,5 метра. Розроблена методика може бути використана в разі виготовлення полімерних органічних стекол на основі полістиролу, поліметакрилату та ін..

Ключові слова: полімер, органічне скло, відпал, модель, температура, напруження.

MANUFACTURING OF LARGE CAPACITY POLYMERIC ORGANIC GLASSES

E. V. Martsenyuk, A. V. Potapov

Polymers are widely used in most branches of industry. To provide quality of workpiece they are exposed to anneal. Known annealing regimes provide high quality only for workpieces with characteristic size less than 0,05 meters. All attempts of applying known annealing regimes for large capacity workpieces were unsuccessful. The paper addresses model of polymer cooling process. The model was identified on experimental data. Basing the model authors suggest piece of recommendations to improve quality of the large capacity workpieces. Following these commendations author experimentally manufactured workpiece with characteristic size 0,5 meters. The proposed method can be used for polymeric organic glasses with a polystyrene, polymethacrylate, etc.

Key words: polymer, organic glass, anneal, model, temperature, stresses.

Марценюк Евгений Викторович – ст. преп. кафедры конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ev_martsen@mail.ru

Потапов Александр Вячеславович – учащийся, Харьковская гимназия № 6 "Мариинская гимназия", Харьков, Украина, e-mail: sashapotap95@mail.ru.