Обозначения и сокращения

X – вектор входных параметров;

V – вектор варьируемых параметров;

Y – вектор выходных параметров процесса;

D – диаметр формующей матрицы агрегата для термоформования, м;

H – глубина формующей матрицы агрегата для термоформования, м;

D_{min}, D_{max} – диапазон изменения диаметра формующей матрицы для заданного метода формования, типа полимерного материала к конфигурации изделия, м;

H_{min}, H_{max} – диапазон изменения глубины формующей матрицы для заданного метода формования, типа полимерного материала к конфигурации изделия, м;

D_{δ} – индекс разнотолщинности стенок формванного изделия, %;

δ – средняя толщина стенок формованного изделия, м;

δ_{min}, δ_{max} – предельно допустимые значения толщины стенок формованного изделия, м;

δ_0 – толщина заготовки, м;

k_c – коэффициент охлаждения формуемого полимерного материала, характеризующий степень охлаждения материала после приведения в контакт со стенками формующей матрицы;

k_f – коэффициент утяжки полимерного материала, характеризующий степень утяжки материала в полость формующей матрицы из пространства, ограниченного отверстием зажимной рамы, но не находящегося над полостью матрицы, а также из-под самой зажимной рамы;

M – размерность профиля толщины по высоте изделия;

Введение

Термоформование представляет собой один из наиболее распространенных методов обработки пластмассовых материалов. Термоформованием называется технология, использующая энергию как тепловой источник для постоянной деформации объекта без применения фиксированного набора инструментов.

Широкое распространение процессов термоформования объясняется простотой, компактностью, относительной дешевизной используемого оборудования и технологической оснастки. Термоформование используют, прежде всего, при производстве тары и упаковки для пищевой, парфюмерной, фармацевтической, химической, нефтяной промышленностей, одноразовой посуды, а также целого ряда полых полимерных изделий, имеющих различное техническое назначение. Многие виды полимерных изделий, например крупногабаритные и тонкостенные сложной конфигурации, можно изготовить только методами пневматического или вакуумного формования.

В число материалов, используемых при термоформовании, входят жесткий и гибкий поливинилхлорид, полиэфирные ламинаты, полистирол, полипропилен, полиэтилен, поликарбонат и полиэфирные компаунды. Термоформованные продукты обладают более высокими механическими свойствами, устойчивостью к воздействию химических веществ, ударопрочностью, свойствами барьера от проникновения газа и воды; они также обеспечивают более продолжительный срок хранения.

Существуют различные виды термоформования, включая вакуумное формование, пневмоформование, формование из двойного листа, а также тонкостенное и толстостенное формование.

Реализация методов термоформования заключается в следующем: листовую или плёночную полимерную заготовку нагревают до температуры высокоэластического состояния, а затем, деформируя её различными способами, придают последней необходимую форму, фиксация которой осуществляется путём охлаждения отформованного изделия.

Процессы термоформования полимерных материалов характеризуются множеством типов перерабатываемых полимеров, различными конфигурациями готовых изделий, что приводит к необходимости частой смены формующих матриц и технологического режима стадий нагрева и вытяжки. При этом возможно возникновение дефектов изделий, связанное с разнотолщинностью их стенок, а также утолщение стенок изделия, вызывающее перерасход дорого сырьевого материала, или утончение стенок, приводящее к разрыву изделия. Поэтому актуальной задачей является разработка программного обеспечения, позволяющего рассчитать показатели качества термоформованного изделия (индекс разнотолщинности, среднюю толщину) и определить значения геометрических параметров формующей матрицы, обеспечивающие требуемое качество изделия для различных типов полимерных материалов и конфигураций изделий.

В связи с этим целью проекта является разработка программного комплекса, который на основе математической модели процесса термоформования изделий типа «круговой цилиндр», позволяет определить значения диаметра и глубины формующей матрицы, обеспечивающие заданный индекс разнотолщинности и заданную среднюю толщину стенок формованного изделия.

1. Аналитический обзор

Объектом автоматизированной системы является термоформование полимерных изделий типа «круговой цилиндр».

Тип автоматизированной системы – система автоматизированного проектирования (САПР) [1].

1.1 Характеристика функциональной структуры программного обеспечения для синтеза и анализа объектов проектирования

Современные промышленные объекты проектирования представляют собой технологические процессы, характеризующиеся широким ассортиментом продукции, множеством типов и конфигураций оборудования, используемого на каждой стадии процесса, большим числом режимов функционирования оборудования для каждого типа продукта и производительности, различными требованиями к качеству продукции разных типов [2]. Функциональная структура программного обеспечения (ПО) для синтеза и анализа указанных объектов проектирования представлена на рисунке 1, где использованы следующие обозначения:

Y_0 – задание на синтез и анализ объекта проектирования;

M – метод производства;

T_M – вектор типов сырьевых материалов;

T_P – тип (конфигурация, геометрические параметры) продукта;

T_{EQ} – вектор типов технологического оборудования;

G_0 – требуемая производительность процесса, кг/с (предельное значение критериального ограничения на производительность);

C_0 – предельно допустимая стоимость объекта, руб. (предельное значение критериального ограничения на стоимость);

V^* – вектор допустимых (оптимальных) значений варьируемых параметров объекта;

M_{2D}, M_{3D} – 2D и 3D геометрические модели синтезированных проектных решений;

Y – вектор выходных параметров объекта;

S – вектор параметров состояния;

K – вектор критериальных показателей (показателей эффективности);

E – удельное энергопотребление, Дж/кг, или потребляемая мощность, Вт (целевая функция объекта – критерий проектирования);

G – производительность, кг/с;

C – стоимость, руб.;

Q_P – вектор показателей качества продукта;

X – вектор независимых входных параметров (параметров среды проектирования) объекта;

H_M – вектор характеристик сырьевых материалов;

G_{EQ} – вектор геометрических характеристик (конфигураций, параметров) оборудования;

R – вектор технологических (режимных) параметров процесса;

$V_{\min}$, $V_{\max}$ – векторы предельных значений варьируемых параметров (векторы предельных значений ограничений первого рода).

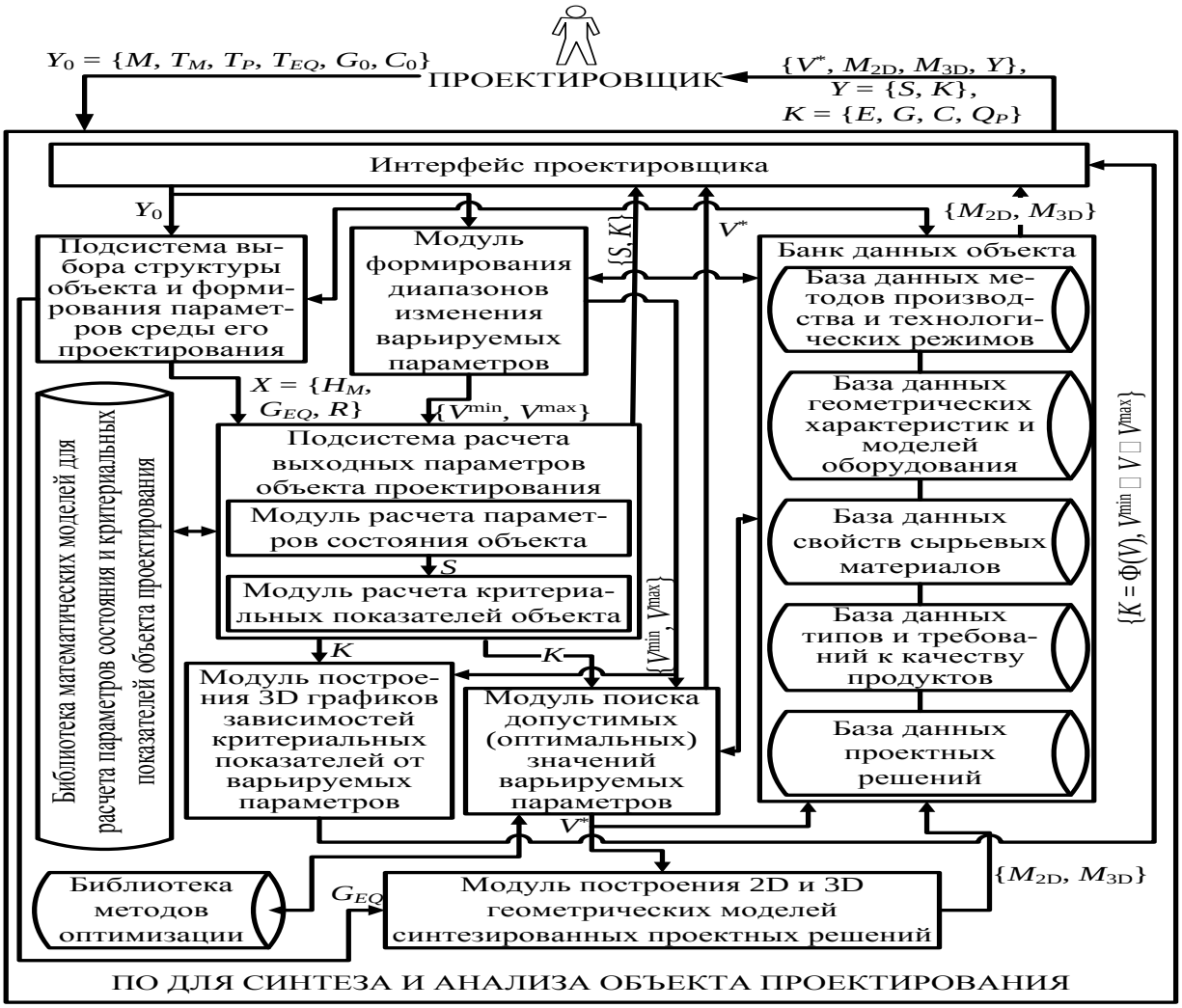


Рисунок 1 – Функциональная структура программного обеспечения для синтеза и анализа объекта проектирования

ПО для синтеза и анализа объекта проектирования включает подсистему выбора структуры объекта и формирования параметров среды его проектирования, модуль формирования диапазонов изменения варьируемых параметров объекта, подсистему расчета выходных параметров объекта и поиска допустимых (оптимальных) значений варьируемых параметров, модуль построения геометрических моделей синтезированных проектных решений, информационную подсистему, интерфейс проектировщика [3]. Синтез структуры объекта (технологического процесса) заключается в выборе по заданию на синтез и анализ объекта проектирования, вводимому проектировщиком, типов и конфигураций

технологического оборудования стадий процесса из базы данных характеристик оборудования, компоновке и размещении оборудования в производственных цехах. Параметрический синтез объекта заключается в расчете допустимых (оптимальных) значений варьируемых параметров для сформированных из банка данных значений параметров среды проектирования (независимых входных параметров), к которым относятся характеристики сырьевых материалов, геометрические и режимные параметры процесса, не подлежащие замыслу вариации в процессе проектирования. Диапазоны изменения варьируемых параметров формируются по заданию на синтез и анализ объекта проектирования с использованием базы данных технологических режимов и/или базы данных геометрических характеристик оборудования. На основе библиотеки математических моделей осуществляется расчет параметров состояния и критериальных показателей объекта в диапазонах изменения варьируемых параметров. Рассчитанные значения визуализируются на интерфейсе проектировщика в виде трехмерных графиков зависимостей критериальных показателей (энергопотребления, производительности, показателей качества продукта и др.) от варьируемых параметров для анализа характеристик объекта проектирования и передаются в модуль поиска допустимых (оптимальных) значений варьируемых параметров. Этот модуль взаимодействует с библиотекой методов оптимизации и базой данных требований к качеству продуктов. Он рассчитывает допустимые значения (обеспечивающие выполнение критериальных ограничений, например на производительность, стоимость, показатели качества продукта) или оптимальные значения (обеспечивающие экстремум целевой функции объекта – критерия проектирования, например минимум энергопотребления процесса или минимум стоимости изготовления продукта, при условии выполнения критериальных ограничений) варьируемых параметров. Допустимые (оптимальные) значения варьируемых параметров сохраняются в базе данных проектных решений вместе с построенными двумерными и трехмерными геометрическими моделями синтезированных проектных решений (например, геометрическими моделями спроектированного

оборудования, цеха или производственной линии). Полученные проектные решения – допустимые (оптимальные) значения варьируемых параметров, геометрические модели – отображаются на интерфейсе проектировщика.

Таким образом, разрабатываемый программный комплекс для выбора геометрических параметров формующей матрицы должен включать модуль расчета показателей эффективности процесса вакуумформования полимерных листов в изделия типа «круговой цилиндр», модуль построения трехмерных графиков, зависимостей показателей эффективности от варьируемых геометрических параметров, модуль поиска допустимых значений варьируемых параметров, которые обеспечивают заданные показатели эффективности, интерфейс проектировщика.

1.2 Основные методы термоформования

Термоформование объединяет несколько технологических методов: вакуумное, пневматическое, механическое, а также некоторые другие виды формования нагретых полимерных листовых или плёночных заготовок, при этом возможны их различные комбинации.

Широкое распространение процессов термоформования объясняется простотой, компактностью, относительной дешевизной используемого оборудования и технологической оснастки. Термоформование используют, прежде всего, при производстве тары и упаковки для пищевой, парфюмерной, фармацевтической, химической, нефтяной промышленностей, одноразовой посуды, а также целого ряда полых полимерных изделий, имеющих различное техническое назначение. Многие виды полимерных изделий, например, крупногабаритные и тонкостенные сложной конфигурации, можно изготовить только методами пневматического или вакуумного формования. Все вышеизложенные причины позволяют достойно конкурировать процессам термоформования с другими альтернативными методами производства изделий из полимерных материалов.

В зависимости от способа создания движущей силы процесса деформирования заготовки, в готовое изделие различают следующие

основные методы термоформования пластмасс: вакуумный, пневматический, гидравлический, механический, комбинированный[4]. На рисунке 2 представлен вакуумформовочный агрегат.

Рисунок 2 – Вакуумформовочный агрегат

При вакуумформовании плоскую заготовку из термопластичного полимерного материала, прижатую по периметру к рабочей камере формовочной машины прижимной рамой, сначала с помощью нагревательного устройства разогревают до высокоэластического состояния. Затем в полости, образованной поверхностями заготовки и формующей матрицы (или формующего пуансона), создают разряжение, в результате чего за счет возникающего перепада давления происходит формование изделия[5].

Реализация процессов пневмоформования отличается от вакуумного формования только тем, что перепад давления создают за счёт использования в качестве рабочей среды сжатого газа, как правило, сжатого воздуха, с избыточным давлением до 2,5 МПа. При гидравлическом формовании роль рабочей среды выполняет подогретая жидкость, нагнетаемая насосом под давлением 0,15 - 2,5 МПа (рисунок 3).

Рисунок 3 – Агрегат для гидравлического формования

Механическое формование (механотермоформование) отличается от процессов пневматического формования тем, что придание плоской разогретой заготовке формы готового изделия осуществляется за счёт её механической вытяжки металлическим пуансоном.

Следует отметить, что современные технологии производства предусматривают и совмещение разных методов термоформования изделий, например: пневмовакуумное, пневмомеханическое и т.п.

Реализация этого комбинированного метода формования состоит из двух этапов: на первом из них разогретую до необходимой температуры нагревателем плоскую заготовку механически вытягивают с помощью пуансона. На втором этапе вытянутую заготовку формуют в матрице за счет создания вакуума в ее полости.

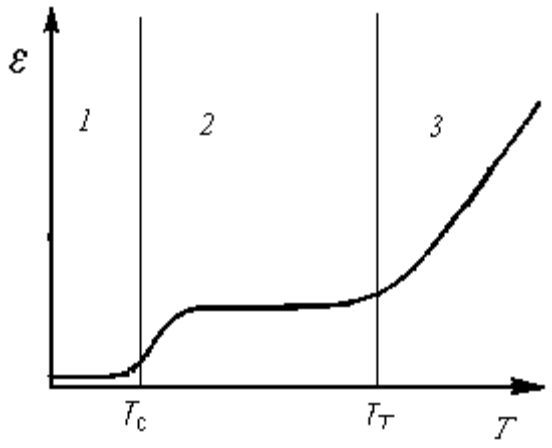
Среди всех видов пневмо и вакуумформования можно выделить три основных: позитивное, негативное и свободное[6]. При позитивном формовании (формование на пуансоне) внутренняя поверхность изделия в точности воспроизводит форму или рисунок формующего инструмента. Негативное формование (формование в матрице) дает возможность получать изделия, наружная поверхность которых в точности воспроизводит форму

или рисунок внутренней поверхности матрицы. Свободное формование осуществляют в пройме прижимной рамы машины без использования формующего инструмента. Кроме перечисленных основных, существуют и другие разновидности технологических методов термоформования изделий из плоских полимерных заготовок.

1.3 Технологические параметры процесса термоформования

Основными технологическими параметрами, определяющими протекание, процессов термоформования изделий из плоских полимерных заготовок и влияющими в конечном итоге на качество готовой продукции, являются: температура используемой заготовки, температура формующего инструмента, рабочий перепад давления при формовании, скорость формования, скорость охлаждения отформованной заготовки, геометрия формуемого изделия, свойства используемого полимерного сырья, свойства и термодинамические параметры рабочих сред и др.

Поскольку процессы переработки полимеров в изделия и детали являются, прежде всего, деформационными, то выбор оптимальной температуры для каждого конкретного метода их переработки должен, учитывая его специфику, основываться на особенностях деформационного поведения используемых материалов. Эти особенности легко устанавливают из анализа термомеханической кривой. Анализ приведённой термомеханической кривой на рисунке 4 показывает, что для полимерных материалов характерны три ярко выраженные области, определяющие различную степень их деформируемости и соответствующие различным релаксационным (термомеханическим) состояниям полимеров: стеклообразному, высокоэластическому и вязкотекучему[5].



ТС – температура стеклования; ТТ – температура текучести; 1, 2, 3 – области стеклообразного, высоко эластического и вязкотекучего релаксационных состояний полимера соответственно.

Рисунок 4 – Термомеханическая кривая

Стеклообразное состояние полимеров характеризуется отсутствием движения макромолекулярных цепей или их сегментов. Тепловое движение в материале проявляется лишь в колебаниях атомов. Приложение в таких условиях к полимеру внешней нагрузки может приводить лишь к изменению в его макромолекулярной структуре средних межатомных расстояний и валентных углов химических связей. Поэтому деформационное поведение полимеров в таком состоянии и обычных упругих твёрдых тел ничем не отличается, а развивающиеся в таких условиях в полимерах деформации являются полностью упруго обратимыми.

Если полимерный материал нагреть до температуры, превышающей температуру его стеклования, то он переходит в следующее релаксационное состояние – высокоэластическое, когда появляется подвижность отдельных сегментов макромолекулярной цепи полимера, а материал становится более мягким и эластичным. Однако ещё стабильно существующие в его структуре надмолекулярные образования, например микроблоки, препятствуют относительному смещению молекулярных цепей в целом. Приложение в таком состоянии к полимеру внешней нагрузки приводит к изменению (уменьшению) конфигурационной энтропии состояния макромолекул, которые, «разворачиваясь» из статистического клубка, лишь ориентируются

в направлении приложенной нагрузки, при этом тепловое движение звеньев цепи противодействует внешней нагрузке. При снятии нагрузки цепи возвращаются в исходное состояние, а следовательно, высокоэластическая деформация также, как и упругая, является полностью обратимой деформацией, но в отличие от последней имеет энтропийную природу[4].

При дальнейшем нагревании полимера выше некоторой температуры, называемой температурой текучести, надмолекулярные образования становятся столь нестабильными, что появляется возможность в относительном смещении цепей макромолекул друг относительно друга при приложении к нему внешней нагрузки. Последнее обстоятельство и обеспечивает течение полимерных сред в этом состоянии, при этом деформации течения являются необратимыми, а само состояние полимера называют вязкотекучим. Особо следует отметить, что деформирование полимеров в вязкотекучем релаксационном состоянии вовсе не означает того, что развивающиеся в них деформации являются исключительно деформациями течения.

В зависимости от режимов и кинематики деформирования, реологических свойств полимерных сред в последних, наряду с деформациями течения, развиваются и высокоэластические деформации определённого уровня. Поскольку все процессы термоформования предусматривают стадию разогрева заготовки, поверхность которой находится в свободном состоянии, то, чтобы заготовка не имела возможности сильно деформироваться на этой технологической стадии под действием гравитационных сил, её разогрев ведут до момента достижения полимером высокоэластического состояния.

Нагревание заготовки до вязкотекучего состояния приводит к её достаточно быстрой гравитационной вытяжке (провисанию) и, как следствие, к невозможности реализации стадии формования изделия. С другой стороны, температура формуемой заготовки не должна находиться вблизи границы стеклообразного и высокоэластического состояний полимера, поскольку при формовании изделия в этом случае возможна неполная его проформовка. Таким образом, рабочая температура формуемой полимерной заготовки

является одним из основных технологических параметров, определяющих реализацию процессов термоформования. В таблице 1 приведены ориентировочные температурные режимы, при которых проводят термоформование полимерных изделий из плоских заготовок в промышленности.

Таблица 1 – Температурные режимы процесса термоформования

Материал заготовки	Температура формования, ^{o}C	Предел прочности на разрыв, МПа
Поливинилхлорид (ПВХ)	100-160	13,7-18,6
Поликарбонат (ПК)	190-230	50-70
Полиметилметакрилат (ПММА)	120-200	40-66
Полистирол ударопрочный (ПС)	110-150	40-46
Полипропилен (ПП)	150-200	29-40
Полиэтилен высокой плотности (ПВП)	120-135	18-26
Полиэтилен низкой плотности (ПНП)	90-135	6,8-14,7

Кроме того, следует отметить важность реализации самого процесса разогрева заготовок. Во-первых, этот процесс достаточно длителен и составляет примерно 50 - 80% общего времени цикла формования изделия. Во-вторых, разогрев заготовок следует вести так, чтобы температура во всех точках их поверхности в любой момент времени была одинакова. Неравномерный разогрев ведет к неравномерному деформированию заготовки в процессе её формования в изделие и образованию складок на поверхности последнего. В результате неравномерного разогрева на поверхности заготовки могут образовываться отдельные перегретые области, а при формовании в этих областях может произойти разрыв заготовки.

Температура формующего инструмента влияет на процесс охлаждения отформованного изделия. Очевидно, что она должна быть ниже

температуры стеклования полимера, иначе достаточного охлаждения заготовки не произойдет, и изделие может потерять свою форму. Также очевидно, что чем ниже температура формующего инструмента, тем быстрее охлаждение и выше производительность формовочного оборудования. Но при очень низкой температуре формующего инструмента на поверхности отформованного изделия появляются пятна переохлаждения, и повышается его склонность к короблению[5].

При пневматических методах формования изделий такие технологические параметры этих процессов, как текущие значения необходимого для их реализации перепада давления, скорости формования (формообразования) изделия, которое определяется временем, и давление сжатого газа, истекающего в рабочую полость, являются взаимосвязанными. Реализуемый при формовании изделия текущий рабочий перепад давления определяется эластическими характеристиками полимерного материала, толщиной стенки исходной заготовки, а также развивающимися в процессе её формования в изделие эластическими деформациями. Использование «жестких» полимерных материалов или исходных заготовок, имеющих относительно большую толщину, требует создания и относительно больших перепадов давления, обеспечивающих достаточную проформовку изделия. При «мягком» материале или тонкостенных заготовках создание высоких скоростей их деформирования может приводить к механическому разрушению (разрыву) последних в процессе формования изделий.

Сложность процессов термоформования полимерных материалов предопределяет необходимость использования в составе разрабатываемого программного комплекса математической модели процесса вытяжки, позволяющей рассчитать показатели качества формованного изделия и выбрать геометрические параметры матрицы, обеспечивающие заданное качество изделия.

1.4 Обзор и обоснование выбора инструментальных средств разработки программного обеспечения для синтеза и анализа объектов проектирования

В настоящее время существует огромное количество сред разработки программного обеспечения рассмотрим некоторые из них. C++ Builder - программный продукт, инструмент быстрой разработки приложений (RAD), интегрированная среда программирования (IDE), система, используемая программистами для разработки программного обеспечения на языке C++. Изначально, разрабатывался компанией Borland Software, а затем её подразделением CodeGear, которое сейчас принадлежит компании Embarcadero Technologies. C++ Builder объединяет в себе комплекс объектных библиотек (STL, VCL, CLX, MFC и др.), компилятор, отладчик, редактор кода и многие другие компоненты. Цикл разработки аналогичен Delphi. Большинство компонентов, разработанных в Delphi, можно использовать и в C++ Builder без модификации, но, к сожалению, обратное утверждение не верно. C++ Builder содержит инструменты, которые при помощи drag - and - drop действительно делают разработку визуальной, упрощает программирование благодаря встроенному WYSIWYG - редактору интерфейса[7].

Delphi и C++Builder предоставляют совершенный инструментарий для разработчиков программного обеспечения и баз данных, который позволяет быстро разрабатывать высокопроизводительные и простые в обслуживании приложения для Windows. С помощью мощной интегрированной среды разработки, визуального редактора интерфейса, обширного набора компонент и полноценной поддержки разных баз данных стало возможным создавать качественные приложения гораздо быстрее и эффективнее.

Builder имеет встроенную поддержку стандарта Unicode, которая обеспечит единообразие приложений, работающих под управлением локализованных версий ОС Windows. Также предоставляются инструменты для перевода собственных продуктов на ряд других языков[8].

Эффективность разработки и отладки приложений достигается не только за счет использования удобных средств визуального проектирования форм (сейчас это не редкость), но и за счет, во-первых, высокой производительности самих компиляторов Borland и, во-вторых, так называемой инкрементной компиляции и компоновки исполняемого модуля (когда перекомпиляции и перекомпоновке подвергаются только те модули, в которые были внесены изменения).

Компоненты TeeChart знакомы всем пользователям последних версий Delphi и C++Builder - они входят в состав этих продуктов. Версия этих компонентов TeeChart-Pro, поставляемая отдельно, обладает рядом дополнительных возможностей. В частности, при использовании профессиональной версии возможно использование редактора свойств графика не только из среды разработки, но и из готового использующего его приложения. Помимо этого, пользователям профессиональной версии продукта доступны некоторые дополнительные типы графиков:"Candle", "ErrorBar", "Volume", "Surface", "Polar" .

Обновленная библиотека компонентов Visual Component Library (VCL) предлагает элемент управления Ribbon, позволяющий разрабатывать пользовательские интерфейсы в стиле Microsoft Office, а также поддерживает изображения в формате PNG. Версии Delphi и C++Builder Architect Editions включают в себя инструментарий ER/Studio Developer Edition для быстрой разработки высокопроизводительных и масштабируемых приложений с базами данных[9].

1.5 Выводы по аналитическому обзору.

1) Анализ функциональной структуры программного обеспечения для синтеза и анализа объектов проектирования и характеристик процесса термоформования полимерных изделий типа «круговой цилиндр» позволил обосновать функциональную структуру программного комплекса для выбора геометрических параметров процесса, которая включает:

модуль расчета распределения толщины стенок по высоте формованного изделия;

модуль расчета индекса разнотолщинности и средней толщины стенок формованного изделия;

модуль поиска допустимых значений геометрических параметров формующей матрицы;

модуль построения трехмерных графиков зависимости показателей качества изделия типа «круговой цилиндр» от диаметра и глубины формующей матрицы;

Анализ инструментов средств разработки ПО позволил выбрать среду разработки Borland C++ Builder 6, так как в этой среде есть возможность построения 3D графиков, в основе этой среды лежит язык программирования C++, нашедший более широкое распространение при написании прикладных программ. Выбор этой среды разработки связан так же со следующими факторами:

- простота использования,
- интуитивно понятный интерфейс,
- большая функциональность (возможность работы с базами данных, создание эргономичных пользовательских интерфейсов).

2. Цель и задачи о проектирования

Цель данного проекта – разработка гибкого программного комплекса, позволяющего найти такие геометрические параметры агрегата для термоформования изделия типа «круговой цилиндр» (диаметр днища и глубина матрицы), при которых разнотолщинность формуемого изделия будет требуемой, а средняя толщина стенок изделия будет находиться в заданном диапазоне.

Для выполнения этой цели нужно решить следующие задачи:

1. Разработать информационное описание процесса вакуумного термоформования полимерных материалов в изделия типа «круговой цилиндр» по негативной схеме как объекта проектирования.
2. Сформулировать задачу поиска геометрических параметров (диаметр днища и глубины матрицы) агрегата для термоформования.
3. Разработать функциональную структуру программного комплекса для поиска геометрических параметров процесса вакуумного термоформования.
4. Построить алгоритм расчета критериальных показателей процесса вакуумного формования и поиска геометрических параметров формовочного агрегата.
5. Разработать программное обеспечение для поиска геометрических параметров процесса вакуумного термоформования, интерфейсы для настройки на характеристики материала и агрегата.
6. Протестировать работу программного комплекса на примере агрегата для вакуумного термоформования изделий типа «круговой цилиндр» из ударопрочного полистирола.

3. Технологическая часть

3.1 Информационное описание процесса термоформования как объекта проектирования.

Информационное описание процесса термоформования представлено на рисунке 5.

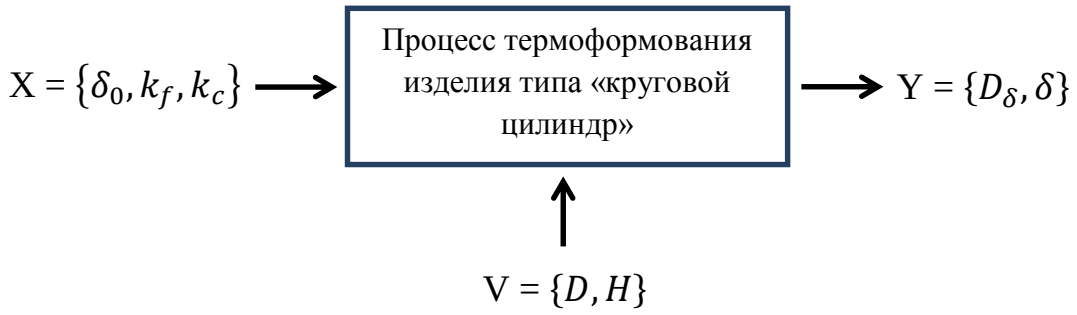


Рисунок 5 – Информационное описание процесса термоформования как объекта проектирования

Постановка задачи поиска геометрических параметров матрицы:

Для заданных характеристик полимерного материала H_M и конфигурации формуемого изделия (круговой цилиндр) по математической модели процесса вакуумного формования определить допустимые значения диаметра $D \in [D_{\min}, D_{\max}]$ и глубины $H \in [H_{\min}, H_{\max}]$ формующей матрицы, которые обеспечивают выполнение ограничений на среднюю толщину и индекс разнотолщинности стенок изделия.

$$\delta_{min} \leq \bar{\delta}(H_M, \mathrm{D}, \mathrm{H}) \leq \delta_{max}, \;\; D_\delta(H_M, \mathrm{D}, \mathrm{H}) \leq D_\delta^{max}$$

В постановке задачи использованы следующие обозначения:

H_M – вектор характеристик полимерного материала;

D – диаметр формующей матрицы агрегата для термоформования, м;

H – глубина формующей матрицы агрегата для термоформования, м;

$D_{\min}$, $D_{\max}$ – пороговые значения диаметра формующей матрицы, зависящие

от метода формования и типа полимерного материала, м;

H_{min}, H_{max} – пороговые значения глубины формующей матрицы, зависящие от метода формования и типа полимерного материала, м;

D_{δ} – индекс разнотолщинности стенок формованного изделия, %;

$\overline{\delta}$ – средняя толщина стенок формованного изделия, м;

δ_{min}, δ_{max} – предельно допустимые значения толщины стенок формованного изделия, м;

D_{δ}^{max} – предельно допустимый индекс разнотолщинности стенок формованного изделия, %.

3.2 Функциональная структура программного комплекса

Функциональная структура програмного комплекса приведена на рисунке 6.

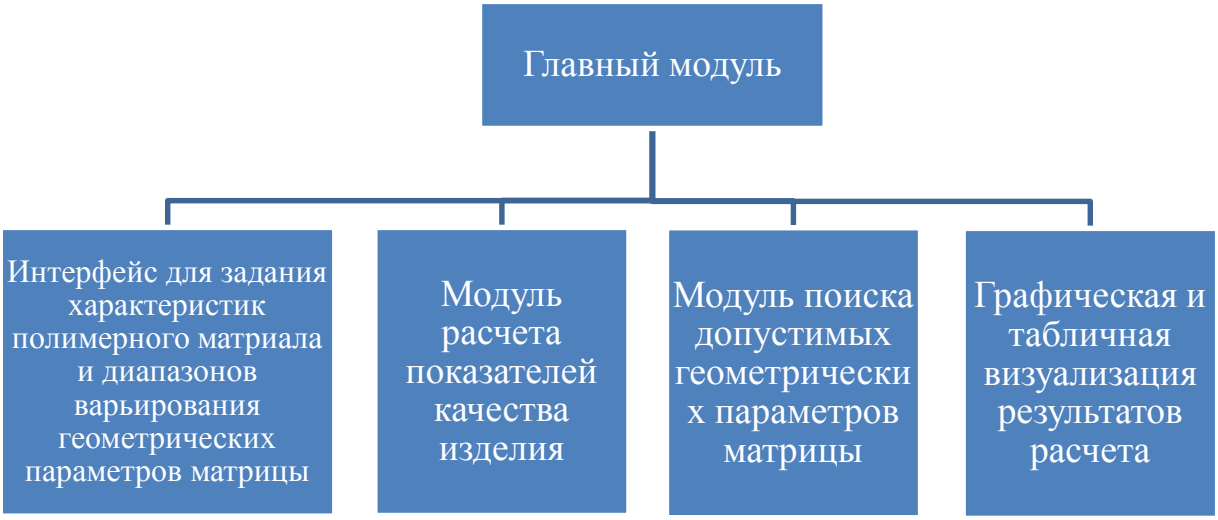


Рисунок 6 – Функциональная структура програмного комплекса

3.3 Математическая модель процесса негативного вакуумного термоформования изделий типа «круговой цилиндр» [10, 11]

Расчет распределения толщины стенок по высоте формованного изделия:

$$\delta(h_j) = \frac{1}{2} \cdot \delta_0 \cdot k_f \cdot \exp(-\frac{2 \cdot h_j}{D} \cdot k_c)$$

Расчет координаты по высоте формованного изделия h_j:

$$h_j = j \cdot \frac{H}{M}, \qquad j = \overline{0, M}$$

Расчет средней толщины стенок формованного изделия:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{j=0}^{M} \delta(h_j)$$

Расчет индекса разнотолщинности стенок формованного изделия:

$$D_\delta = \left(1 - \frac{\delta_m}{\bar{\delta}}\right) \cdot 100, \text{ где}$$

Минимальная толщина стенок формованного изделия определяется по формуле:

$$\delta_m = \min_{0 \le h_j \le H} \delta(h_j)$$

3.4 Алгоритм расчета распределения толщины стенок по высоте формованного изделия

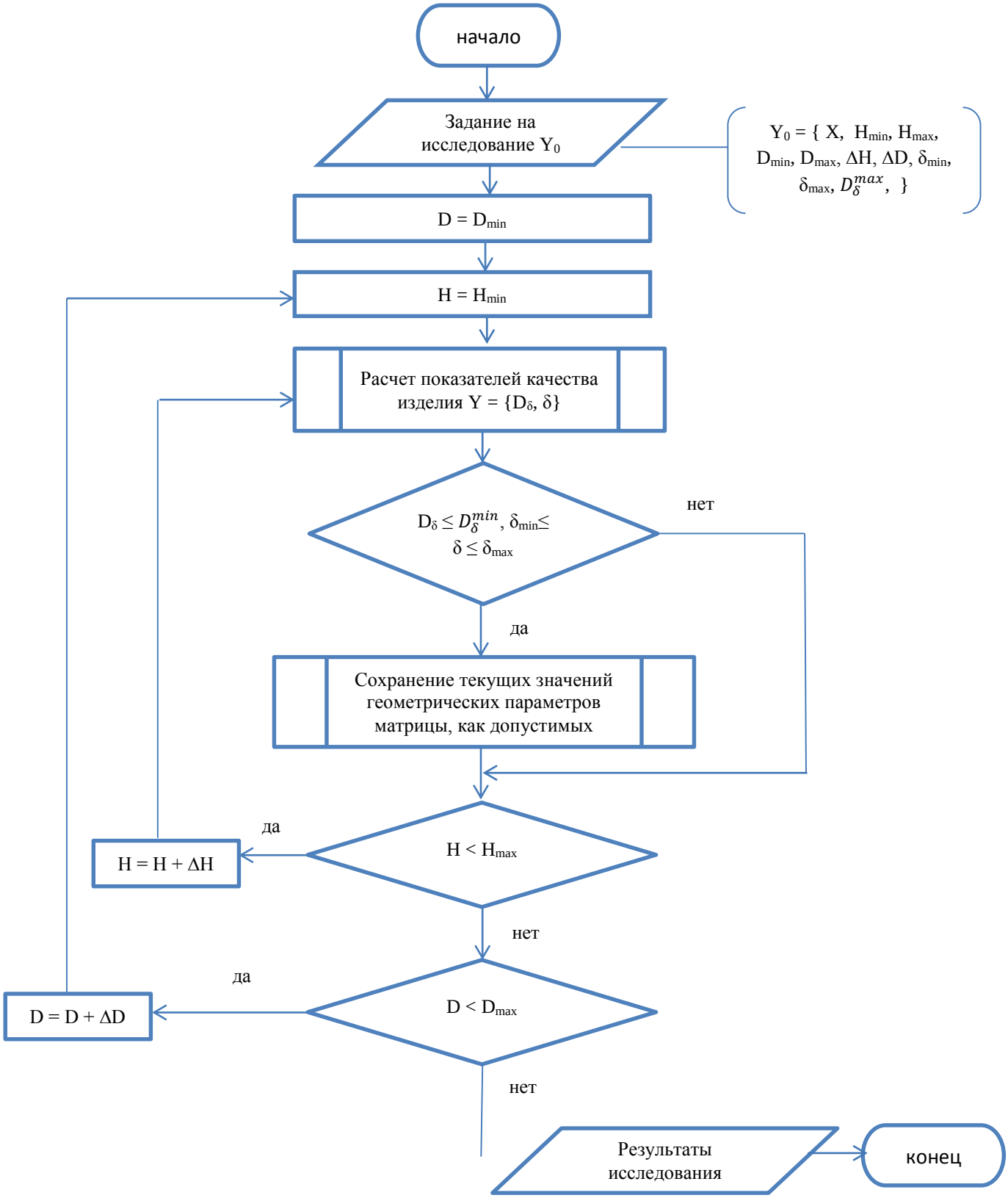


Рисунок 7 – Алгоритм поиска геометрических параметров

3.5 Диаграмма прецедентов использования

Пользователем программного комплекса для выбора геометрических параметров процесса вакуумформования изделий типа «круговой цилиндр» является проектировщик. UML-диаграмма вариантов использования программного комплекса проектировщиком представлена на рисунке 8.

Рисунок 8 – Диаграмма варианта использования программного комплекса для проектировщика

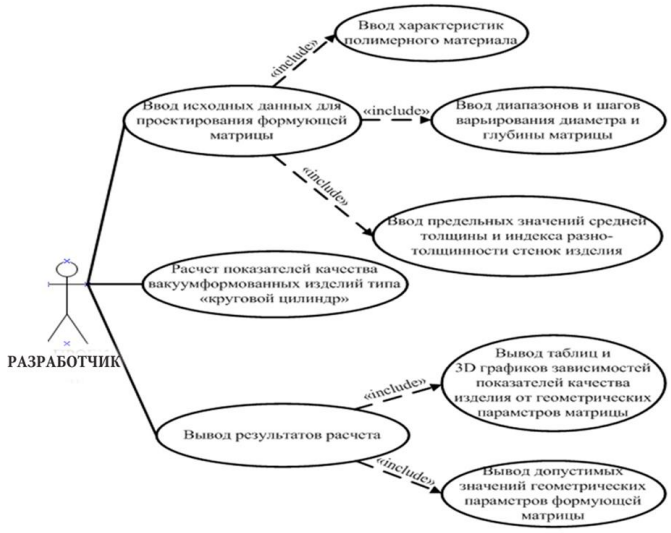


Рисунок 9 – Диаграмма варианта использования программного комплекса для разработчика

Проектировщик вводит с клавиатуры минимальную и максимальную глубину формующей матрицы, минимальный и максимальный диаметр формующей матрицы, шаги варьирования диаметра и глубины формующей матрицы, толщину заготовки, коэффициент утяжки полимерного материала, коэффициент охлаждения формуемого полимерного материала. Программный комплекс на основе формул математической модели рассчитывает среднюю толщину стенок и индекс разнотолщинности стенок формуемого изделия. Далее для определения требуемых показателей пректировщик вводит минимальную, максимальную среднюю толщину, а также максимальный индекс разнотолщинности. На основе введённых данных програмный комплекс осуществляет поиск допустимых значений геометрических параметров матрицы и формирует результаты исследования в виде 3D графиков.

3.6 Структура и характеристика программного обеспечения

Структура программного обеспечения для выбора геометрических параметров процесса термоформования полимерных материалов представлена на рисунке 10.

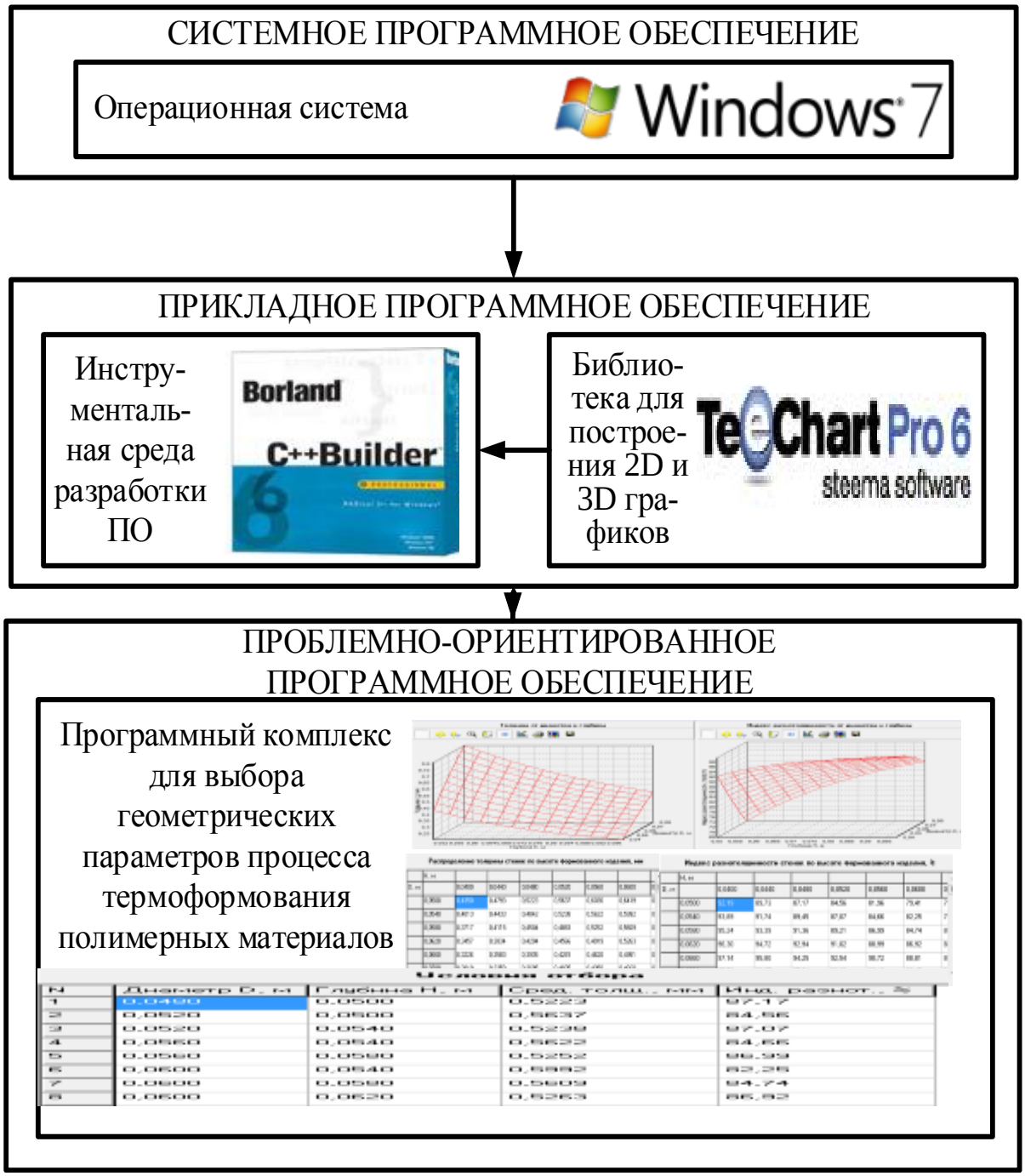


Рисунок 10 – структура ПО

Разработанный программный комплекс работает под управлением операционной системы Microsoft Windows 7 Professional. Вычислительные компоненты проблемно-ориентированного программного обеспечения (подсистема расчета критериальных показателей процесса термоформования, модуль поиска допустимых значений геометрических параметров процесса

термоформования, интерфейс проектирования) разработано в среде визуального объектно-ориентированного программирования Borland C++ Builder 6. Для построения трехмерных графиков зависимостей критериальных показателей от варьируемых параметров и трехмерных графиков ограничений на критериальные показатели использована графическая библиотека TeeChart Pro 6.01.

Характеристика проблемно-ориентированного программного обеспечения приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика проблемно-ориентированного программного обеспечения для исследования процесса нагрева

Показатель	Значение
Средства разработки	Borland C++ Builder 6, TeeChart Pro 6.01
Технология программирования	Объектно-ориентированное программирование
Язык программирования	C++
Размерность математической модели	5 формул
Количество входных переменных	11
Количество внутренних переменных	2
Количество выходных переменных	2
Количество классов, структур	1
Количество функций	5
Объем исполняемого файла, Кб	2413
Время расчета и визуализации результатов для одного набора исходных данных, мс	17

Требования к ЭВМ, системному и прикладному программному обеспечению, необходимым для нормального функционирования проблемно-ориентированного программного обеспечения, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Минимальные системные требования

Показатель	Значение
Тип ЭВМ	IBM PC-совместимый компьютер на базе микропроцессора Pentium
Тактовая частота процессора, МГц	500
Объем оперативной памяти, Кб	16000
Объем внешней памяти, Кб	64000
Состав и характеристика периферийных устройств ЭВМ	Монитор жидкокристаллический (15″), клавиатура, мышь
Операционная система	Microsoft Windows 98
Прикладное программное обеспечение	Не требуется

3.7 Тестирование программного комплекса

Исходные данные для функционального тестирования программного комплекса для выбора геометрических параметров процесса термоформования полимерных материалов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Данные для тестирования программного комплекса

Обозначение параметра	Значение параметра	Единица измерения
δ_0	0,0025	м
H_{min}	0,05	м
H_{max}	0,1	м
D_{min}	0,04	м
D_{max}	0,08	м
dH	0,004	м
dD	0,004	м
M	20	
K_f	1,6	
K_c	1,63	

Интерфейс проектировщика для ввода задания на исследование процесса термоформования листа из полистирола представлен на рисунке 11.

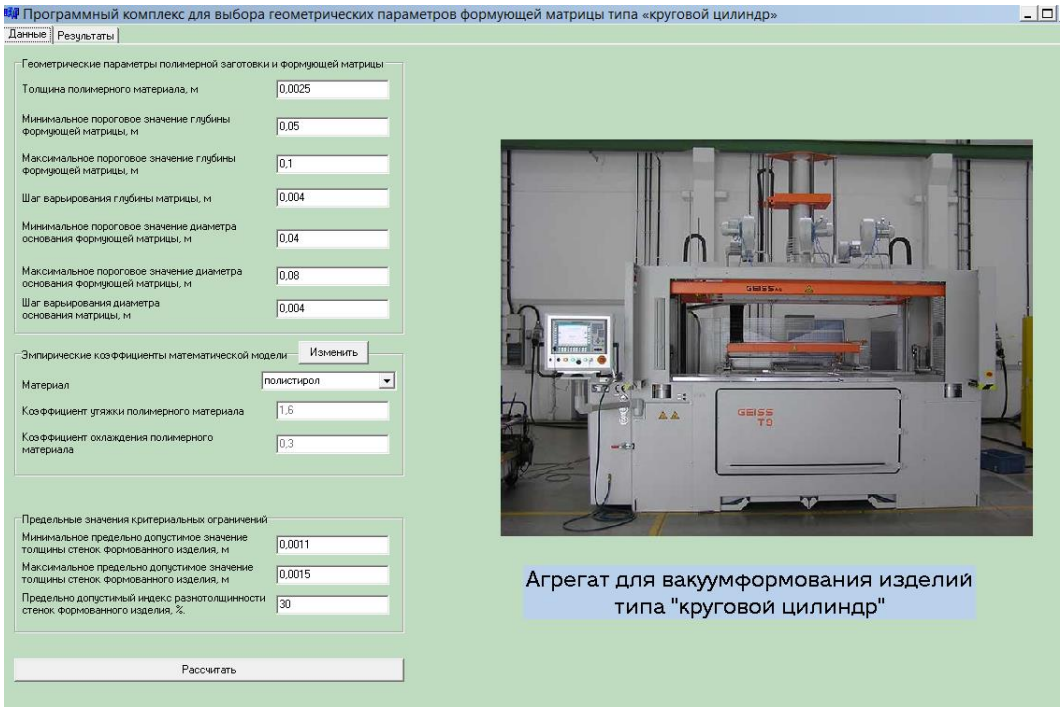


Рисунок 11 – Интерфейс для ввода задания на исследование

По введенному заданию на исследование рассчитываются показатели качества изделия – средняя толщина стенок и индекс разнотолщинности формуемого изделия, которые отображаются на интерфейсе проектировщика в виде трехмерных графиков и таблиц, как показано на рисунках 12 и 13.

Глубина, м / Диаметр, м	0,05	0,054	0,058	0,062	Print 6	0,07	0,074
0,06	0,001594	0,001566	0,00154	0,001514	0,001488	0,001464	0,00144
0,064	0,001615	0,001589	0,001564	0,001539	0,001515	0,001491	0,001467
0,068	0,001635	0,00161	0,001586	0,001562	0,001538	0,001515	0,001493
0,072	0,001653	0,001629	0,001605	0,001582	0,00156	0,001538	0,001516
0,076	0,001669	0,001646	0,001623	0,001601	0,001579	0,001558	0,001537
0,08	0,001683	0,001661	0,001639	0,001618	0,001597	0,001576	0,001556

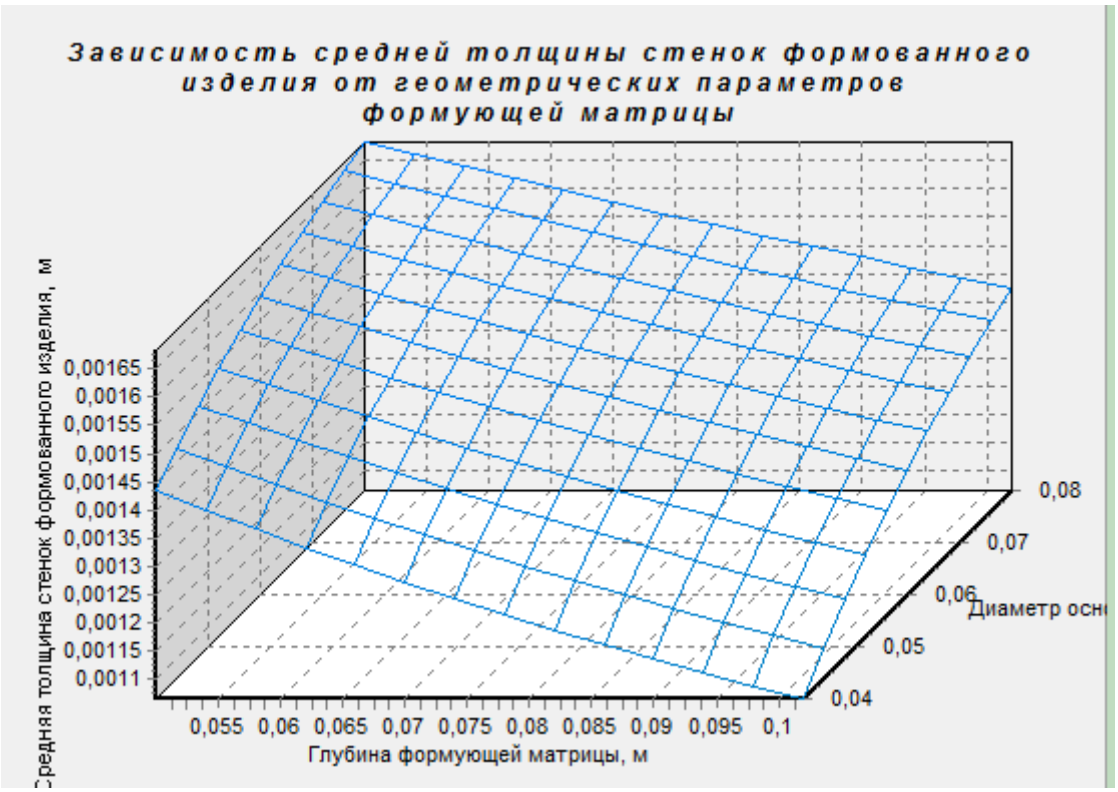


Рисунок 12 Зависимость средней толщины стенок от глубины и диаметра формующей матрицы

Как видно из рисунка 12, с увеличением глубины формующей матрицы в процессе термоформования средняя толщина полимерного материала (листа из полистирола) уменьшается, с увеличением диаметра средняя толщина возрастает.

Глубина, м / Диаметр, м	0,05	0,054	0,058	0,062	0,066	0,07	0,074
0,04	34,1	36,39	38,62	40,78	42,89	44,94	46,92
0,044	31,42	33,57	35,67	37,71	39,71	41,65	43,55
0,048	29,13	31,15	33,13	35,06	36,95	38,8	40,6
0,052	27,14	29,05	30,92	32,75	34,54	36,3	38,02
0,056	25,41	27,21	28,98	30,72	32,43	34,1	35,74
0,06	23,88	25,59	27,27	28,92	30,55	32,14	33,71
0,064	22,52	24,15	25,75	27,32	28,87	30,4	31,9

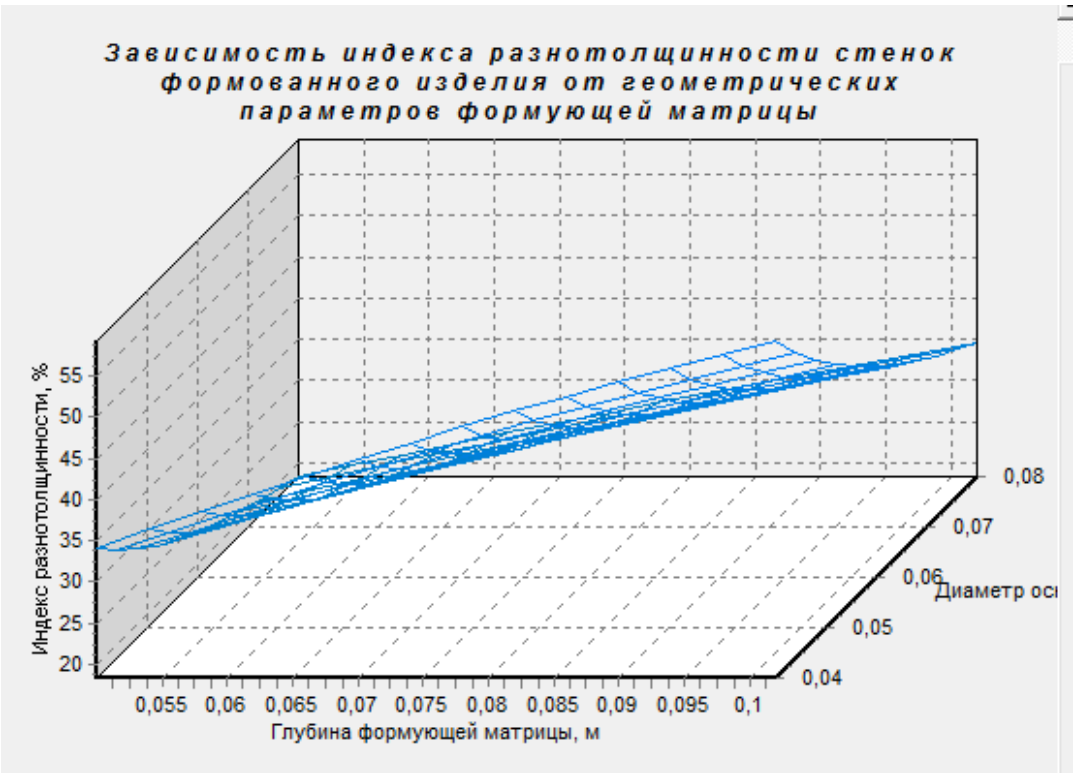


Рисунок 13 Зависимость индекса разнотолщинности стенок от глубины и диаметра формующей матрицы

Как видно из рисунка 13, с увеличением глубины формующей матрицы в процессе термоформования индекс разнотолщинности полимерного материала (листа из полистирола) увеличивается, с увеличением диаметра индекс разнотолщинности уменьшается.

Характер зависимости средней толщины и индекса разнотолщинности стенок изделия типа «круговой цилиндр» по глубине и диаметру формующей матрицы соответствует теории и практике термоформования полимерных материалов при изготовлении полых объемных изделий[5, 6].

Заданные проектировщиком предельные значения показателей качества изделия отображаются в виде плоскостей на трехмерных графиках зависимостей показателей качества от геометрических параметров, как показано на рисунке 14.

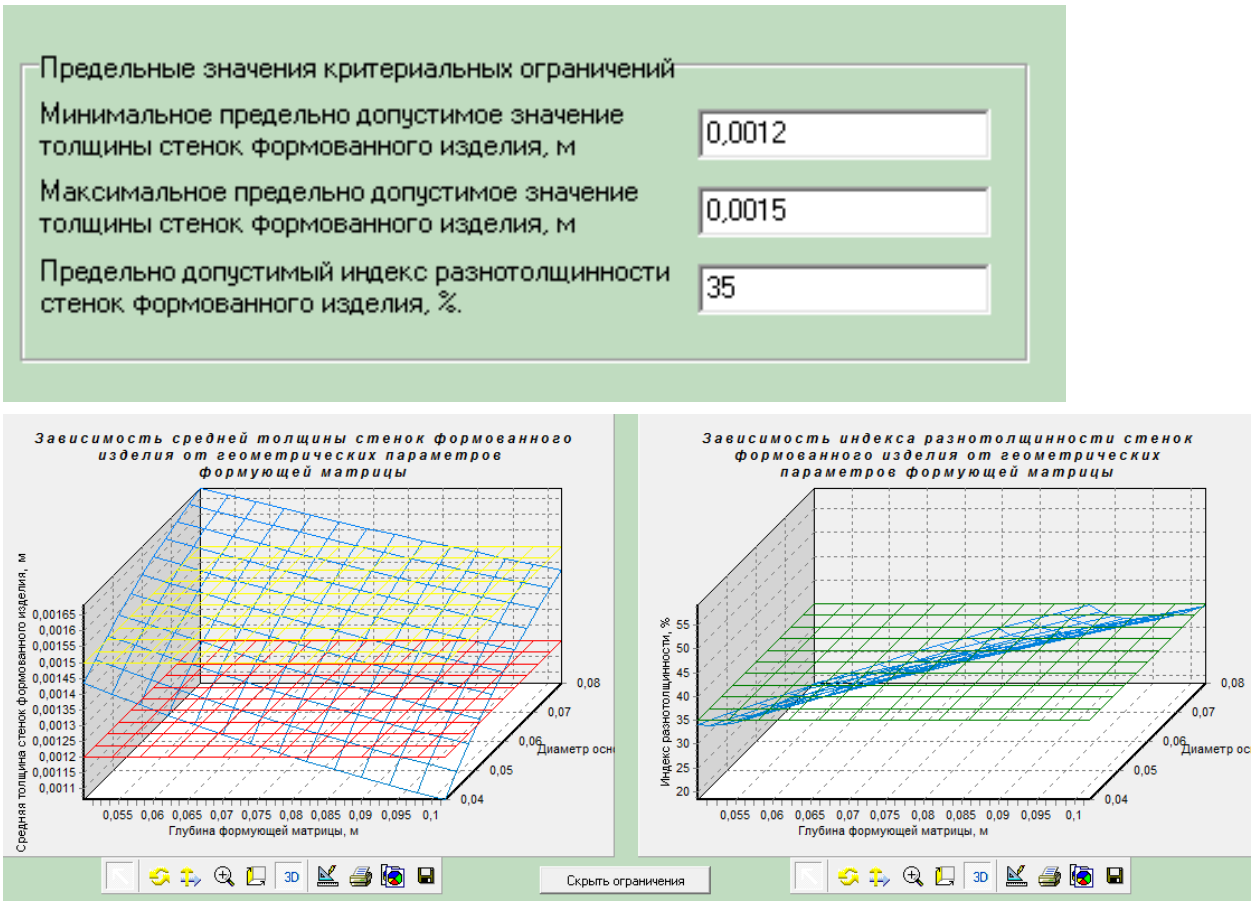


Рисунок 13 - Зависимости показателей качества изделия от геометрических параметров и предельные значения показателей качества

Массив допустимых геометрических параметров матрицы для заданных предельных значений средней толщины и индекса разнотолщинности отображается на интерфейсе в виде таблицы как показано на рисунке 15.

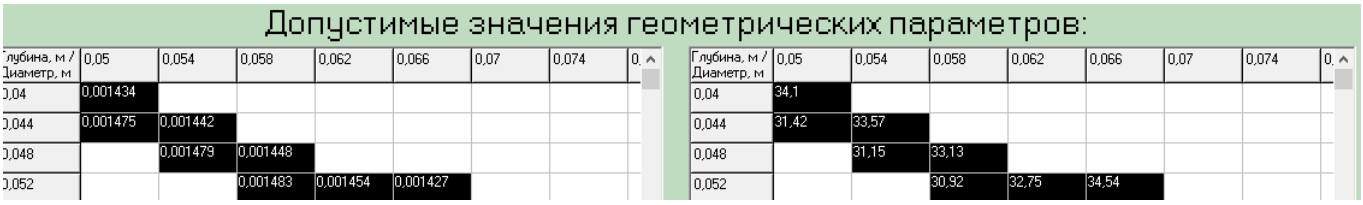


Рисунок 15 - Массив допустимых геометрических параметров матрицы

Таким образом, результаты тестирования подтвердили работоспособность программного комплекса для данного класса объектов проектирования.

Для разработчика САПР в данном приложении предусмотрена

возможность изменять эмпирические коэффициенты для выбранного типа материала

kc – коэффициент охлаждения формуемого полимерного материала, характеризующий степень охлаждения материала после приведения в контакт со стенками формующей матрицы;

kf – коэффициент утяжки полимерного материала, характеризующий степень утяжки материала в полость формующей матрицы из пространства, ограниченного отверстием зажимной рамы, но не находящегося над полостью матрицы, а также из-под самой зажимной рамы.

Для получения такой возможности, разработчику необходимо ввести пароль (admin) в предлагаемую форму. Образец формы представлен на рисунке 16. Только после авторизации становятся доступными возможности изменения.

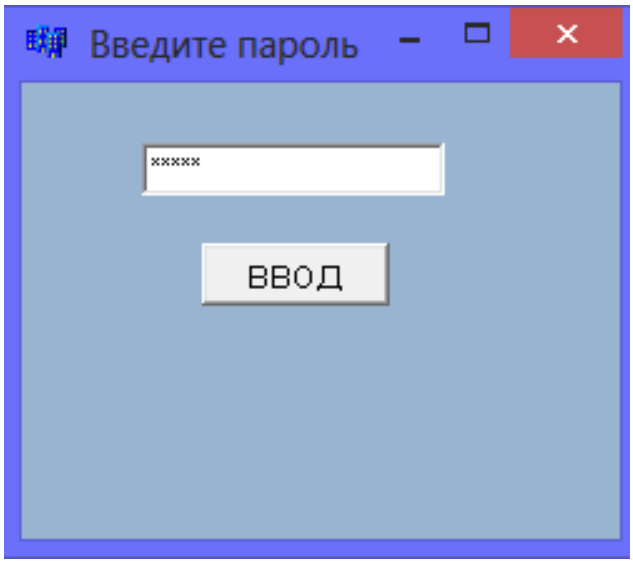


Рисунок 16 - Форма для ввода пароля

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения проекта, связанного с разработкой гибкого проблемно - ориентированного программного комплекса для поиска допустимых значений геометрических параметров формующей матрицы процесса термоформования полимерных изделий типа «круговой цилиндр», достигнуты следующие результаты:

1) Проведен анализ функциональной структуры программного обеспечения для синтеза и анализа объектов проектирования (многоассортиментных технологических процессов) и характеристик процесса термоформования полимерных материалов, который позволил разработать информационное описание процесса термоформования полимерных материалов типа «круговой цилиндр» как объекта проектирования и функциональную структуру программного комплекса для выбора геометрических параметров процесса, включающую:

модуль расчета показателей качества (средней толщины, индекса разнотолщинности) изделия;

модуль поиска допустимых геометрических параметров (диаметра, глубины) цилиндрической формующей матрицы;

интерфейс для задания характеристик полимерного материала и диапазонов варьирования геометрических параметров матрицы, графической и табличной визуализации результатов расчета.

2) Разработан алгоритм поиска геометрических параметров формующей матрицы, обеспечивающих выполнение требований к показателям качества готового изделия.

3) Разработано программное обеспечение для поиска диаметра и глубины матрицы, обеспечивающих заданную среднюю толщину и индекс разнотолщинности формованного изделия типа «круговой цилиндр».

4) Тестирование программного обеспечения на примере исследования процесса вакуумного термоформования листов из полистирола подтвердило работоспособность программного комплекса для заданного класса объектов проектирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Норенков, И. П. Автоматизированные информационные системы : учеб.пособие для вузов / И. П. Норенков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 342 с.

2 Интеллектуальные системы технологического проектирования, управления и обучения в многоассортиментном производстве гранулированных пористых материалов из тонкодисперсных частиц / Т. Б. Чистякова [и др.]. – СПб. : Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2012. – 324 с.

3 Чистякова, Т. Б. Основы разработки автоматизированных систем : конспект лекций / Т. Б. Чистякова, И. В. Новожилова, А. Н. Полосин ; СПбГТИ(ТУ). – СПб., 2012.

4 Шерышев, М. А. Пневмовакуумформование/ М. А. Шерышев . – СПб. : Профессия , 2010. – 192 с.

5 Иллиг, А. Термоформование. Практическое руководство / А. Иллинг, П. Шварцман; пер. с англ., под ред. М. А. Шерышева. – СПб.: Профессия, 2007. – 288 с.

6 Технологии вакуумного формования и пневмоформования[Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www/vfmspb.ru/vakuumopis.htm, свободный. – Загл. с экрана.

7 Чистякова, Т. Б. Программирование на языках высокого уровня. Базовый курс : учеб. пособие / Т. Б. Чистякова, Р. В. Антипин, И. В. Новожилова ; СПбГТИ(ТУ). – СПб. : [б. и.], 2008. – 101 с.

8 Рогов, А. Ю. Технологии программирования : учеб. пособие / А. Ю. Рогов, О. В. Проститенко ; СПбГТИ(ТУ). – СПб. : [б. и.], 2010. – 111 с.

9 Тенишев, Д. Ш. Лингвистическое и программное обеспечение автоматизированных систем : учеб.пособие для вузов / Д. Ш. Тенишев ; под ред. Т. Б. Чистяковой. – СПб. : ЦОП «Профессия», 2010. – 403 с.

10 Шерышева, М. А. Математическое описание процессов переработки пластмасс: учеб. Пособие для вузов / М. А. Шерышев. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2005. – 144 с.,

11 Полосин, А. Н. Моделирование процессов пневмовакуумного термоформования неметаллических материалов / А. Н. Полосин, А. П. Григорьев // Информационные технологии моделирования и управления. – 2009. – № 5. – С. 728 – 735.