

## ТРЕНАЖЕРНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ОБЪЕМНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ТЕРМОФОРМОВАНИЯ

Т.Б. Чистякова, А.Н. Полосин, Е.В. Кузьменков (СПбГТИ(ТУ))

*Представлен проблемно-ориентированный программный комплекс, предназначенный для тренинга операторов процессов термоформования полимерных материалов в перенастраиваемых многоассортиментных производствах упаковок фармацевтических препаратов и пищевых продуктов. Ядром комплекса является гибкая многовариантная система моделирования процессов пневмовакуумного и механического термоформования, позволяющая исследовать объект изучения в различных режимах функционирования и отрабатывать навыки выбора управляющих воздействий для предотвращения брака и обеспечения наилучшего качества (толщины, равнотолщинности) изделий.*

*Ключевые слова: тренажеростроение, имитационное моделирование, базы данных, базы знаний, программные комплексы, термоформование, полимерные материалы, разнотолщинность.*

### Введение

В настоящее время одной из ключевых проблем фармацевтической и пищевой промышленности является обеспечение необходимой длительности гарантийной сохранности продукции без изменения ее потребительских свойств, на которые при хранении и транспортировке влияют кислород воздуха, водяные пары, свет, микроорганизмы. Степень воздействия вредных факторов окружающей среды на качество продукции зависит от эксплуатационных характеристик (газо- и паропроницаемости, прочности) тароупаковочных средств. Применение фармацевтических препаратов и пищевых продуктов, хранимых в упаковках ненадлежащего качества, является опасным для жизни и здоровья людей, приводит к большим экономическим потерям производителей и поставщиков продукции. Основной сегмент на рынке упаковочных средств занимают полые объемные изделия, изготавливаемые из аморфных и кристаллических полимерных материалов методом термоформования. Он позволяет получать тонкостенные изделия различной конфигурации, а простота изготовления формующих инструментов (матриц, пуансонов) и относительно низкая их стоимость обеспечивают невысокую себестоимость продукции как при получении малых серий, так и при крупносерийном производстве, что важно в условиях усиливающейся конкурентной борьбы.

Термоформование полимерных материалов — это сложный процесс получения дискретных изделий, который включает процессы нагрева и формования, протекающие при изготовлении каждого изделия за короткий промежуток времени (так, время нагрева при производстве упаковок для фармацевтических препаратов, как правило, составляет 30...45 с, а время формования — 1...3 с). Процесс термоформования характеризуется широким ассортиментом сырья, множеством методов нагрева и формования, конфигураций и геометрических параметров изделий, частой перенастройкой на изготовление новых партий изделий с отличными от предыдущих характеристиками. Основными показателями качества формованных изделий являются толщина и разнотолщинность их сте-

нок, от которых зависят барьерный эффект, прочность, жесткость и товарный вид упаковки. Неравномерность профиля толщины обуславливается спецификой тепловых и деформационных процессов, протекающих в структуре полимерного материала, находящегося в высокоэластичном состоянии, при реализации конкретной технологии термоформования и приводящих к неоднородности полей температуры и напряжений. Поэтому решение проблемы минимизации разнотолщинности при условии обеспечения требуемой заказчиком толщины изделия возможно за счет управления этими процессами при переходе на новое задание, осуществляемом путем целенаправленного изменения режимных параметров агрегата для термоформования (температуры и времени нагрева, скорости формования). При массовом производстве формованных изделий периодический контроль толщины и разнотолщинности осуществляется технологом, который проводит измерение профилей толщины стенок не менее трех изделий из каждой партии. Такой контроль позволяет только зарегистрировать брак, связанный с отклонениями толщины и разнотолщинности за предельно допустимые значения, но не помогает предотвратить его (брак в условиях производства дискретных изделий становится неисправимой нештатной ситуацией). В связи с этим необходимо предоставить возможность оперативно персоналу заранее отработать навыки выбора управляющих воздействий на процесс термоформования для предотвращения брака и обеспечения наилучшего качества изделий при различных вариантах аппаратурно-технологического оформления процесса, отличающихся типами методов нагрева и формования, конфигурациями и геометрическими параметрами формующих инструментов. Таким образом, для подготовки операторов процессов термоформования (формовщиков) актуальна разработка гибкого тренажерного программного комплекса, базирующегося на функциональных математических моделях для имитации протекания процессов нагрева и формования во времени, позволяющего исследовать причинно-следственные связи в объекте и отрабатывать навыки выбора режимов термоформования для

различных типов полимерных материалов, технологий термоформования, конфигураций и требований к качеству изделий. Интеграция такого тренажера с системой управления процессом термоформования позволяет формовщику после изучения способов и приобретения навыков выбора управляющих воздействий в различных режимах функционирования с использованием многовариантных адаптируемых моделей применить свои знания и навыки по формированию управляющих воздействий на реальном объекте.

### Характеристика процесса термоформования как объекта изучения и управления

Процесс получения полых объемных дискретных изделий медицинского и пищевого назначения методом термоформования как объект изучения и управления характеризуется различными типами формуемых заготовок  $T_{вр}$ , реализуемыми методами нагрева  $M_{heat}$  и формования  $M_{form}$  заготовок, видами формованных изделий  $T_{prod}$  (рис. 1). Заготовки, получаемые методами плоскощелевой экструзии или каландрования, отличаются толщиной  $d_0$  (пленки при  $d_0 = 0,1-1,0$  мм, листы при  $d_0 = 1,0-1,6$  мм) и типом пленкообразующего полимера  $T_{polym}$ , определяющим теплофизические характеристики заготовки  $S_{polym}$  (плотность  $\rho$ , среднюю удельную теплоемкость  $c$ , теплопроводность  $\lambda$ ). Так, блистерная упаковка для таблеток формуется из пленок на основе непластифицированного поливинилхлорида (ПВХ), полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и полипропилена (ПП), емкости для упаковки напитков и продуктов питания изготавливаются из пленок и листов на основе полистирола (ПС), ПВХ, ПЭТФ, ПП. На стадии нагрева заготовка разогревается от начальной температуры  $T_0$  до температуры, при которой материал имеет максимальную способность к деформации растяжения без разрушения, обусловленную подвижностью сегментов полимерных макромолекул. Для этого используются четыре метода: односторонний  $M_{h1}$  и двухсторонний  $M_{h2}$  теплорадиационный (с применением открытых инфракрасных нагревателей); конвективный  $M_{h3}$  (с применением закрытых термокамер, в которые подается горячий воздух); смешанный лучисто-конвективный  $M_{h4}$ . Выбор метода нагрева зависит от толщины и типа материала заготовки, требуемой производительности агрегата и степени однородности температурного поля заготовки. Так, для жестких (ПВХ, ПП, ПС) и толстолистовых материалов рекомендуется метод  $M_{h2}$  [1]. Метод  $M_{h3}$  обеспечивает равномерный по толщине прогрев толстых заготовок, но характеризуется слишком длительным временем разогрева (в 5...10 раз превышающим время лучистого нагрева), что существенно снижает производительность. Использование нагревателей камерного типа (методы  $M_{h3}$ ,  $M_{h4}$ ) уменьшает эффект краевого охлаждения заготовки и полностью исключает влияние микроклимата цеха (конвективных потоков между заготовкой и нагревателями, вызываемых сквозняками в

производственном помещении) на скорость нагрева. Метод нагрева определяет состав управляющих воздействий на стадии нагрева  $U_{heat}$ , от которых зависит распределение температуры  $T_f$  по толщине заготовки в конце нагрева. Для метода  $M_{h1}$  управляющими воздействиями являются температура  $T_{h1}$ , время  $t_{h1}$  работы нагревателя, для метода  $M_{h2}$  — температура верхнего и нижнего нагревателей  $T_{h2}^u$ ,  $T_{h2}^d$ , время их работы  $t_{h2}$ , для метода  $M_{h3}$  — температура воздуха, подаваемого в камеру,  $T_{h3}$ , время нагрева  $t_{h3}$ , для метода  $M_{h4}$  — температура нагревателей  $T_{h4}^u$ ,  $T_{h4}^d$ , воздуха  $T_{h4}^a$ , время нагрева  $t_{h4}$ .

Оформление заготовки в изделие происходит под действием разности давлений над заготовкой и под ней, создаваемой различными методами, основными из которых являются: механический  $M_{f1}$  (воздействие на заготовку вытяжного пуансона), пневматический  $M_{f2}$  (создание избыточного давления над заготовкой), вакуумный  $M_{f3}$  (вакуумирование объема под заготовкой). Выбор метода формования определяется толщиной и степенью вытяжки заготовки, сложностью конфигурации изделия. Степень вытяжки заготовки зависит от геометрических параметров изделия  $G_{prod}$  [2]:

$$\chi = L (1 + \cos\beta)/(2R), \quad (1)$$

где  $L$ ,  $\beta$  — длина (м), угол наклона образующей боковой поверхности;  $R$  — условный радиус, м.

Параметры, входящие в формулу (1), определяются в зависимости от конфигурации изделия  $C_{prod}$ . Если  $C_{prod}$  = "круговой цилиндр" ( $C_{p1}$ ), то  $L = H_c$ ,  $\beta = 90^\circ$ ,  $R = R_c$ ; если  $C_{prod}$  = "эллиптический цилиндр" ( $C_{p2}$ ), то  $L = H_{ec}$ ,  $\beta = 90^\circ$ ,  $R = B_{ec}$ ; если  $C_{prod}$  = "усеченный круговой конус" ( $C_{p3}$ ), то  $L = H_{ic}/\sin b_{ic}$ ,  $\beta = b_{ic}$ ,  $R = R_{ic}^u$ ; если  $C_{prod}$  = "прямоугольный параллелепипед" ( $C_{p4}$ ), то  $L = H_{rp}$ ,  $\beta = 90^\circ$ ,  $R = W_{rp}/2$ . Здесь  $H_c$ ,  $H_{ec}$ ,  $H_{ic}$ ,  $H_{rp}$  — высота изделия соответствующей конфигурации, м;  $R_c$ ,  $B_{ec}$ ,  $W_{rp}$  — радиус окружности, малая полуось эллипса, ширина прямоугольника, лежащих в основании изделия м;  $b_{ic}$ ,  $R_{ic}^u$  — угол наклона образующей и радиус большего основания (м) усеченного конуса.

Для изделий, не имеющих сложных переходов, мелких тиснений и рельефов на поверхности, при степени вытяжки  $\chi \leq 0,5$  и толщине  $d_0 \leq 1$  мм применяется вакуумное формование с перепадом давления 0,06...0,085 МПа в матрице, конфигурация и геометрические параметры которой  $G_{form}$  соответствуют конфигурации и параметрам изделия. При изготовлении изделий из более толстых материалов рекомендуется пневматическое формование с перепадом давления 0,15...2,5 МПа в матрице подобной изделию конфигурации [1, 2]. Метод  $M_{f2}$  позволяет повысить производительность за счет ускорения формообразования. Получение изделий при степени вытяжки  $\chi > 0,5...1$  требует применения механического формования (вытяжки на пуансоне). Управляющими воздействиями на стадии формования  $U_{form}$  являются: для метода  $M_{f1}$  скорость пуансона  $v_p$ ; для метода  $M_{f2}$  давление сжатого воздуха, подаваемого в полость матрицы над внеш-

ней поверхностью заготовки,  $P_a$ ; для метода  $M_3$  разряжение, создаваемое в полости матрицы под внутренней поверхностью заготовки,  $P_v$ . От управляющих воздействий  $U_{form}$  и температуры  $T_f$  зависят выходные параметры процесса  $Y$ : распределения напряжения  $s_p$  и толщины стенок  $d_p$  по координате вдоль средней линии изделия (для осесимметричных изделий – по радиальной координате), определяющие показатели качества изделия  $Q$  – среднюю толщину  $\bar{d}$ , индекс разнотолщинности  $D_d$ .

Сложность управления процессом термоформования заключается в том, что при каждом переходе агрегата на изготовление новой партии изделий, отличающихся конфигурацией, геометрическими параметрами, типом сырья, необходимо изменять не только режим эксплуатации (регламентные пороговые ограничения технологических параметров), но и аппаратное оформление (конфигурацию и геометрические параметры матрицы и пуансона (в случае реализации механического формования)). В этих условиях, характеризующихся неполной информацией об объекте управления, операторы вынуждены принимать решения на основе экспериментально подобранного технологического регламента и собственного производственного опыта, что сопровождается неизбежными ошибками, приводящими к нештатным ситуациям ( $ST$ ), связанным с возникновением брака в изделиях. Основными дефектами формованных изделий являются повышенная разнотолщинность стенок, несоответствие средней толщины предельно допустимым значениям, приводящее к разрыву стенки в наиболее утонченном месте или к увеличению массы изделия вследствие утолщения стенки. Причины ( $RS$ ) возникновения этих дефектов связаны с нарушениями технологического режима процесса. Так, неравномерный нагрев заготовки приводит к неодинаковым деформациям растяжения различных ее участков и, как следствие, к повышению разнотолщинности; при очень высокой скорости формования происходит быстрый рост во времени деформаций и напряжений, которые достигают предела прочности материала, в результате чего происходит его разрушение; нагрев заготовки до слишком высокой температуры, когда материал под зажимной рамой успевает прогреться и начинает утягиваться в матрицу, приводит к утолщению изделия.

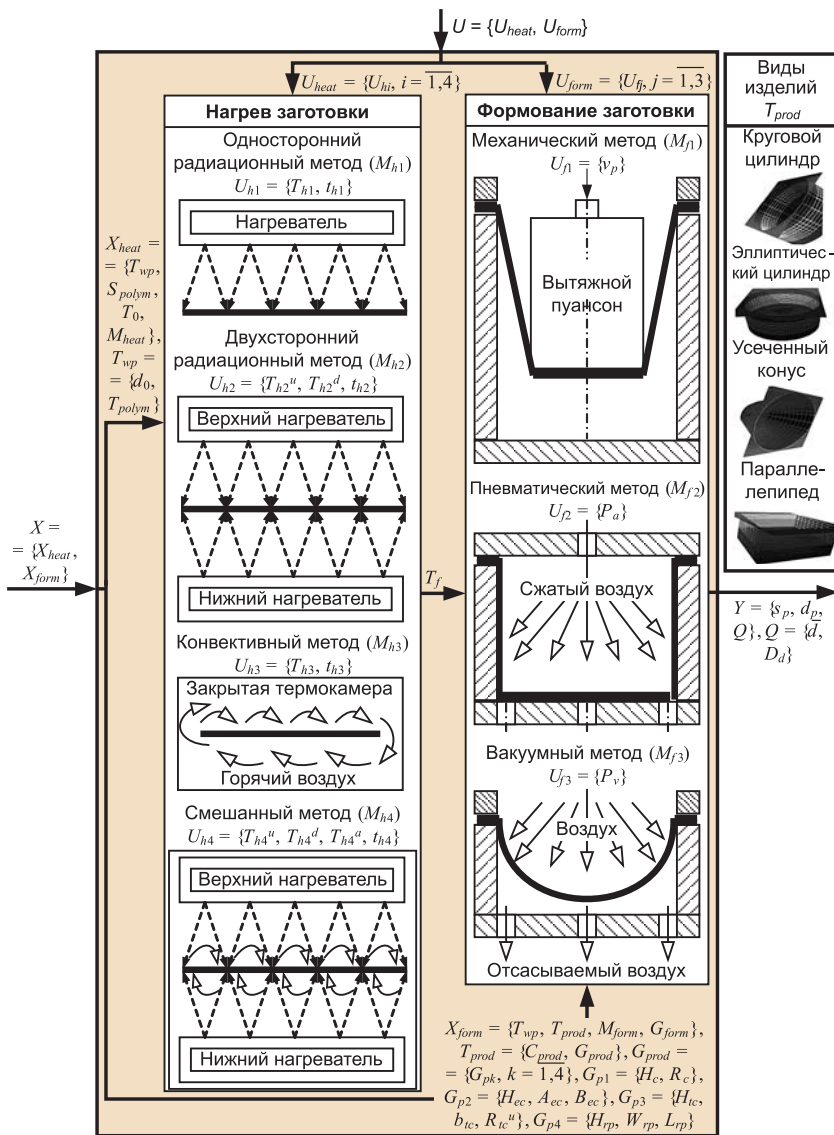


Рис. 1. Характеристика процесса термоформования как объекта изучения и управления, где  $X_{heat}$ ,  $X_{form}$  – векторы входных параметров стадий нагрева, формования;  $i, j, k$  – номера методов нагрева и формования, формы изделия;  $A_{ec}$ ,  $L_{rp}$  – большая полуось эллипса, длина прямоугольника

Таким образом, для операторов процесса получения дискретных изделий методом термоформования предлагаются следующие задачи обучения выбору управляющих воздействий в соответствии с приоритетностью их решения:

1) обучение управлению при возникновении брака: для заданных инструктором в сценарии входных параметров процесса  $X$  на основе описания дефектов изделия, связанных с отклонениями показателей качества  $Q$  за пределы допустимых значений, и причин их возникновения  $RS$  определить наиболее вероятную причину и направление изменения управляющих воздействий  $U_{hi}$ ,  $U_{fj}$  для устранения брака:

$$D_d(X, U_{hi}, U_{fj}) \leq D_d^{sup},$$

$$d^{minsup} \leq \bar{d}(X, U_{hi}, U_{fj}) \leq d^{maxsup}, \quad (2)$$

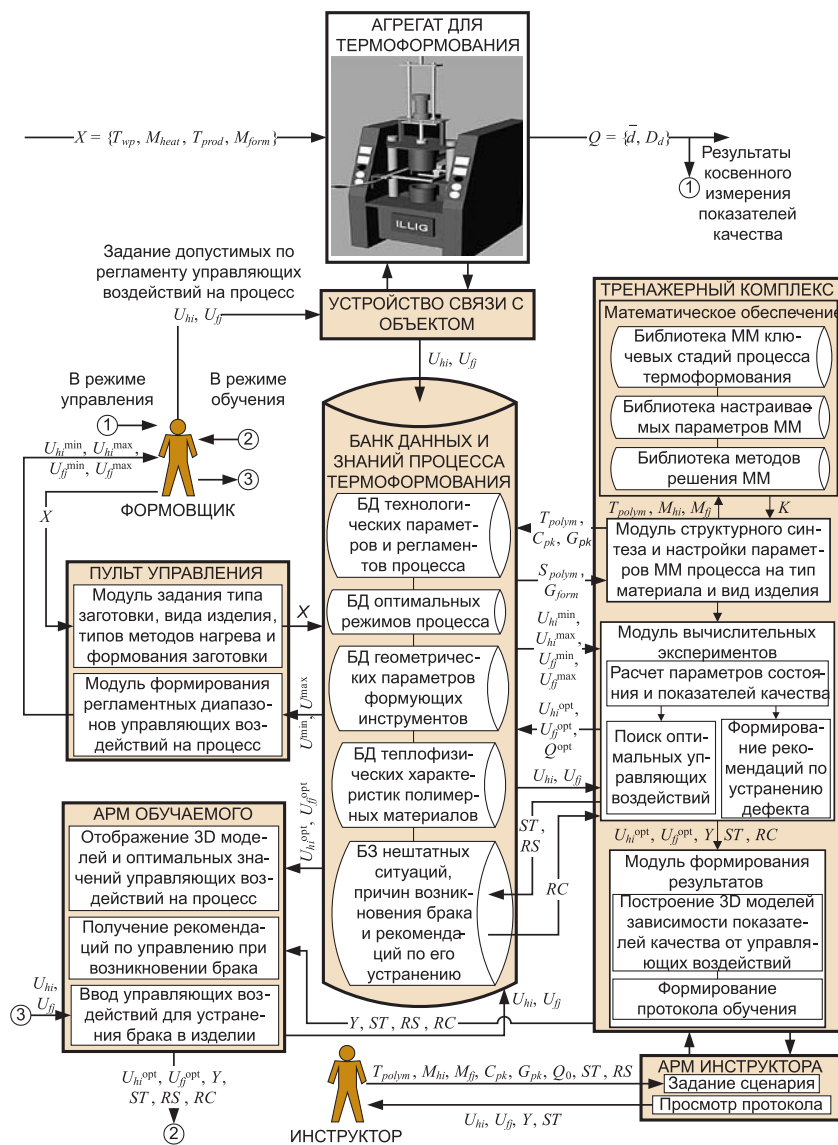


Рис. 2. Структура интегрированной системы обучения и управления

2) *обучение оптимальному управлению*: для заданных инструктором в сценарии входных параметров процесса  $X$  по имитационной модели определить значения управляющих воздействий на стадиях нагрева  $U_{hi}^{opt} \in [U_{hi}^{min}, U_{hi}^{max}]$  и формования  $U_{ff}^{opt} \in [U_{ff}^{min}, U_{ff}^{max}]$ , обеспечивающие минимальную разнотолщинность изделия при условии выполнения требований к его средней толщине:

$$\begin{aligned}
 D_d(X, U_{hi}^{opt}, U_{ff}^{opt}) &= \\
 &= \min_{\substack{U_{hi} \in [U_{hi}^{min}, U_{hi}^{max}], \\ U_{ff} \in [U_{ff}^{min}, U_{ff}^{max}]}} D_d(X, U_{hi}, U_{ff}), \\
 d^{\min} \leq \bar{d}(X, U_{hi}^{opt}, U_{ff}^{opt}) &\leq d^{\max}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

где  $D_d^{\sup}$ ,  $d^{\min \sup}$ ,  $d^{\max \sup}$  — предельно допустимые значения показателей качества, зависящие от функционального назначения изделия;  $U_{hi}^{\min}$ ,  $U_{hi}^{\max}$ ,  $U_{ff}^{\min}$ ,  $U_{ff}^{\max}$  — регламентные пороговые ограничения ре-

жимных параметров стадий процесса, зависящие от типа заготовки, методов нагрева и формования, вида изделия и хранимые в базе данных технологических параметров;  $d^{\min}$ ,  $d^{\max}$  — заданные заказчиком минимальное и максимальное значения средней толщины стенок изделия, м.

### Функциональная структура интегрированной системы обучения и управления

Анализ современных систем обучения производственного персонала химико-технологических процессов показал, что перспективным направлением развития компьютерных тренажерных комплексов, приводящим к повышению уровня обучения за счет формирования более глубоких знаний об объекте управления и выработки устойчивых навыков выбора и реализации управляющих воздействий, является интеграция тренажеров для обучения управлению с автоматизированными системами управления. Такая интеграция, способствующая снижению материальных и временных затрат на создание учебных центров на предприятиях, осуществляется через общее информационное обеспечение (банк данных процесса), необходимое для реализации как тренинга операторов, так и управления процессом [3]. Поэтому для решения задач управления и обучения управлению операторов процесса термо-

формования в различных режимах его функционирования (оптимальном, нештатном) и для разных вариантов аппаратно-технологического оформления разработана функциональная структура интегрированной системы обучения и управления, представленная на рис. 2. Система включает пульт управления процессом, банк данных и знаний процесса, тренажерный комплекс, АРМ обучаемого (формовщика), АРМ инструктора и функционирует в режимах управления и обучения. Интеграция тренажера и системы управления осуществляется через единый банк данных и знаний, включающий БД формующих инструментов, БД полимеров, БД технологических параметров и регламентов процесса, БД оптимальных режимов процесса и базу знаний (БЗ) нештатных ситуаций. БД формующих инструментов содержит геометрические параметры матриц агрегатов для пневмовакуумного термоформования, матриц и пуансонов агрегатов для механоформования, работающих с заготовками из пленочных или листовых полимеров. Состав геомет-

рических параметров зависит от конфигурации формируемых изделий: матрицы и пуансоны для изготовления осесимметричных изделий (цилиндр, усеченный конус) характеризуются высотой и диаметром, матрицы и пуансоны для получения изделий типа "прямоугольный параллелепипед" – высотой, шириной и длиной. В БД хранятся параметры 10 марок формовочных агрегатов. БД полимеров содержит теплофизические характеристики 4 типов полимеров (ПВХ, ПС, ПЭТФ, ПП), наиболее часто используемых для изготовления фармацевтической и пищевой упаковки. В БД технологических параметров и регламентов хранятся текущее значение (передаваемое с устройства связи с объектом или вводимое обучаемым), регламентные пороговые ограничения и предел допускаемой основной погрешности измерения параметров, являющихся управляющими воздействиями на стадиях процесса термоформования, состав которых  $U_{hi}, U_{fj}$  зависит от реализуемых методов нагрева и формования. Настройка БД на тип заготовки и вид изделия осуществляется путем динамического изменения пороговых ограничений  $U^{\min} = \{U_{hi}^{\min}, U_{fj}^{\min}\}, U^{\max} = \{U_{hi}^{\max}, U_{fj}^{\max}\}$ . Базы данных построены на основе реляционной модели и реализованы в СУБД SQL Server. Они позволяют настроить систему управления и тренажерный комплекс на различные модификации аппаратного оформления процесса, типы сырьевых материалов, требования технологического регламента.

В режиме управления формовщик с использованием пульта управления настраивает систему на характеристики процесса термоформования, задавая тип (толщину, материал) заготовки и вид (конфигурацию, геометрические параметры) изделия, выбирая типы реализуемых методов нагрева и формования. По введенным данным из БД регламентов формируются эксплуатационные диапазоны управляющих воздействий. Формовщик на основе своих знаний и производственного опыта выбирает внутри этих диапазонов технологический режим, характеризующийся определенными значениями управляющих воздействий, и реализует его на термоформовочном агрегате через устройство связи с объектом.

В режиме обучения формовщик, используя тренажерный программный комплекс, изучает способы управления процессом для устранения дефектов и обеспечения наилучшего качества изделий. Тренажерный комплекс включает математическое обеспечение, содержащее библиотеки математических моделей (ММ) ключевых стадий, коэффициентов и методов решения моделей, модули структурно-параметрического синтеза ММ процесса, проведения вычислительных экспериментов и формирования результатов обучения.

Ядром тренажерного комплекса является библиотека ММ динамики ключевых стадий процесса термоформования, описывающих функционирование объекта в допустимом по регламенту режиме. Библиотека включает модели процессов теплообмена (одностороннего, двухстороннего), конвектив-

ного, лучисто-конвективного нагрева пленочных и листовых заготовок, модели процессов механического, пневмовакуумного формования нагретых заготовок в изделия различной конфигурации ( $C_{p1} - C_{p4}$ ). Модели нагрева построены на основе теории теплопроводности твердых тел, законов конвективного и лучистого теплообмена с учетом допущений о равномерном нагреве заготовки по площади, однородности материала, независимости теплофизических характеристик от температуры, отсутствии провисания заготовки из-за теплового расширения при нагреве и деформации под действием силы тяжести [4]. Они позволяют рассчитать (с использованием метода конечных разностей) распределение температуры по толщине заготовки и времени нагрева  $T(z, t), 0 \leq z \leq d_0, 0 \leq t \leq t_{hi}$ , которое определяет температурный профиль заготовки в конце стадии нагрева  $T_f = T(z, t_{hi})$ , с учетом теплообмена заготовки с воздухом при теплообменном нагреве.

Модели формования построены на основе безмоментной теории тонких оболочек и законов реологии высокоэластичных материалов, примененных к двухосной вытяжке, с учетом допущений о несжимаемости материала, малости кривизны образующей боковой поверхности оболочки, отсутствии инерционных и массовых сил, изотермическом режиме формования [5]. Они включают уравнения баланса сил растяжения, непрерывности деформаций, связи деформаций и скоростей деформаций, нелинейное реологическое уравнение состояния. Модели позволяют рассчитать (с использованием разностной аппроксимации балансовых уравнений по схеме Эйлера и итерационного метода) распределения скоростей деформаций  $\dot{\epsilon}_r$ , деформаций  $\epsilon_r$ , напряжения  $s$  и толщины  $d$  по координате  $r$  вдоль средней линии оболочки и времени формования  $t$ . Они определяют распределения напряжения и толщины изделия  $s_p = s(r, t_f), d_p = d(r, t_f), 0 \leq r \leq R$ , где  $t_f$  – время формования, с. По распределению напряжения определяется средний уровень напряжения в изделии, обуславливающий склонность изделия к короблению, особенно в условиях повышенных температур (например, при затаривании в него горячих продуктов). По распределению толщины вычисляются показатели качества:

$$\bar{d} = \int_0^R d(r, t_f) dr / R, D_d = (1 - d_p^{\min} / \bar{d}) \cdot 100, \quad (4)$$

где  $d_p^{\min}$  – минимальная толщина стенки изделия, м.

Модели реализованы в объектно-ориентированной визуальной среде Visual Studio на языке C#.

Адекватность моделей ключевых стадий проверки для различных типов полимерных материалов (ПВХ, ПС, ПП), методов нагрева и формования, конфигураций и геометрических параметров изделий (цилиндр, усеченный конус), режимных параметров процесса. Сравнение рассчитанных и измеренных профилей толщины стенок изделий показало, что среднеквадратическое отклонение (1...3 %) для всех

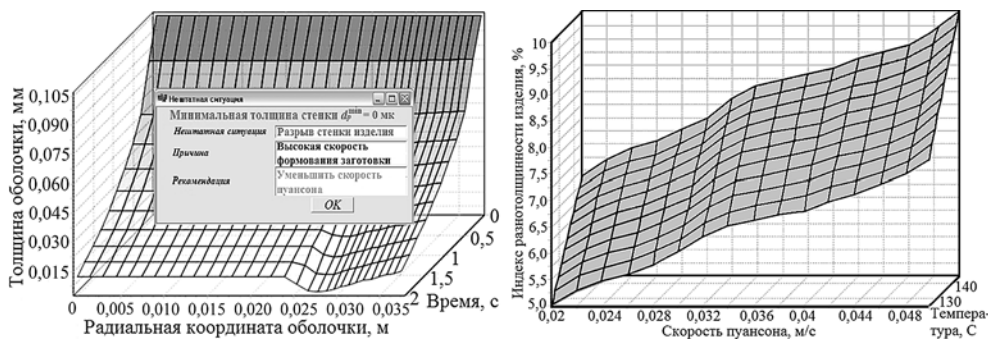


Рис. 3. Примеры интерфейса обучающего при решении различных задач обучения

исследованных вариантов аппаратурно-технологического оформления процесса не превышает предельной погрешности измерения (10 %).

На базе библиотеки ММ ключевых стадий осуществляется синтез тренажерной математической модели – имитационной модели процесса термоформования, позволяющей описать протекание процесса во времени. Синтез заключается в формировании структуры модели по заданным инструктором в сценарии обучения классу материала, методам нагрева и формования, конфигурации изделия и настройке коэффициентов модели на тип полимера, геометрические параметры изделия. В зависимости от типа метода нагрева из библиотеки ММ выбираются формулы для расчета удельных тепловых потоков от нагревателей/теплоносителя к заготовке, которые используются при формировании граничных условий модели нагрева. От класса формируемого материала (аморфный, кристаллический) зависит вид реологического уравнения для расчета коэффициента сопротивления материала деформации растяжения  $\mu = f(T_f, \epsilon, \dot{\epsilon})$ . Библиотека реологических моделей содержит уравнение Вильямса-Лэндела-Ферри для аморфных полимеров и уравнение Рейнольдса для кристаллических полимеров. В зависимости от метода формования и конфигурации изделия формируются балансовые уравнения и граничные условия модели формования. Настройка на тип полимера осуществляется путем формирования из БД числовых значений теплофизических характеристик  $\rho, c, \lambda$  и эмпирических коэффициентов  $K$  (коэффициентов лучеиспускания и теплоотдачи от заготовки в воздух/коэффициента теплоотдачи от теплоносителя к заготовке, коэффициентов реологической модели). Настройка на параметры изделия происходит путем выбора из БД формирующих инструментов с соответствующими характеристиками  $G_{form}$ . По синтезированной модели на стадии нагрева рассчитывается температурный профиль заготовки  $T_f$ , который передается в модуль моделирования стадии формования, позволяющий вычислить параметры состояния  $S = \{s_p, d_p\}$  и показатели качества  $Q$  с использованием формул (4). При варьировании управляющих воздействий в регламентных диапазонах  $U_{hi}^{min}, U_{hi}^{max}, U_{fi}^{min}, U_{fi}^{max}$ , сформированных из БД по характеристикам процесса, заданным в сценарии, рассчитываются зависимости показателей качества от управляющих воздействий  $Q = F(U_{hi}, U_{fi})$ , по

которым определяются оптимальные значения управлений  $U_{hi}^{opt}, U_{fi}^{opt}$ , обеспечивающие выполнение условий (3). Эти зависимости визуализируются на интерфейсе АРМ обучающего в виде трехмерных графиков (рис. 3) и таблиц. Анализируя их, обучаемый изучает причинно-следственные связи в объекте (влияние каналов управления на показатели качества). Оптимальные управляющие воздействия и достигнутые при них значения показателей качества  $Q_{opt}$  сохраняются в БД оптимальных режимов и используются для поддержки принятия решений в режиме управления при переходе на новое производственное задание. Это способствует снижению экономических потерь, связанных с перерасходом дорогостоящего сырья и возникновением брака в изделиях. Таким образом, вследствие кратковременности рабочего цикла при изготовлении фармацевтических и пищевых упаковок, составляющего, как правило, не более минуты, основным назначением созданной модели является решение задачи тренинга выбора оптимального технологического режима при перенастройке процесса на изготовление новой партии изделий, отличающихся типом материала, конфигурацией и геометрическими параметрами.

Для обучения управлению при возникновении брака в формованных изделиях разработана БЗ нештатных ситуаций (НС), которая содержит лингвистическое и информационное описание возможных дефектов изделий по толщине  $ST$  (повышенная разнотолщинность и др.), причин их возникновения  $RS$  и рекомендаций по устранению  $RC$ . БЗ построена на основе продукционно-фреймовой модели. Моделирование причин возникновения брака осуществляется изменением значений параметров тренажерной модели (входных параметров  $X_{heat}, X_{form}$ , управляющих воздействий  $U_{hi}, U_{fi}$ , коэффициентов  $K$ ) по отношению к их номинальным значениям, хранящимся в базах данных и библиотеке параметров ММ. Например, к возникновению НС "Разрыв стенки изделия" ( $d_p^{min} = 0$ ) приводит причина "Высокая скорость формования заготовки", которая для процесса механоформования моделируется соответствующим заданием значения скорости пуансона  $v_p$  (рис. 3). В результате показатели качества, рассчитываемые по модели, выходят за допустимые пределы, определяемые неравенствами (2), и выдается сообщение о возникновении дефекта, включающее описание наиболее вероятной причины дефекта и рекомендации по его устранению. Обучаемый путем соответствующего изменения управляющих воздействий на тренажерной модели устраняет брак в изделии, переводя показатели качества в допустимые пороговые ограничения.

Предложенная структура интегрированной системы обучения и управления отвечает требованиям к модульности, гибкости для обучения управлению многоассортиментным перенастраиваемым производством объемных дискретных изделий, характеризующимся широкой номенклатурой сырья и продукции, обучению с использованием математических моделей, реализации сформированных при обучении навыков по выбору режимов процесса для обеспечения качества изделий на реальном объекте.

#### Интерфейсы тренажерного комплекса

В тренажерном программном комплексе в зависимости от полномочий пользователя реализованы интерфейсы инструктора, обучаемого (формовщика), а также межпрограммный интерфейс. Интерфейс АРМ инструктора позволяет ему осуществлять подготовку и проведение тренинга. При подготовке тренинга инструктор формирует сценарий обучения, включающий данные об обучаемом, характеристики процесса (тип заготовки, метод нагрева, метод формования, вид изделия, требования к его качеству  $Q_0$ ), тип и причину НС, настраиваемые параметры модели (для обучения управлению в НС), время обучения. Информация о параметрах сценария сохраняется в файле сценария, на основе которого осуществляется реализация сценария для обучаемого. При проведении тренинга инструктор имеет возможность контролировать ход обучения и оценивать действия обучаемого, анализируя протокол обучения, включающий информацию об обучаемом, задании, действиях обучаемого по управлению процессом в заданном режиме, значения выходных параметров  $Y$  в виде таблиц, 2D и 3D графиков, отклонения показателей качества  $Q$  от допустимых значений  $Q_0$ . Интерфейс АРМ обучаемого включает модули ввода управляющих воздейст-

вий на тренажерную модель для устранения брака, табличного и графического отображения результатов моделирования, получения советов по управлению для обучения формовщика управлению объектом в различных режимах функционирования (рис. 3).

#### Заключение

Разработан гибкий тренажерный программный комплекс, позволяющий на базе многовариантных моделей описания процесса термоформования решать задачи обучения управлению качеством объемных дискретных изделий из полимерных материалов в различных режимах функционирования объекта управления (оптимальном, нештатном). Комплекс успешно применяется в Международном учебно-исследовательском центре упаковочной пленки СПБГТИ(ТУ) и корпорации Klöckner Pentaplast для тренинга специалистов и поддержки технологий изготовления новых типов упаковочных средств, используемых в фармацевтической и пищевой промышленности.

#### Список литературы

1. Шварцманн П., Иллиг А. Термоформование. СПб.: Профессия. 2007.
2. Шерышев М.А., Ким В.С. Переработка листов из полимерных материалов. Л.: Химия. 1984.
3. Чистякова Т.Б. Информационные технологии синтеза компьютерных тренажеров для химических производств // Известия СПБГТИ(ТУ). 2007. № 1.
4. Полосин А.Н. Методика численного моделирования динамики процессов нагрева полимерных пленок при термоформовании осесимметричных изделий // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 3.2.
5. Полосин А.Н., Чистякова Т.Б., Колерт К. Расчет параметров напряженно-деформированного состояния осесимметричных оболочек при механической вытяжке полимерных материалов // Информационные технологии моделирования и управления. 2009. № 7.

*Чистякова Тамара Балабековна — д-р техн. наук, проф., проректор по учебной работе, зав. кафедрой,*

*Полосин Андрей Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры,*

*Кузьменков Евгений Валерьевич — аспирант, мл. науч. сотр. кафедры систем автоматизированного проектирования и управления Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).*

*Контактный телефон (812) 494-93-70, факс (812) 316-18-26. E-mail: sapr@ws01.sapr.pu.ru*

#### WatchGuard XTM: еще больше функций и возможностей

Компания WatchGuard Technologies Inc., мировой лидер в области решений корпоративной информационной безопасности, представляет новые возможности многофункциональных межсетевых экранов серии XTM 11.4.1.

Новая функция безопасного поиска WatchGuard Safe Search позволяет системным администраторам контролировать настройки фильтров поисковых систем Internet и предотвращать доступ пользователей к сайтам, содержащим нежелательный контент. Данная функция работает на уровне шлюза, то есть при включении ее на межсетевом экране WatchGuard сер. XTM администратор определяет необходимые параметры в пользовательских Web-браузерах. Система работает с крупнейшими поисковыми системами: Google, Bing, Yahoo и Ask.com. Кроме того, в WatchGuard Safe Search предусмотрен

"защищенный режим" для портала YouTube.com, позволяющий отфильтровывать нежелательный видеоконтент или комментарии.

В ОС WatchGuard Firewall XTM вер. 11.4.1 значительно улучшены и расширены возможности сервиса Application Control. Дополнительные функции позволяют идентифицировать мобильные браузеры для платформ Android и iPhone, а также распознавать Web 2.0 приложения и популярные социальные сети. ОС Firewall XTM 11.4.1 обладает улучшенным функционалом для работы с виртуальными частными сетями VPN и SNMP-протоколом.

На территории России продукция WatchGuard Technologies реализуется компанией Rainbow Security через сеть сертифицированных партнеров.

[Http://www.Rnbo.ru](http://www.Rnbo.ru)