

УДК 004.94:678.027.2

# СИМУЛЯТОР ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПЕРЕНАСТРОЙКЕ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ЭКСТРУЗИОННО-КАЛАНДРОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

**А.Н. Полосин**

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)*  
Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр-кт, 24-26/49 лит. А  
E-mail: polosin-1976@sapr.lti-gti.ru

**С.А. Кочанов**

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)*  
Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр-кт, 24-26/49 лит. А  
E-mail: kochanov4653@gmail.com

**Ключевые слова:** симулятор виртуальной реальности, интерактивная 3D модель пульта управления, базы данных, математические модели, интерфейс обучаемого, интерфейс инструктора, обучение управлению при перенастройке на новое производственное задание, потребительские характеристики продукции, сценарий обучения, протокол обучения, экструзионно-каландровое производство, полимерные пленки.

**Аннотация:** Описан симулятор виртуальной реальности, предназначенный для обучения управлению многоассортиментным экструзионно-каландровым производством при перенастройке системы на новые задания по типам полимерных пленок. Ядром симулятора, позволяющим реализовать активное обучение и настроить симулятор на различные сценарии обучения, отличающиеся типами пленок (компонентным составом, требованиями к потребительским характеристикам) и конфигурациями производственных линий, являются многовариантные модели описания промышленного объекта управления. К ним относятся математические модели для вычисления показателей качества полимерного материала на основных стадиях производства в зависимости от управляющих воздействий и информационные модели – базы данных характеристик оборудования, пленок и регламентных диапазонов управляющих воздействий. Инструментальными средствами управления обучением являются интерфейс инструктора для формирования сценариев обучения и отображения протоколов обучения и интерфейс обучаемого (оператора линии – каландровожатого) для имитации его работы с пультом управления. Взаимодействуя с интерактивной 3D моделью пульта управления с использованием аппаратуры виртуальной реальности, обучаемый варьирует управляющие воздействия на стадиях производства в регламентных диапазонах, чтобы обеспечить выполнение требований к толщине, качеству поверхности и усадке пленки. Контроль сформированности навыков управления выполняется по отклонению достигнутых обучаемым значений потребительских характеристик пленки от заданных значений и времени, затраченному на реализацию сценария. Тестирование по данным производства фармацевтических и пищевых упаковочных жестких пленок на основе поливинилхлорида на заводе в Санкт-Петербурге подтвердило работоспособность и эффективность применения симулятора.

## 1. Введение

Современные экструзионно-каландровые производства (ЭКП) упаковочных полимерных пленок (ПП) являются непрерывными, многостадийными, крупнотоннажными технологическими системами с рециклами, которые необходимы для возврата отходов в производственный цикл в качестве вторичного сырья. Они характеризуются широким ассортиментом продукции (более 30 типов ПП) и, как следствие, частыми (до нескольких раз в смену) перенастройками на выпуск продукции новых типов в соответствии с производственным расписанием. Типы ПП отличаются компонентным составом и требованиями к качеству. Наиболее важными для потребителей показателями качества, характеризующими основную ценность ПП как упаковочных материалов, являются толщина, равномерность по ширине полотна, составляющей до 2,5 м, внешний вид, характеризуемый удельным количеством поверхностных дефектов различных типов (черных точек, желто-коричневых полос, включений нерасплавленного полимера, дефектов типа «рыбий глаз», воздушных пузырей, дырок), степень усадки. Потребительские характеристики (ПХ) ПП сложным образом зависят от характеристик сырья и оборудования, технологических параметров процесса и показателей качества полимерного материала (ПМ) на стадиях производства (всего около 100 параметров). Количество таких связей в ЭКП превышает 800. Рециклинг отходов – раздробленных кромок и дефектных участков ПП – способствует ресурсосбережению, но в то же время является возмущением, приводящим к отклонению удельного количества дефектов ПП за регламентные ограничения. При перенастройке ЭКП на выпуск ПП другой толщины необходимо обеспечить синхронность работы устройств подготовки экструдата (экструдер) и его формования в ПП (каландр). Это позволит исключить брак ПП, вызванный перегревом и деструкцией экструдата вследствие длительного (~ 5 мин) пребывания в запасе в питающем зазоре каландра при избыточной производительности экструдера, или остановку производственной линии (ПЛ) из-за соударения питающих валков при «голодном» питании (когда запас не образуется). Поэтому для перенастройки ЭКП на новые типы ПП управленческий производственный персонал (каландровожатые) должен обладать навыками целенаправленного изменения управляющих воздействий (УВ) на процесс, число которых порядка 30. Большая длительность (~ 6 лет) и дороговизна обучения каландровожатых на ПЛ из-за высокой стоимости сырья, электроэнергии, возможного брака ПП и повреждения дорогостоящего оборудования, приводящего к остановке ПЛ, обуславливают необходимость цифровизации процесса подготовки кадров для эксплуатации ЭКП. Она заключается в разработке и внедрении компьютерного тренажера (КТ) для наработки навыков управления при перенастройке ЭКП.

Наиболее перспективным направлением развития современных КТ является применение иммерсивных технологий, в частности, технологий виртуальной реальности (VR), обеспечивающих достоверную симуляцию реальных объектов изучения с погружением обучаемых в смоделированное технологическое окружение, в котором им предстоит работать [1, 2]. Поэтому для поддержания на требуемом уровне и повышения профессиональной квалификации каландровожатых актуальной проблемой является разработка симулятора виртуальной реальности (VR-симулятора), который позволяет формировать навыки управления при перенастройке ЭКП для различных сценариев обучения, отличающихся типами ПП и конфигурациями ПЛ.

## 2. Задачи обучения управлению стадиями при перенастройке ЭКП ПП. Структура VR-симулятора

ЭКП ПП представляет собой технологическую систему, в которой сырье (твердый пленкообразующий полимер и добавки к нему – стабилизатор, модификатор, смазки и др.) перерабатывается (в экструдере) в вязкотекучий ПМ – экструдат, формуемый на каландре в пленочное полотно, вытягиваемое и охлаждаемое для фиксации структуры ПП многовалковым устройством. Оборудование ЭКП (экструдеры, каландры, съемно-вытяжные и охлаждающие устройства) отличается переменностью конфигураций, которая позволяет настраивать ЭКП на выпуск ПП широкого ассортимента.

Проведенный анализ позволил выделить основные стадии ЭКП, на которых формируются ПХ: подготовка экструдата ( $s = 1$ ); формование экструдата в ПП ( $s = 2$ ); фиксация структуры ПП ( $s = 3$ ). Формализованное описание каждой стадии ЭКП как объекта управления включает входные параметры  $X_s$ , УВ  $U_s$ , выходные параметры  $Y_s$ :

$$Y_s = F_s(X_s, U_s), Y_1 = \{I_D, \phi_S, \bar{\gamma}, G\}, Y_2 = \{\delta_F, \eta_{DFq}, q = \overline{1, n_{DF}}\}, Y_3 = \{S_F\},$$

$$X_s = \{C_{EQS}, H_{EQS}, H_{PMS}\}, U_1 = \{N_H, N, T_{Bk}, k = \overline{1, n_T}\}, U_2 = \{V_{Cl}, T_{Cl}, l = \overline{1, n_C}\},$$

$$U_3 = \{V_{TCp}, T_{TCp}, p = \overline{1, n_{TC}}\},$$

где  $I_D, \phi_S, \bar{\gamma}$  – индекс термодеструкции и показатели однородности (доля твердой фазы, средняя степень смешения) экструдата;  $G$  – производительность экструдера;  $\delta_F, S_F$  – толщина и степень продольной усадки ПП;  $\eta_{DFq}$  – удельное количество дефектов  $q$ -го типа на ПП;  $C_{EQS}, H_{EQS}$  – конфигурация и характеристики (геометрические параметры, параметры свойств материалов) оборудования  $s$ -й стадии;  $H_{PMS}$  – параметры свойств ПМ на  $s$ -й стадии;  $N_H, N, T_{Bk}$  – частоты вращения загрузочного и основного шнеков и температура  $k$ -й тепловой зоны корпуса экструдера;  $V_{Cl}, T_{Cl}$  – окружная скорость и температура поверхности  $l$ -го валка каландра;  $V_{TCp}, T_{TCp}$  – скорость и температура  $p$ -го валка съемно-вытяжного и охлаждающего устройства.

На основе формализованного описания сформулированы задачи обучения управлению основными стадиями при перенастройке ЭКП ПП.

Постановка задачи обучения управлению стадией экструзии имеет вид: для заданного сценария обучения  $S_{TR} = \{i_{PL}, T_F, \tau_{TR}\}$  варьированием УВ на экструдер в регламентных диапазонах  $U_1 \subset [U_1^{\min}, U_1^{\max}]$  найти (в течение времени обучения  $\tau_{TR}$ ) такие значения УВ, которые обеспечивают выполнение требований к качеству экструдата  $I_D \leq I_D^{\max}, \phi_S \leq \phi_S^{\max}, \bar{\gamma} \geq \bar{\gamma}^{\min}$  и заданную производительность экструдера  $|G_0 - G| \leq \Delta_G^{\max}$ , где  $i_{PL}$  – номер ПЛ на заводе;  $T_F = \{K_F, \delta_{F0}, \Delta_\delta^{\max}, w_{F0}, \eta_{DFq}^{\max}, q = \overline{1, n_{DF}}, S_{F0}\}$  – тип ПП, характеризуемый компонентным составом  $K_F$ , толщиной (с учетом допуска)  $\delta_{F0} \pm \Delta_\delta^{\max}$ , шириной  $w_{F0}$ , максимально допустимым удельным количеством поверхностных дефектов каждого ( $q$ -го) типа  $\eta_{DFq}^{\max}$ , степени усадки  $S_{F0}$ ;  $I_D^{\max}, \phi_S^{\max}, \bar{\gamma}^{\min}$  – предельно допустимые значения показателей качества экструдата, зависящие от типа ПП  $T_F$ ;  $G_0$  – производительность ПЛ, зависящая от толщины  $\delta_{F0}$  и ширины  $w_{F0}$  ПП;  $\Delta_G^{\max}$  – максимально допустимое отклонение производительности.

Постановка задачи обучения управлению стадией каландрования имеет вид: для заданного сценария обучения  $S_{TR}$  варьированием УВ на каландр в регламентных диапазонах  $U_2 \subset [U_2^{\min}, U_2^{\max}]$  найти (в течение времени обучения  $\tau_{TR}$ ) такие значения УВ, которые обеспечивают заданную толщину ПП  $|\delta_{F0} - \delta_F| \leq \Delta_\delta^{\max}$  и выполнение требований к качеству поверхности ПП  $\eta_{DFq} \leq \eta_{DFq}^{\max}, q = \overline{1, n_{DF}}$ .

Постановка задачи обучения управлению стадией вытяжки и охлаждения ПП имеет вид: для заданного сценария обучения  $S_{TR}$  варьированием УВ на съемно-вытяжное и охлаждающее устройство в регламентных диапазонах  $U_3 \in [U_3^{\min}; U_3^{\max}]$  найти такие значения УВ, которые обеспечивают заданную степень усадки ПП  $|S_{F0} - S_F| \leq \Delta_S^{\max}$ , где  $\Delta_S^{\max}$  – максимально допустимое отклонение степени усадки от задания.

Анализ КТ для обучения операторов химико-технологических процессов и производств и накопленный нами опыт в методологии и цифровых технологиях тренажеростроения показали, что ядром КТ является многовариантная система моделирования объекта управления. Она включает математические модели (ММ), обеспечивающие возможности активного обучения управлению при реализации различных стратегий обучения, и информационные модели – базы данных (БД) характеристик объекта управления, позволяющие настраивать КТ на переменные характеристики объекта [3,4]. Это позволило обосновать функциональную структуру VR-симулятора для решения поставленных задач обучения.

VR-симулятор включает модуль задания сценариев обучения, банк данных (БнД) характеристик ЭКП ПП, подсистему математического моделирования основных стадий ЭКП ПП для вычисления выходных параметров стадий в зависимости от УВ, модуль VR-симуляции работы обучаемого с пультом управления, модуль протоколирования обучения, интерфейсы обучаемого и инструктора. БнД содержит БД конфигураций и характеристик ПЛ, БД типов ПП и параметров свойств ПМ, БД регламентных диапазонов УВ на процесс, БД 3D моделей пультов управления стадий ЭКП. Он позволяет настроить VR-симулятор на сценарий обучения путем формирования значений входных параметров стадий (в зависимости от номера ПЛ и типа ПП) и регламентных ограничений на УВ, показатели качества экструдата и ПХ ПП (в зависимости от типа ПП). Подсистема моделирования включает библиотеку, содержащую ММ, описывающие физические процессы в экструдерах различных типов (одношнековых и двухшнековых, осциллирующих), каландрах, съемно-вытяжных и охлаждающих устройствах, а также ММ для оценки показателей качества экструдата и ПХ ПП. Структура ММ физических процессов (экструзия, каландрование, охлаждение) настраивается на переменные конфигурации соответствующего оборудования [5]. Вычисление ПХ ПП выполняется как по функциональным ММ (например, ММ Муни–Ривлина для расчета степени усадки) [6], так и по эмпирическим ММ (например, многофакторная регрессионная ММ для оценки удельного количества черных точек), полученным в результате обработки больших данных промышленных ЭКП [7]. Модуль VR-симуляции представляет собой интерактивную 3D модель пульта управления для задания УВ на стадиях ЭКП и визуализации трендов вычисленных показателей качества ПМ и их пороговых значений. Он позволяет обучаемому работать с симулятором, используя VR-устройства (шлем, контроллеры). Взаимодействуя с интерактивной 3D моделью пульта, обучаемый варьирует УВ в регламентных диапазонах, чтобы обеспечить выполнение требований к качеству ПМ (рис. 1). В протоколе фиксируются действия обучаемого и отклонения достигнутых им значений показателей качества от заданных/пороговых значений. Анализ протокола позволяет инструктору оценить сформированность навыков управления ЭКП у обучаемого.

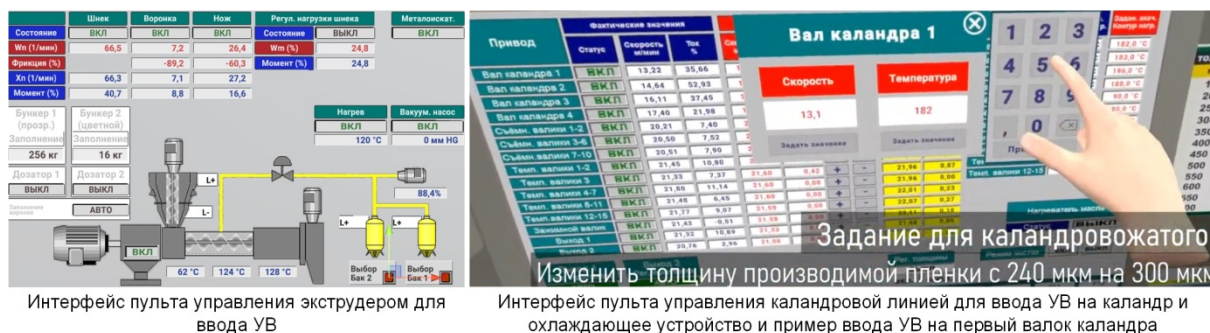


Рис. 1. Примеры интерфейсов виртуальных пультов управления оборудованием ЭКП.

Тестирование VR-симулятора по данным ЭКП фармацевтических и пищевых упаковочных ПП на основе жесткого поливинилхлорида на заводе в Санкт-Петербурге при различных сценариях обучения (типах ПП) подтвердило его работоспособность.

### 3. Заключение

Разработан VR-симулятор, позволяющий на основе настраиваемых информационных и математических моделей ЭКП ПП формировать навыки ресурсосберегающего управления при перенастройках ЭКП на различные типы ПП. Эффективность применения VR-симулятора обеспечивается за счет сокращения времени принятия управленческих решений и увеличения выхода кондиционной ПП.

### Список литературы

1. Асланов Р.Э., Большаков А.А. Модели и методы разработки подсистемы подготовки специалистов автоматизированной системы управления производством с использованием симуляторов виртуальной реальности // Известия СПбГТИ (ТУ). 2023. №65. С. 81-89.
2. Дозорцев В.М. Технологии виртуальной реальности в обучении операторов технологических процессов // Автоматизация в промышленности. 2018. № 6. С. 42-50.
3. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. М.: СИНТЕГ, 2009. 372 с.
4. Чистякова Т.Б. Информационные технологии синтеза компьютерных тренажеров для химических производств // Известия СПбГТИ(ТУ). 2007. № 1. С. 90-95.
5. Чистякова Т.Б., Полосин А.Н. Математические модели и программный комплекс для управления экструзионными процессами в гибких многоассортиментных производствах полимерных материалов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2019. Т. 12, № 4. С. 5-28.
6. Чистякова Т.Б., Аразтаганова А.М., Колерт К. Математические модели для исследования и управления качеством термоусадочных пленок // Известия СПбГТИ(ТУ). 2018. № 46. С. 123-127.
7. Chistyakova T.B., Kleinert F., Teterin M.A. Big Data Analysis in Film Production // Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Vol. 259. P. 229-236.