

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПРЕДИКТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТЕРМООКСИЛИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ ПОЛИМЕРА В РЕАКТОРЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

© 2020 А. П. Попов^{✉1}, С. Г. Тихомиров¹, И. А. Хаустов¹, А. А. Хвостов¹, Г. С. Тихомиров²

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий
пр-т Революции, 19, 394036 Воронеж, Российская Федерация

²Воронежский государственный университет
Университетская пл., 1, 394018 Воронеж, Российская Федерация

Аннотация. В статье проведен анализ современного состояния вопросов синтеза автоматизированных систем управления технологическими процессами деструкции полимеров. В результате применения системного подхода к синтезу управляющей системы сформулированы общая и частная задачи управления. Для их решения установлены системные связи между: входными и выходными параметрами объекта управления, математического описания процесса и значениями режимных показателей процесса. Представлены основные этапы и результаты синтеза автоматизированной системы, реализующей метод упреждающего управления температурным режимом работы реактора термоокислительной деструкции полимерного материала в растворе посредством понижения давления в реакционной зоне. Для реализации предложенного способа управления разработаны модель и алгоритм расчета величины управляющего воздействия, а также синтезированы математическое обеспечение и структура автоматизированной системы, функционирующей по принципу программного управления. На основе результатов построения предсказательного горизонта изменения физико-химических параметров осуществлен расчет величины управляющего воздействия. При реализации предложенной концепции управления выявлена высокая чувствительность показателей качества деструктированного полимера к незначительным колебаниям температуры реакционной смеси. На основе результатов проведенных исследований сформулированы основные технические требования к автоматизированной системе и предложен способ коррекции величины управляющего сигнала.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, системный анализ, структурный синтез, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных технологических процессов промышленного производства низкомолекулярных полимеров с активными гидроксильными и карбоксильными группами является термоокислительная деструкция полимерного материала в растворе толуола [1, 2]. Как и в любом химическом процессе в качестве основного технологического оборудования деструкции выступает реакционный

аппарат, в котором одновременно с химическими превращениями происходят теплообменные процессы. Химические реакторы представляют собой сложную теплоэнергетическую систему, которая обеспечивает получение конечного продукта за минимально возможное время и с наименьшими ресурсозатратами при наличии автоматизированной системы управления (АСУ), обеспечивающей эффективное проведение процесса.

Аппаратно технология термоокислительного разрушения полимеров в растворе реализована в промышленном реакторе периодического действия. В настоящее время, для

✉ Попов Алексей Петрович
e-mail: aleksej_p_91@mail.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

синтеза полимерных материалов действующие АСУ реализованы с использованием различных методов и подходов теории автоматического управления, среди которых необходимо выделить: предиктивное управление [3–7], нелинейное управление [8], многоальтернативные системы с переменной структурой [9], управление по принципу максимального быстродействия [10] и принципу коррекции управляющего сигнала [11]. В большинстве работ в качестве основного регулируемого параметра используется температурный режим работы реактора.

Анализ работ, посвященных разработке систем управления процессами деструкции показал, что их количество крайне невелико [12–17]. В указанных работах авторы остановились на этапах разработки математических моделей физико-химических процессов в реакционной области, системного анализа, выбора способов управления и создания управляющих алгоритмов. При этом не созданы алгоритмические структуры и модели систем управления, не спроектированы регулирующие устройства и не выполнена оценка оптимальных значений управляющих параметров. Как следствие, отсутствуют теоретические подходы к проектированию АСУ производством низкомолекулярных полимеров методом их направленной деструкции до заданной глубины разрушения молекулярных связей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Современный уровень системы управления периодическим реактором производства деструктированного полимера в растворе не позволяет обеспечить, точность расчета и своевременность подачи управляющих воздействий, при этом большая часть параметров реакторного блока регулируется в ручном режиме. Действующая автоматизированная система управления, в основном, выполняет функции контроля технологических параметров на базе устаревших контрольно-измерительных приборов. Оперативное прогнозирование состояний процесса отсутствует. Поэтому, необходимо создание АСУ, на основе прогнозирующих математические

моделей, с помощью которых производится: построение и экстраполяция горизонтов изменения переменных состояния системы с коррекцией по возмущающим воздействиям, величины которых возможно измерить; расчет управляющих воздействий и определение моментов времени их подачи на технические средства автоматизации управления.

Создание подобной системы позволит получать полимер с заданными показателями качества за минимальное время работы реакторной установки и поэтому является актуальной научно-производственной задачей.

Процесс разработки автоматизированной системы управления включает следующие этапы:

- разработка математического обеспечения АСУ;
- системный анализ реактора деструкции как объекта управления;
- получение функциональных зависимостей для расчета величины управляющего воздействия;
- структурный синтез системы управления;
- разработка программного обеспечения системы управления.

Разработка математического обеспечения АСУ

На начальной стадии проектирования выполнен синтез математического обеспечения АСУ, основой которого являются модели, прогнозирующие изменение скоростей химических превращений в зависимости от технологических параметров процесса с учетом тепловых эффектов химических реакций, а также теплообменных процессов внутри реакционного аппарата [3–5]. Структура математического обеспечения представлена на рис. 1.

На рис. 1 m_{sm} — масса реакционной смеси; $T_{sm}(0)$ — температура смеси в начальный момент времени; P_0 — начальная концентрация полимера; I_0 — начальная концентрация инициатора; R_0 — начальная концентрация радикала; D_0 — начальная концентрация деструктора; $k_1(0) \dots k_8(0)$ — значения констант скоростей химических превращений в начальный момент времени; $T_{vz}(0)$ — темпера-

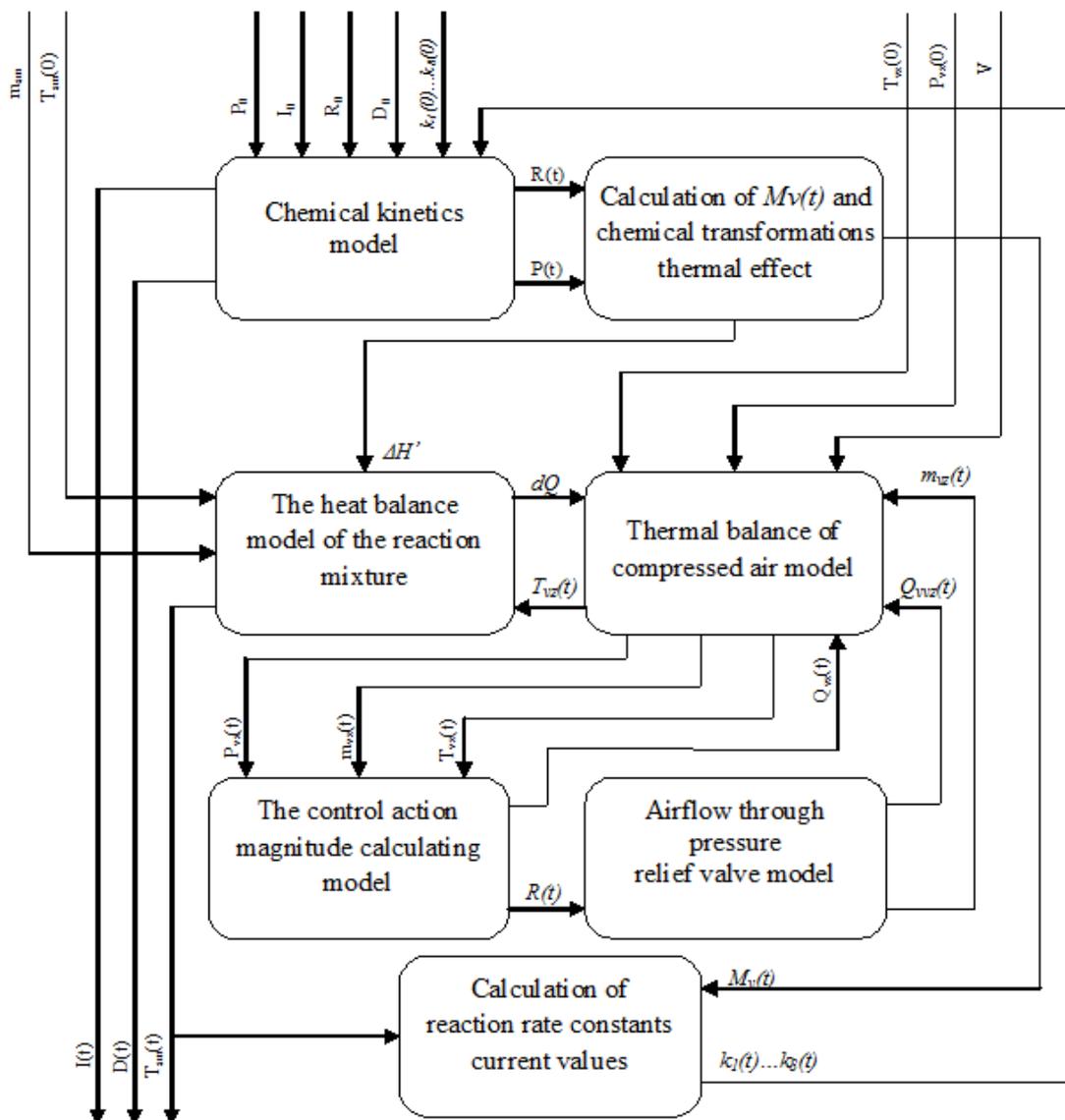


Рис. 1. Структура математического обеспечения АСУ температурным режимом
 [Fig. 1. The automated control system mathematical support structure of temperature condition]

тура воздуха в начальный момент времени протекания процесса; $P_{vz}(0)$ — давление воздуха в начальный момент времени; V — объем сжатого воздуха; $R(t)$ — концентрация радикала в момент времени t ; $P(t)$ — текущее значение концентрации полимера в момент времени t ; $m_{vz}(t)$ — масса воздуха в момент времени t ; dQ — количество теплоты отводимое от реакционной среды к сжатому воздуху, Дж; $T_{vz}(t)$ — температура воздуха в момент времени t ; $P_{vz}(t)$ — давление воздуха в момент времени t ; $Q_{vz}(t)$ — количество теплоты отведенное от воздуха в процессе адиабатического расширения в момент времени t ; $\Delta H'$ — количество теплоты, выделившееся в

результате изменения концентрации полимера и радикала на величины $\Delta P(t)$ и $\Delta R(t)$ соответственно, Дж; $M_v(t)$ — значение средневязкостной молекулярной массы в момент времени t ; $I(t)$ — концентрация инициатора в момент времени t ; $D(t)$ — концентрация деструктора в момент времени t ; $T_{sm}(t)$ — температура смеси в момент времени t ; $k_1(t) \dots k_8(t)$ — значения констант скоростей реакций в момент времени t .

Системный анализ процесса деструкции как объекта управления

В ранее опубликованных работах предложены способы управления процессом де-

струкции периодического действия, основанные на: стабилизации температуры и концентрации полимера в окрестности максимально допустимого значения; варьировании скорости подачи атмосферного воздуха через реакционную смесь; увеличении количества иницирующего агента путем его дополнительного введения в процессе деструкции; варьировании величины начальной концентрации иницирующего агента.

На основе результатов математического моделирования, а также системного анализа процесса деструкции [20] установлено, что, наиболее эффективным подходом к управлению скоростью и глубиной разрушения полимера является изменение температурного режима работы реактора. Однако необходимо отметить, что, при повышении температуры протекания процесса до 70 °С и выше, наблюдается возникновение побочных реакций рекомбинации полимерных цепей. Поэтому для обеспечения проведения процесса с максимальной скоростью без образования микрогелей в результате протекания реакций рекомбинации, температуру деструкции необходимо стабилизировать в диапазоне 60 ± 1 °С.

Так как термоокислительная деструкция является экзотермическим процессом (повышение температуры происходит пропорционально увеличению концентрации полимерных молекул), протекающим под давлением сжатого воздуха в 2 атм., то для снижения температуры в реакционном аппарате наиболее целесообразно использовать способ воздухоотведения из реакционной зоны, в процессе которого происходит адиабатическое расширение и снижение количества сжатого воздуха в аппарате. В результате чего, происходит снижение температуры реакционной смеси.

Расчет величины управляющего воздействия

Для реализации выбранного способа управления температурным режимом работы реакторного блока необходимо синтезировать систему управления, главной функцией которой является расчет величины управляющего воздействия и определение момента времени подачи соответствующих сигналов

на технические средства управления. Управляющим воздействием является количество сжатого воздуха, которое необходимо удалить из реактора в атмосферу для поддержания температуры реакционной смеси в заданном диапазоне.

В результате применения выбранного способа стабилизации температуры, реакционная смесь как динамическая система переходит из одного состояния в другое, что способствует возникновению теплообменных процессов, последовательность которых отражена в табл. 1.

За время пребывания смеси в реакционном аппарате последовательность процессов повторяется циклически при каждом сбросе давления. В процессе химических превращений происходит выделение количества теплоты, в результате чего температура реакционной среды увеличивается. Это приводит к возникновению разности температур между раствором полимеризата и сжатым воздухом и, как следствие, теплоотдаче от смеси реагентов к воздушному слою. Рост температуры сопровождается повышением давления сжатого воздуха в верхней части реакционного аппарата.

Разработанное математическое обеспечение АСУ позволяет производить расчет значений управляющего воздействия с учетом тепловых потоков в реакторном пространстве.

Используя уравнения тепловых балансов реакционной смеси и воздуха, математическое описание теплообменных процессов можно представить следующим образом:

1. Уравнение теплового баланса раствора полимеризата:

$$Q_{sm}(t) = Q_{sm}(0) + \Delta H' - dQ(t), \quad (1)$$

где $Q_{sm}(t)$ — количество теплоты реакционной смеси в произвольный момент времени протекания процесса t , кДж; $Q_{sm}(0)$ — количество теплоты реакционной смеси в начальный момент времени, кДж; $\Delta H'$ — суммарный тепловой эффект химических реакций, кДж; $dQ(t)$ — количество теплоты, отданное от реакционной среды сжато-му воздуху, кДж.

$$Q(0) = c_{обц} \cdot m_{обц} \cdot T(0), \quad (2)$$

где $m_{обц} = m_{iol} + m_{ckd}$ — общая масса раствора,

Таблица 1. Стадии процесса деструкции
[Table 1. Stages of the destruction process]

Стадия протекания процесса		Наименование состояния физических сред в реакторном пространстве	Состояние клапана на линии воздухоотведения	Параметры состояния		
				Реакционной смеси	Воздушного слоя	
				$T_{sm}, ^\circ\text{C}$	$T_{vz}, ^\circ\text{C}$	$P, \text{атм}$
Начало процесса деструкции		Состояние термодинамического равновесия между реакционной смесью и воздушным слоем.	Положение «Закрото»	60	60	2
Активная фаза процесса	Теплоотдача от поверхности реакционной смеси к воздушному слою в результате экзотермического эффекта химических превращений	Увеличение скорости термоокислительного разрушения полимера. Нагрев реакционной смеси и сжатого воздуха.	Положение «Закрото»			
	Адиабатическое расширение сжатого воздуха в результате воздухоотведения	Снижение скорости процесса термоокислительного разрушения полимера. Охлаждение воздушного слоя и последующее охлаждение смеси.	Положение «Открито»			
	Теплоотдача от поверхности реакционной смеси к воздушному слою	Увеличение скорости термоокислительного разрушения полимера. Нагрев воздушного слоя до состояния термодинамического равновесия.	Положение «Закрото»			

равная сумме масс толуола (m_{mol}) и полимера (m_{ckd}), кг; $T(0)$ — начальная температура среды, К; $c_{общ}$ — общая теплоемкость полимеризата, Дж/(кг*К).

$$c_{общ} = \frac{m_{tol} \cdot c_{tol} + m_{ckd} \cdot c_{ckd}}{m_{tol} + m_{ckd}}, \quad (3)$$

где c_{tol} и c_{ckd} — теплоемкости толуола и полимера соответственно, Дж/(кг*К).

$$\Delta H' = \Delta H^P \cdot C_{tol} \cdot V_{sm} + \Delta H^R \cdot C_{ckd} \cdot V_{sm}, \quad (4)$$

где $\Delta H^P = \Delta H^R = 10 \div 60$ кДж/моль — тепловые эффекты реакций образования полимера и радикала, кДж/моль; P и R — концентрации полимера и радикала соответственно, моль/л; V_{sm} — объем реакционной смеси, м³.

2. Количество теплоты, поглощенное сжатым воздухом рассчитывается по закону Ньютона — Рихмана, описывающего поток тепла между различными средами с разными температурами:

$$dQ = q \cdot S \cdot t, \quad (5)$$

где q — плотность теплового потока (температурный напор), Вт/м²; $S = \pi r^2$, где r — внутренний радиус реактора, м.

$$q = \alpha \cdot \Delta T, \quad (6)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²*К, $\Delta T = (T_{sm}(t) - T_{vz}(t))$ — разность температур реакционной смеси (T_{sm}) и воздуха (T_{vz}) в момент времени t , К.

3. Уравнение теплового баланса сжатого воздуха:

$$Q_{vz}(t) = Q_{vz}(0) + dQ(t), \quad (7)$$

где $Q_{vz}(t)$ — количество теплоты реакционной смеси в произвольный момент времени протекания процесса t , кДж; $Q_{vz}(0)$ — количество теплоты реакционной смеси в начальный момент времени, кДж; $dQ(t)$ — количество теплоты, отданное от реакционной среды сжатому воздуху, кДж.

4. Из уравнения теплового баланса (7) производится расчет текущего значения температуры сжатого воздуха:

$$T_{vz}(t) = \frac{m_{vz}(0) + c_{vz} + T_{vz}(0) + dQ(t)}{m_{vz}(0) + c_{vz}}, \quad (8)$$

где $T_{vz}(0)$ — температура воздуха в начальный момент времени протекания процесса; c_{vz} — теплоемкость воздуха, Дж/(кг*К); $m_{vz}(0)$ — начальная масса воздуха.

5. При протекании химического процесса происходит одновременное изохорное нагревание воздуха, которое описывается законом Шарля, что позволяет определить давление сжатого воздуха в произвольный момент времени t :

$$P_{vz}(t) = \frac{T_{vz}(t) \cdot P(0)}{T_{vz}(0)}, \quad (9)$$

где $P(0)$ — давление воздуха в начальный момент времени, Па; $T_{vz}(t)$ — температура воздуха в момент времени t , К.

6. Учитывая, что воздух является единственным газом внутри аппарата и занимает весь предоставляемый объем, то его состояние в произвольный момент времени описывается уравнением Менделеева — Клапейрона, на основе которого выполняется расчет массы воздуха:

$$P(0) \cdot V_{vz} = \frac{m(t)}{M} \cdot R \cdot T_{vz}(t), \quad (10)$$

где $V_{vz} = \text{const}$ — объём воздуха, м³; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль*К); V_{vz} — объём воздуха, м³; $P(t)$ — давление воздуха в момент времени t , Па.

7. Уравнение теплового баланса сжатого воздуха в аппарате с учетом адиабатических условий протекания деструкции и периодического сброса давления выглядит следующим образом:

$$Q_{vz}(t) = Q_{vz}(0) + \Delta Q_{vz}(t) + dQ(t), \quad (11)$$

где $\Delta Q_{vz}(t)$ — количество теплоты, отведенное из реакторного блока в момент времени t протекания процесса при нахождении клапана воздухоотведения в открытом положении, кДж; $dQ(t)$ — количество теплоты, переданное воздуху от поверхности реакционной смеси в момент времени t протекания процесса в результате возникновения разности

температур между средами при отведении воздуха в атмосферу, кДж.

$$Q_{vz}(t) = \Delta m_{vz}(t) \cdot c_{vz} \cdot (T_{vz}(t) - T_{vz}^z), \quad (12)$$

где $\Delta m_{vz}(t)$ — количество отведенного воздуха из реактора в момент времени t , кг; $T_{vz}(t)$ — температура воздуха в момент времени t , К; $T_{vz}^z = 333,5$ — заданное значение температуры воздуха, К (60 °С).

8. При открытии клапана на линии отведения воздуха в реакторе происходит процесс адиабатического расширения идеального газа, который описывается адиабатой Пуассона:

$$T_{vz}^k(t) \cdot P_{vz}^{(1-k)}(t) = \text{const}, \quad (13)$$

где $T_{vz}(t)$ — температура воздуха в момент времени t , К; $P_{vz}(t)$ — давление воздуха в момент времени t , Па; k — показатель адиабаты для воздуха $k = 1,4$.

Таким образом, давление в системе, после завершения процесса воздухоотведения рассчитывается с помощью следующей зависимости:

$$p(\tau) = e^{\frac{k \cdot \ln T(t) + (1-k) \cdot \ln p(0) - k \cdot \ln T(0)}{1-k}}, \quad (14)$$

где τ — момент времени от открытия клапана на линии отвода воздуха до установления температуры воздуха $T_{vz}(t) = T_{vz}^z$, с.

9. При адиабатическом расширении состояние воздуха описывается, уравнением Менделеева — Клапейрона с использованием газовой постоянной воздуха:

$$PV = m \cdot R_m \cdot T, \quad (15)$$

где $R_m = 287$ — газовая постоянная воздуха, Дж/(кг*К).

10. Тогда масса воздуха, которая остается внутри аппарата после завершения процесса водоотведения определяется следующим выражением:

$$m(\tau) = \frac{P_{vz}(\tau) \cdot V_{vz}}{R_{\alpha}(\tau) \cdot T_0(0)}, \quad (16)$$

11. Уравнения (14)–(16) представляют собой модуль расчета управляющего воздействия, в качестве которого выступает величина, являющаяся алгебраической суммой массы воздуха в момент времени открытия клапана сброса давления ($m(0)$) и аналогич-

ного значения, рассчитанного с помощью выражения (16):

$$\Delta m = m(0) - m(\tau), \quad (17)$$

12. Время открытия клапана, за которое происходит отвод необходимого количества воздуха, определяется исходя из конструктивных параметров установленного механизма с использованием уравнения расхода газа через устройство регулирования величины потока вещества:

$$G = F_c \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2g \cdot \gamma \cdot p \cdot (1 - \sigma)}, \quad (18)$$

где F_c — площадь проходного сечения в седле клапана, м²; α — коэффициент расхода клапана отнесенный к сечению седла F_c ; p — абсолютное давление перед открытым клапаном, Па/м²; γ — плотность газа перед клапаном, кг/м³; $\sigma = p_2/p$ — отношение давлений; p_2 — давление за открытым клапаном, Па/м²; g — ускорение свободного падения, м/с²; ε — коэффициент, учитывающий расширение воздуха.

13. Время, на протяжении которого клапан находится в открытом состоянии определяется выражением:

$$\tau = \frac{\Delta m}{\rho \cdot G}, \quad (19)$$

где ρ — плотность сжатого воздуха, кг/м³; G — расход воздуха через клапан, м³/ч.

14. Тогда суммарное количество воздуха, отведенное из реакторного блока за время t можно определить:

$$\Delta m = \int_0^t \Delta m(t) dt, \quad (20)$$

где $\Delta m(t)$ — количество воздуха, отведенное из реактора в момент времени t , кг.

Структурный синтез системы управления

Синтез алгоритмической структуры АСУ выполнен на основе системного подхода, в соответствии с которым объект управления выделен из внешней среды (табл. 2) и поставлена задача управления.

Таким образом, сформированы общая и частная задачи синтеза системы управления температурным режимом в процессе деструкции:

– **общая задача:** разработка алгоритмической структуры системы, то есть определение состава элементов-звеньев и принципа взаимодействия между ними.

– **частная задача:** расчет величины управляющего воздействия, производящего через заранее рассчитанные временные интервалы

Таблица 2. Структурный анализ системы управления
[Table 2. Structural analysis of the control system]

Задача управления	Элементы системы управления	Внешние системы	Исходные данные
Управление температурным режимом работы реактора посредством отведения сжатого воздуха	1. Подсистема управления температурным режимом работы реактора. 2. Подсистема мониторинга состояния технологического оборудования и технологических параметров. 3. Вычислительный центр (промышленный контроллер).	1. Система подогрева реакционной смеси до заданной температуры подачей греющего пара в рубашку аппарата. 2. Система загрузки реагентов в реакционную зону. 3. Система регулирования давления в аппарате. 4. Внешняя среда: возмущающие воздействия.	1. Значения технологических параметров процесса. 2. Траектория изменения температуры реакционной смеси и сжатого воздуха. 3. Технические характеристики и основные параметры реактора и запорно-регулирующих механизмов.

Δt понижение температуры в реакционном аппарате на величину ΔT .

В условиях, когда режим работы реактора является адиабатическим, т. е. не происходит теплообмена с окружающей средой, одним из главных допущений, принятых при проектировании АСУ является отсутствие внешних возмущений, действующих на реактор. Тогда структура системы, реализующая алгоритм программного управления температурой реакционной смеси на основе прогнозирующих моделей имеет следующий вид (рис. 2).

На рис. 2 $W_p(s)$ — передаточная функция регулятора; $W_{im}^1(s)$ — передаточная функция исполнительного механизма на линии воздухоотведения; $W_o(s)$ — передаточная функция объекта управления; $W_d^1(s)$ — датчик температуры реакционной смеси; $W_d^2(s)$ — датчик вискозиметр; $g(s)$ — задающее воздействие, подаваемое на вход регулятора; $y_1(s)$ — контролируемая величина (вязкость реакционной смеси); $y_2(s)$ — управляемая величина (температура в реакционном аппарате); $e(s)$ — отклонение управляемой величины $y_2(s)$ от задающего воздействия; $u_1(s)$ — выходной сигнал регулирующего устройства; $u_2(s)$ — корректирующий сигнал; $u(s)$ — управляющее воздействие, подаваемое на исполнительных механизм; $x_2(s)$, $x_3(s)$ — вы-

ходные сигналы измерительных приборов — датчиков температуры внутри аппарата и вязкости смеси с передаточными функциями $W_d^1(s)$, $W_d^2(s)$ соответственно; MPC Controller — программируемый контроллер, реализующий программное управление на основе математических моделей процесса в рамках теории предиктивного управления.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные при использовании синтезированной системы управления динамические характеристики работы реакторного блока, на протяжении 24 часов проведения процесса деструкции, представлены на рис. 3 – рис. 4. При этом, в качестве предельной величины температуры протекания процесса принято значение 61 °С.

Изменение концентраций химических компонентов и средневязкостной молекулярной массы полимера при температурном режиме протекания процесса представлено на рис. 3.

Численные значения средневязкостной молекулярной массы, полученные в результате реализации предложенного алгоритма управления реактором ($Mv^1(t)$), в сравнении с аналогичными данными, рассчитанными

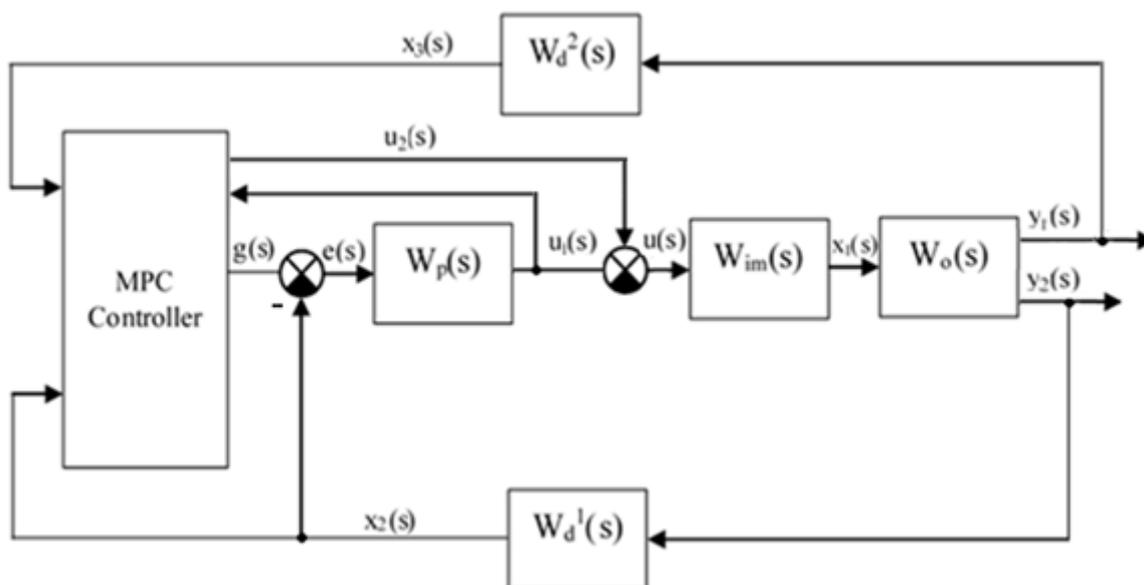


Рис. 2. Структурная схема системы управления температурой реакционной смеси в процессе термоокислительной деструкции

[Fig. 2. The reaction mixture temperature control system structural diagram in the thermo-oxidative degradation process]

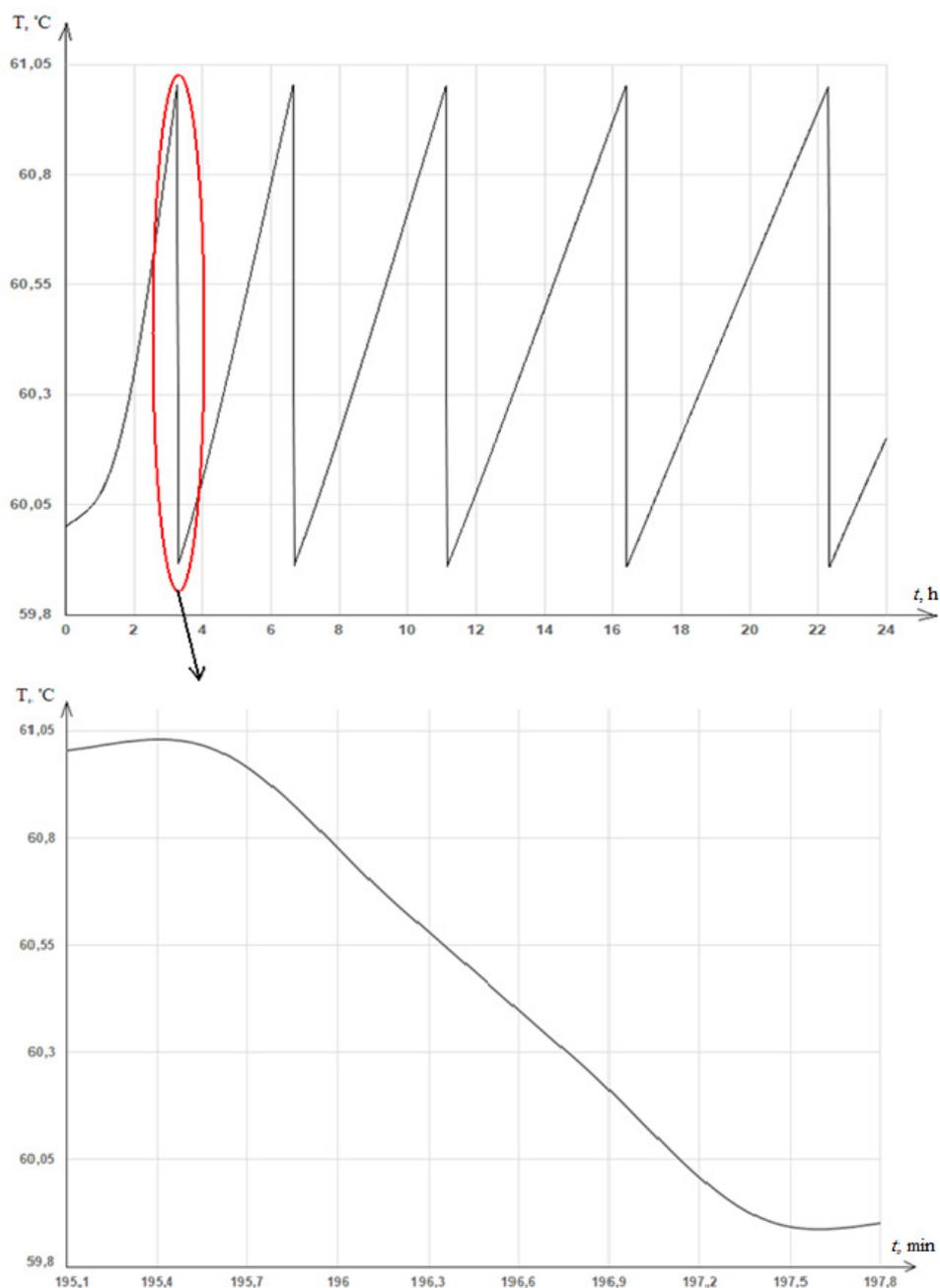


Рис. 3. Динамика изменения температуры реакционной смеси
 [Fig. 3. Dynamics of the reaction mixture temperature]

при изотермическом режиме работы ($Mv^2(t)$) представлены в табл. 3.

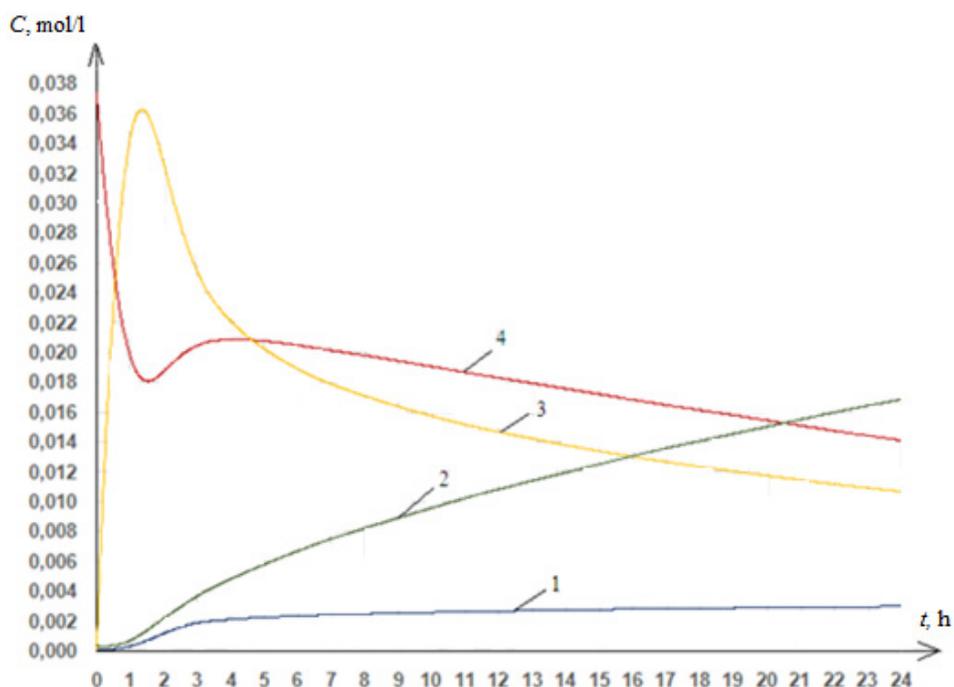
Таблица 3. Значения средневязкостной молекулярной массы

[Table 3. Mean viscosity molecular weight values]

Время, ч	$Mv^1(t)$	$Mv^2(t)$
0	223790,10	2237090,10
2	14136,93	16035,12
4	5395,47	6148,99

6	3858,63	3710,57
8	3086,67	3581,35
12	2293,70	3134,76
16	1867,16	2554,59
20	1587,76	2380,92
24	1391,55	1979,85

При этом, временные моменты открытия и закрытия клапана на линии воздухоотведения из реактора отображены на рис. 5.

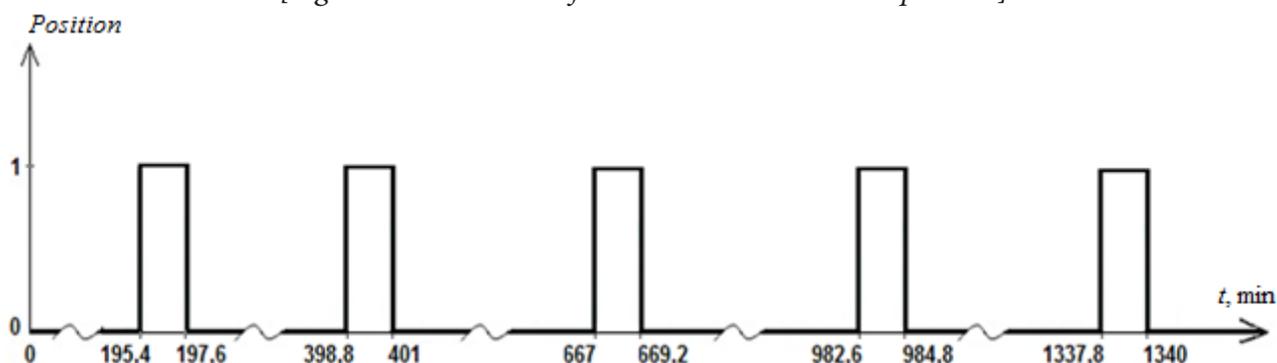


1 – график изменения концентрации радикала; 2 – график изменения концентрации полимера; 3 – график изменения концентрации деструктора; 4 – график изменения концентрации инициатора.

Рис. 4. Кинетические кривые компонентов реакционной среды

1 – graph of radical concentration changes; 2 – graph of polymer concentration changes; 3 – graph of destructor concentration changes; 4 – graph of initiator concentration change.

[Fig. 4. Kinetic curves of the reaction mixture components]



Position 0 – valve is closed; Position 1 – valve is open;

Рис. 5. Временная диаграмма открытия/закрытия клапана воздухоотведения из реактора [Fig. 5 Opening / closing timing diagram of the vent valve from reactor]

Таблица 4. Время открытия клапана на линии воздухоотведения [Table 4. Valve opening time on the vent line]

Открытие клапана	Время, мин	Временной интервал между открытиями, мин
1-е	195,4	–
2-е	398,8	203,4
3-е	667	268,2
4-е	982,6	315,6
5-е	1337,8	355,2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что наибольшая скорость увеличения температуры реакционной смеси приходится на временной интервал до 4 часов от начала процесса деструкции, что соответствует динамике изменения концентраций полимера (рис. 4) [19]. После 4 часов происходит снижение скорости химических реакций деструкции, в результате чего увеличиваются временные интервалы, за которые температура реагентов принимает пороговое значение 61 °С. Следовательно, временные промежутки между открытиями клапана на линии воздухоотведения становятся более продолжительными (табл. 4). Также одним из важных итогов проведенных исследований является выявление наличия высокой чувствительности такого показателя качества полимера как средневязкостная молекулярная масса к колебаниям температуры реакционной среды относительно заданного значения (60 °С), максимальное значение которых составляет один градус. Это следует из сопоставления значений средневязкостной молекулярной массы полимера, полученных в результате реализации предложенного способа управления и данных вычислительного эксперимента, имитирующего динамику процесса деструкции в квазестационарном температурном режиме (табл. 3). Таким образом, в производственных условиях, для получения низкомолекулярного полимера с заданной степенью деструкции за заданный временной интервал, когда имеет место варьированное движение основного управляющего параметра (температура реакционной смеси) относительно его номинального значения, основным требованием к АСУ является быстродействие. Обеспечить оперативность выработки и подачи управляющего воздействия на объект возможно путем предварительного расчета динамики изменения величины задающего сигнала регулятору на основе прогнозирующих моделей. При этом коррекция траектории управляющего воздействия осуществляется путем одновременной подачи значения управляемого параметра на регулятор, а выходных параметров состоя-

ния на модель объекта (блок MPC Controller). Итоговая величина управляющего воздействия, поступающая на исполнительный механизм линии воздухоотведения из реактора, рассчитывается с учетом инерционности основного канала управления на основе сопоставления результатов моделирования с величиной задающего воздействия (рис. 2).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев, Ю. К. Синтез низкомолекулярных каучуков с функциональными группами методом термоокислительной деструкции / Ю. К. Гусев [и др.] // Мат. XVII МНПК «Резиновая промышленность. Сырье. Материалы. Технологии». – Москва, 2012. – С. 45–46.
2. Получение низкомолекулярных функционализируемых полимеров термоокислительной деструкцией стереорегулярного полибутадиена/ Т. Н. Шехавцова, Г. В. Шаталов, А. С. Шестаков, В. Н. Папков, А. С. Паневин// Конденсированные среды и межфазные границы. –2016. – Т. 18, № 3. – С. 414–421.
3. Задорина, Е. Н. Прогностические возможности исследования релаксационной природы термической деструкции полимеров / Е. Н. Задорина // Вестник Московского авиационного института. – 2015. – № 3(22). – С. 116–121.
4. Emulsion polymerization process control / Ruben Mil [and etc.] // VI international conference on electromechanics and system engineering. – Mexico, 2011. – P. 1–4.
5. Masoud Abbaszadeh. Constrained Nonlinear Model Predictive Control of a Polymerization Process via Evolutionary Optimization/ Masoud Abbaszadeh, Reza Solgi // Journal of Intelligent Learning Systems and Applications. – 2014. – V. 6. – P. 35–44. DOI: 10.4236/jilsa.2014.61004
6. Solgi, R. Adaptive Fuzzy Control of MMA Batch Polymerization Reactor Based on Fuzzy Trajectory Definition / R. Solgi, R. Vosough and

M. Rafizadeh // Proceeding of the 2004 American Control Conference, Boston, June 30 – July 2, 2004. – P. 1097–1102. DOI: 10.23919/ACC.2004.1386718

7. *Shafiee, G.* Nonlinear Predictive Control of a Polymerization Reactor Based on Piecewise Linear Wiener Model / G. Shafiee, M. R. Jahed-Motlagh and A. A. Jalali // Chemical Engineering Journal. – 2008. – V. 143, No. 1–3. – P. 282–292. DOI: 10.1109/ICELIE.2006.347195

8. *Masoud, Soroush.* Nonlinear Control Reactor: an of a Batch Polymerization Experimental Study/Masoud Soroush, Costas Kravaris // AIChE Journal. – 1992. – V. 38, № 9. – P. 1429–1447. DOI: 10.23919/ACC.1991.4791931

9. *Подвальный, С. Л.* Многоальтернативные системы с переменной структурой автоматического управления процессами непрерывной полимеризации / С. Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – Т. 46, № 4.1. – С. 175–178.

10. *Зейналов, Р. И.* Использование принципа управления по быстродействию для оптимизации процесса синтеза катализатора олигомеризации и полимеризации олефинов / Р. И. Зейналов, Р. А. Кербалиев, Н. М. Сейдов // Химия и технология топлив и масел. – 2011. – 4(566). – С. 40–44.

11. *Сафин, М. А.* Разработка системы автоматического управления реактором синтеза суспензионной полимеризации стирола с учетом кинетики процесса: дис. ... канд. тех. наук. – Москва, 2014. – С. 78–80.

12. Получение низкомолекулярных функционализированных полимеров термоокислительной деструкцией стереорегулярного полибутадиена / Т. Н. Шехавцова [и др.] // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2016. – №3 (18). – С. 414–421.

13. Термоокислительная деструкция как способ получения низкомолекулярных полидиеновых полимеров / Т. Н. Шехавцова [и др.] // Каучук и резина. – 2018. – № 6(77). – С. 358–361.

14. Пат. 2600637 Российская Федерация, Способ переработки отходов, содержащих терморезистивные полимеры / Загайнов В. С. и др.; патентообладатель Акционерное общество «Восточный научно исследовательский углехимический институт» (АО «ВУХИН»),

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского Уральского отделения Российской академии наук (ИОС УрО РАН). – № 2015110013/05; заяв. 20.03.2015; опубл. 27.10.2016. – С. 9.

15. Пат. 2207350 Российская Федерация. Способные подвергаться биологической деструкции полимеры, цепи которых удлинены фосфатами, композиции, изделия, способы их получения и использования / Мао Хай-Куан и др.; заявитель и патентообладатель ГИЛ-ФОРД ФАРМАСЬЮТИКАЛС ИНК (US), ДЖОНС ХОПКИНС ЮНИВЕРСИТИ СКУЛ ОФ МЕДИСИН (US). – № 99123428/04; заяв. 02.04.1998; опубл. 27.06.2003. – С. 65.

16. *Хаустов, И. А.* Управление процессом деструкции полимеров в растворе на основе дробной загрузки инициатора / И. А. Хаустов // ВГУИТ. – 2014. – № 4 (62). – С. 86–91.

17. Пат. 2554623 Российская Федерация. Способ оценки и прогнозирования процессов старения (деструкции) полимерных материалов по динамике суммарного газовыделения и токсичности летучих органических соединений (ЛОС), мигрирующих из полимера в процессе старения, детектируемых методом хроматомасс-спектрологии / Мухамедиева Л. Н. и др.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный Институт медико-биологических проблем. – № 2013148587/05; заяв. 31.10.2013; опубл. 27.06.2015. – С. 10.

18. Контроль и прогнозирование параметров качества полимеров в процессе их деструкции в растворе / С. Г. Тихомиров [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 2018. – Т. 52, № 4. – С. 466–472. DOI: 10.1134/S0040357118040085

19. Математическое моделирование процесса термоокислительной деструкции полибутадиена в растворе / С. Г. Тихомиров [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 8. – С. 10–13.

20. Системный анализ процесса термоокислительной деструкции полимеров в растворе как объекта управления / В. К. Битюков [и др.] // Вестник ВГУИТ. Серия: Информационные технологии, моделирование и управление. – 2014. – №3 (61). – С. 61–66.

Попов Алексей Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий.

E-mail: aleksej_p_91@mail.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1875-0868>

Тихомиров Сергей Германович – д-р техн. наук, проф. кафедры информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий.

E-mail: tikhomirov_57@mail.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8192-0049>

Хаустов Игорь Анатольевич – д-р технических наук, зав. кафедрой информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий.

E-mail: haustov_ia@mail.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8897-5763>

Хвостов Анатолий Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий.

E-mail: khvtol1974@yandex.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3836-9407>

Тихомиров Герман Сергеевич – магистрант, Воронежский государственный университет.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9149-7694>

DOI: <https://doi.org/10.17308/sait.2020.1/2582>

ISSN 1995-5499

Received 23.12.2019

Accepted 15.03.2020

SYSTEM ANALYSIS AND SYNTHESIS OF A PREDICTIVE CONTROL SYSTEM FOR THE THERMO-OXIDATIVE DESTRUCTION OF POLYMERS IN A PERIODIC REACTOR

© 2020 A. P. Popov^{✉1}, S. G. Tikhomirov¹, I. A. Haustov¹, A. A. Khvostov¹, G. S. Tikhomirov²

¹*Voronezh State University of Engineering Technologies
19, Revolutsii Ave, 394036 Voronezh, Russian Federation*

²*Voronezh State University
1, Universitetskaya Square, 394018 Voronezh, Russian Federation*

Abstract. The article analyses current issues concerning the synthesis of automated control systems for the technological processes of polymer degradation. A systematic approach to the synthesis of a control system allowed us to formulate general and specific control problems. To solve them, systemic relationships were established between the input and output parameters of the control object, the mathematical description of the process, and the values of the operational parameters of the process. The article describes the main stages and results of the synthesis of an automated system for proactive temperature management in the reactor for the thermal-oxidative destruction of polymers in a solution by means of reducing the pressure in the reaction zone. To implement the suggested control method, we designed a model and an algorithm for calculating the control magnitude, developed the software and synthesised the structure of the automated programmable

✉ Popov Alexey A.
e-mail: aleksej_p_91@mail.ru

control system. The control magnitude was calculated using the prediction horizon for the changes in the physico-chemical parameters. Implementation of the proposed control method revealed the high sensitivity of the quality indicators of the degraded polymer to minor temperature fluctuations in the reaction mixture. Based on the results of the study, the main technical requirements for the automated system were formulated and a method for correcting the value of the control signal was proposed.

Keywords: automated control system, system analysis, structural synthesis, mathematical modeling.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Gusev Yu. K. Synthesis of low molecular weight rubbers with functional groups by the method of thermooxidative destruction. *Mat. XVIIIMNPK "Rubber industry. Raw materials. Materials Technologies"*. Moscow, 2012. P. 45–46.
2. Obtaining low molecular weight functionalizable polymers by thermal oxidative degradation of stereoregular polybutadiene / Shekhavtsova T. N., Shatalov G. V., Shestakov A. S., Papkov V. N., Panevin A. S. *Condensed matter and interphase boundaries*. 2016. T. 18. No. 3. P. 414–421.
3. Zadorina E. N. Prognostic opportunities for studying the relaxation nature of polymers thermal destruction. *Bulletin of the Moscow Aviation Institute*. 2015. No. 3(22). P. 116–121.
4. Ruben Mil [and etc.] Emulsion polymerization process control. VI international conference on electromechanics and system engineering. Mexico. 2011. P. 1–4.
5. Masoud Abbaszadeh, Reza Solgi. Constrained Nonlinear Model Predictive Control of a Polymerization Process via Evolutionary Optimization. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*. 2014. V. 6. P. 35–44. DOI: 10.4236/jilsa.2014.61004
6. Solgi R., Vosough R. and Rafizadeh M. Adaptive Fuzzy Control of MMA Batch Polymerization Reactor Based on Fuzzy Trajectory Definition. *Proceeding of the 2004 American Control Conference, Boston, June 30 – July 2, 2004*. P. 1097–1102. DOI: 10.23919/ACC.2004.1386718
7. Shafiee G., Jahed-Motlagh M. R. and Jala-li A. A. Nonlinear Predictive Control of a Polymerization Reactor Based on Piecewise Linear Wiener Model. *Chemical Engineering Journal*. 2008. V. 143, No. 1–3. P. 282–292. DOI: 10.1109/ICELIE.2006.347195
8. Masoud Soroush, Costas Kravaris. Nonlinear Control Reactor: an of a Batch Polymerization Experimental Study. *AIChE Journal*. V. 38, No. 9, 1992. P. 1429–1447. DOI: 10.23919/ACC.1991.4791931
9. Basement S. L. Multi-alternative systems with a variable structure of automatic control of continuous polymerization processes. *Control Systems and Information Technologies*. 2011. T. 46. No. 4.1. FROM. P. 175–178.
10. Zeynalov R. I., Kerbaliev R. A., Seidov N. M. Using the principle of speed control to optimize the synthesis of the oligomerization catalyst and olefins polymerization. *Chemistry and technology of fuels and oils*. 2011. 4 (566). P. 40–44.
11. Safin M. A. Development of a system for the automatic control of a reactor for the synthesis of suspension polymerization of styrene, taking into account the kinetics of the process: dis. ... cand. those. sciences. Moscow, 2014. P. 78–80.
12. Shekhavtsova T. N. [et al.] Obtaining low molecular weight functionalized polymers by thermal oxidative stereo regular polybutadiene degradation. *Condensed matter and interphase boundaries*. 2016. No. 3 (18). P. 414–421.
13. Shekhavtsova T. N. [et al.] Thermooxidative degradation as a method of obtaining low molecular weight polydiene polymers. *Rubber and rubber*. 2018. No. 6 (77). P. 358–361.
14. Zagainov V. S. [et al]. Pat. 2600637 Russian Federation, Method for processing waste containing thermosetting polymers; patent holder Joint-Stock Company "Eastern Scientific Research Coal Chemical Institute" (JSC "VUKHIN"), Federal State Budgetary Institution of Science Institute of

Organic Synthesis named after AND I. Postovsky Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IOS UB RAS). No. 2015110013/05; application 03/20/2015; publ. 10/27/2016. P. 9.

15. *Mao Hai-Kuan [and others]* Pat. 2207350 Russian Federation. Biodegradable polymers whose chains are elongated with phosphates, compositions, products, methods for their preparation and use; Applicant and patentee GILFORD PHARMACY INC. (US), JONES HOPKINS UNIVERSITY SCUL OF MEDISIN (US). No. 99123428/04; application 04/02/1998; publ. 06/27/2003. P. 65.

16. *Khaustov I. A.* Polymers process destruction control in a solution based on fractional loading of the initiator. VGUIT. 2014. No. 4 (62). P. 86–91.

17. *Mukhamedieva L. N. [and etc.]*. Pat. 2554623 Russian Federation. A method for assessing and predicting the aging (destruction) of polymer materials by the dynamics of the total gas evolution and toxicity of volatile organic

compounds (VOCs) migrating from the polymer during aging, detected by chromatomass spectroscopy; patent holder Federal State Budgetary Institution of Science State Institute of Biomedical Problems. No. 2013148587/05; application 10/31/2013; publ. 06/27/2015. P. 10.

18. *Tikhomirov S. G. [et al.]* Control and prediction of quality parameters of polymers in the process of their destruction in solution. Theoretical Foundations of Chemical Technology. 2018. T. 52. No. 4. P. 466–472. DOI: 10.1134/S0040357118040085

19. *Tikhomirov S. G. [et al.]* Mathematical modeling of the polybutadien ethermoxidative degradation process in solution. Chemical and oil and gas engineering. 2018. No. 8. P. 10–13.

20. *Bityukov V. K. [et al.]* System analysis of the polymers thermal oxidative degradation process in solution as a control object. Bulletin of VGUIT. Series: information technology, modeling and management. 2014. No. 3 (61). P. 61–66.

Popov Alexey P. – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies.

E-mail: aleksej_p_91@mail.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1875-0868>

Tikhomirov Sergey G. – DSc in Technical Sciences, Professor, Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies.

E-mail: tikhomirov_57@mail.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8192-0049>

Khaustov Igor A. – DSc in Technical Sciences, Head of the Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies.

E-mail: haustov_ia@mail.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8897-5763>

Khvostov Anatoly A. – DSc in Technical Sciences, Professor, Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies.

E-mail: khvtol1974@yandex.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3836-9407>

Tikhomirov German S. – MSc student, Voronezh State University.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9149-7694>