

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ РЕАКТОРА  
ТЕРМООКСИДНОЙ ДЕСТРУКЦИИ ПОЛИМЕРОВ  
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ**

**А. П. Попов, С. Г. Тихомиров, О. Г. Неизвестный, Н. К. Образцов**

*Кафедра информационных и управляющих систем, aleksej\_p\_91@mail.ru;  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет  
инженерных технологий», г. Воронеж, Россия*

**Ключевые слова:** предиктивная система управления; программная архитектура; программное обеспечение; программное управление; термоокислительная деструкция; функциональная структура.

**Аннотация:** Приведена архитектура программного обеспечения автоматизированной системы управления температурным режимом работы реактора термоокислительной деструкции полимеров. Дано описание функциональных возможностей совокупности разработанных программных модулей, с помощью которых реализован метод предиктивного (упреждающего) управления технологическим процессом на основе комплекса имитационных моделей физико-химических стадий процесса.

---

### Введение

Одним из перспективных технологических процессов синтеза низкомолекулярных полимеров с активными гидроксильными и карбоксильными группами (концевыми группами) является термоокислительная деструкция полимера в растворе. Процесс протекает в реакторе, представляющем собой аппарат идеального смешения периодического действия, в котором совместно с химическими превращениями протекают тепло- и массообменные процессы.

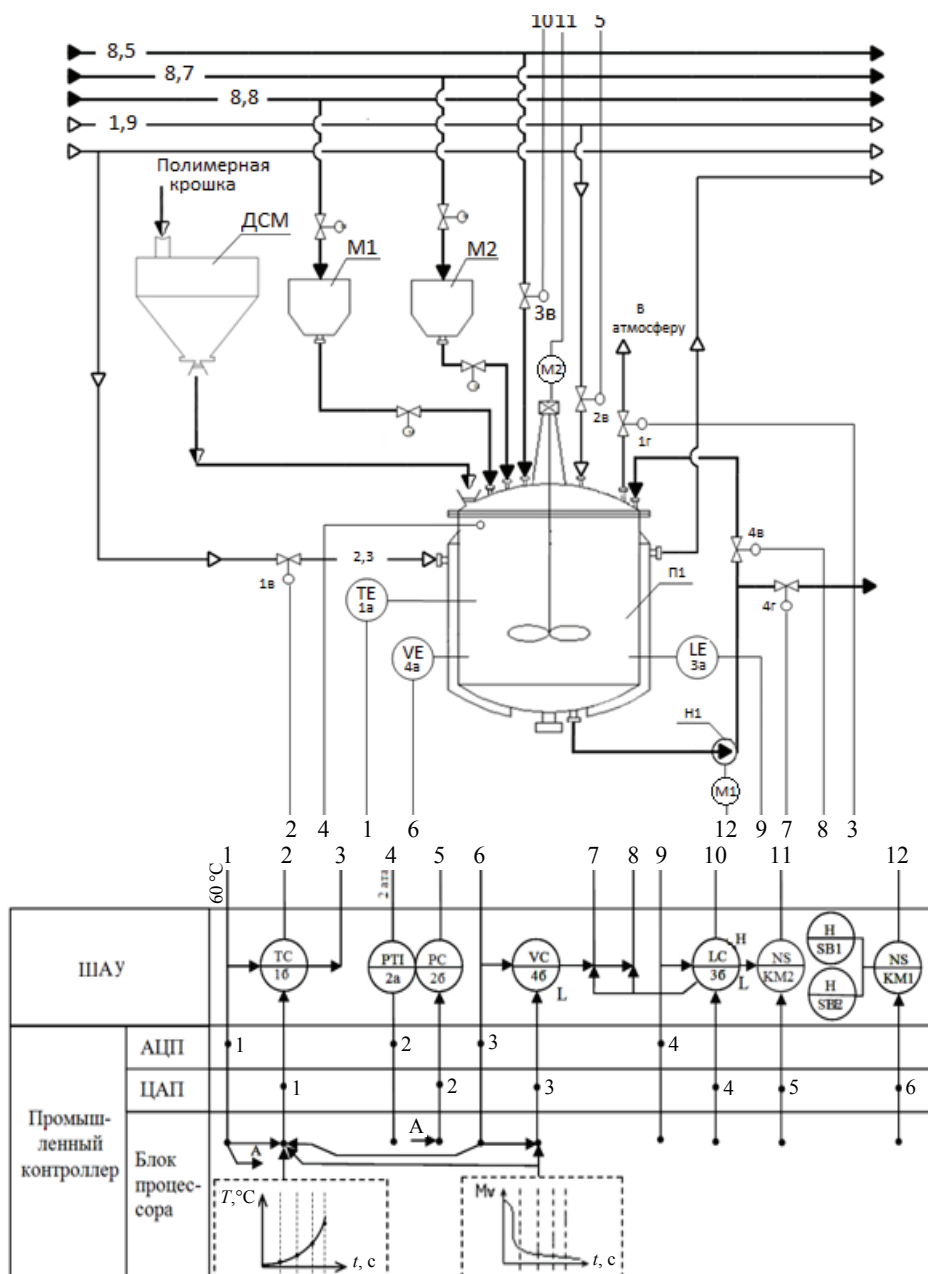
На основе результатов системного анализа [1] и математического моделирования [2 – 4] деструкции предложен способ управления температурным режимом работы реактора, заключающийся в периодическом целенаправленном снижении давления над поверхностью реакционной смеси. В результате происходит адиабатическое расширение сжатого воздуха в аппарате, приводящее к охлаждению реакционной смеси, что является эффективным средством стабилизации температуры в реакционной зоне, для управления скоростью химических превращений и динамикой изменения показателей качества полимера.

Реализация выбранного способа управления процессом требует своевременного и упреждающего выполнения операций, направленных на выработку управляющих воздействий с высокой степенью точности и в строго определенные моменты времени [5]. Таким образом, для управления технологическим процессом

термоокислительной деструкции целесообразно использовать автоматизированную систему управления (АСУ), которая относится к классу систем программного управления [6].

### Структура автоматизированной системы управления

На основе сформулированных общей и частной задач управления выполнен синтез функциональной структуры АСУ (рис. 1).



**Рис. 1. Функциональная структура автоматизированной системы управления:**  
 ШАУ – шкаф автоматического управления, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь,  
 ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

Использование в промышленных АСУ программных продуктов направлено на проведение исследований динамики химических превращений при различных режимах работы технологического оборудования, а также определение и прогнозирование динамики параметров состояния технологических объектов [7 – 9], что открывает широкие возможности по использованию в качестве основного элемента в управляющем контуре высокоточных цифровых имитационных моделей [10].

Для программного изменения во времени управляемой величины по определенному закону получены математические модели, позволяющие проводить расчет величины управляющего воздействия, а также оценку временных интервалов, через которые сигнал управления поступает на технические средства автоматизации [11].

Управление реакционным аппаратом реализовано на базе промышленного программируемого логического контроллера (ПЛК), с помощью которого проводится программное управление динамикой технологического процесса. Программируемый логический контроллер рассчитывает управляющие воздействия с использованием полученных траекторий изменения физико-химических параметров с коррекцией по текущим значениям, поступающим с контрольно-измерительных приборов. Выработанные управляющие сигналы поступают в качестве задающих величин на регулирующие устройства.

### **Разработка программного обеспечения промышленного контроллера системы управления**

Одной из задач, позволяющих реализовать выбранный метод управления, является разработка программного обеспечения АСУ [12], выполняющего следующие функции:

- программную реализацию математического обеспечения АСУ прогноза динамики изменения технологических параметров и выполнения расчетов управляющих воздействий;
- эмуляцию/симуляцию процесса управления температурными режимом работы реактора;
- конвертацию программы эмуляции/симуляции процесса управления в программный код, загружаемый в промышленный контроллер.

При разработке прикладного программного обеспечения, реализующего одновременно первые две из перечисленных функций, использовался метод декомпозиции математического обеспечения [3] на ряд жестко взаимосвязанных модулей, каждый из которых выполнен в виде отдельной подпрограммы.

Практическая реализация данного подхода не может быть обеспечена без использования специальных интегрированных сред разработки программных продуктов, обеспечивающих использование CASE-технологии программирования и автоматизацию процесса создания программных продуктов [13]. Поэтому, для программной эмуляции процесса управления использован пакет прикладных программ MATLAB с интегрированной графической средой Simulink. Для разработки программного обеспечения применялись элементы языка функциональных блоков среды Simulink, входящие в состав следующих библиотек: Commonly Used Blocks, Math Operations, Sinks, Sources.

Наиболее сложной стадией создания программного обеспечения является объединение программных элементов, описывающих физических процессы на макроуровне, с модулями математического описания химических реакций на микроуровне. Поэтому программная эмуляция процесса управления промышленным процессом производства низкомолекулярных полимеров требует соответствия входных и выходных параметров программных элементов для обеспечения замкнутости всех составляющих математического обеспечения.

Таким образом, архитектура программного обеспечения представляет собой гибридный функциональных макро- и микромодулей, созданных с использованием различных языков программирования. Данные блоки являются подпрограммами (подсистемами). Заложенные в пакет MATLAB функциональные и инструментальные возможности позволяют настроить синхронизацию обмена данными между программными модулями в соответствии с разработанным алгоритмом расчета модели процесса и алгоритмом управления реакторным блоком [11].

Структурная схема разработанного программного обеспечения показана на рис. 2. На рисунке 3 представлен экранный интерфейс стартовой формы программы расчета процесса деструкции, которая создана на основе виртуальных подсистем среды Simulink, реализуемых с помощью функционального блока Subsystem.

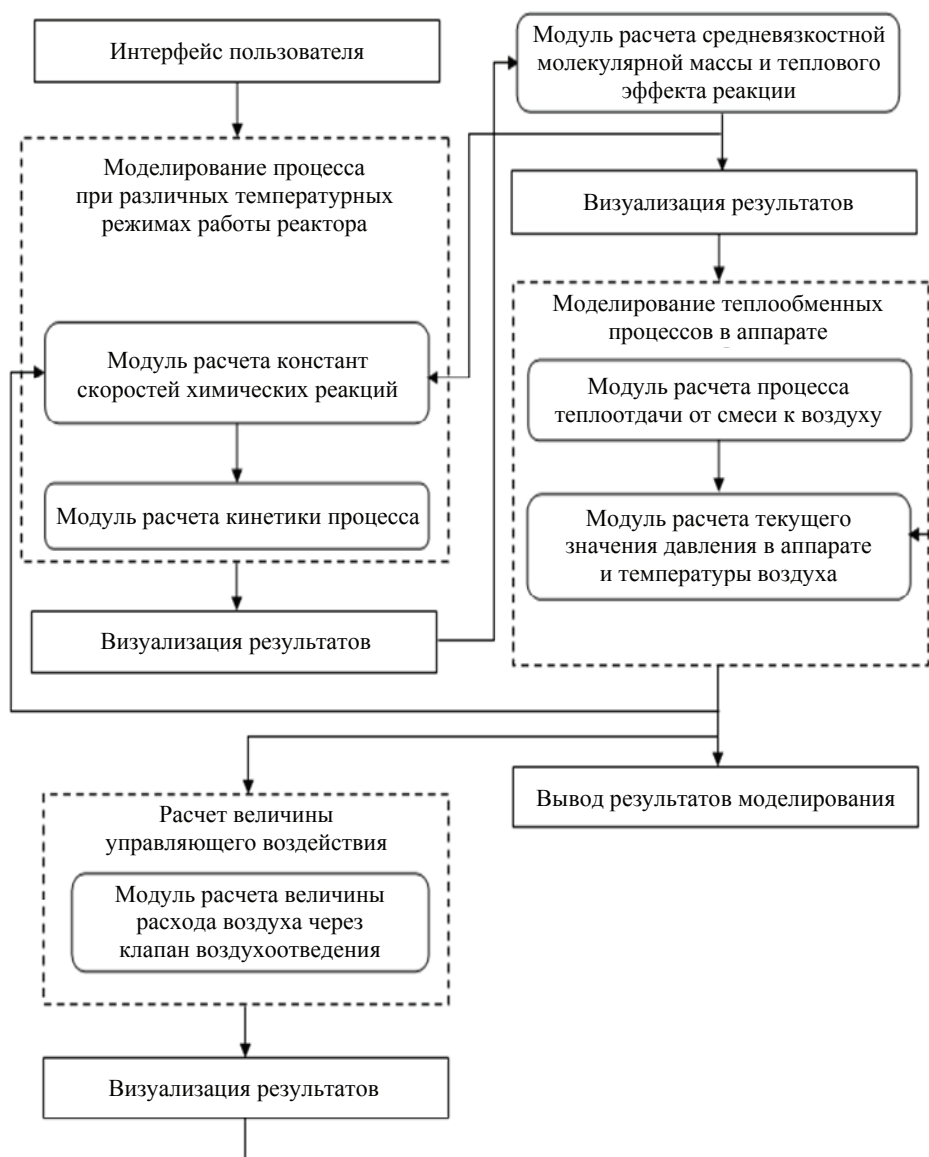


Рис. 2. Структурная схема программного обеспечения

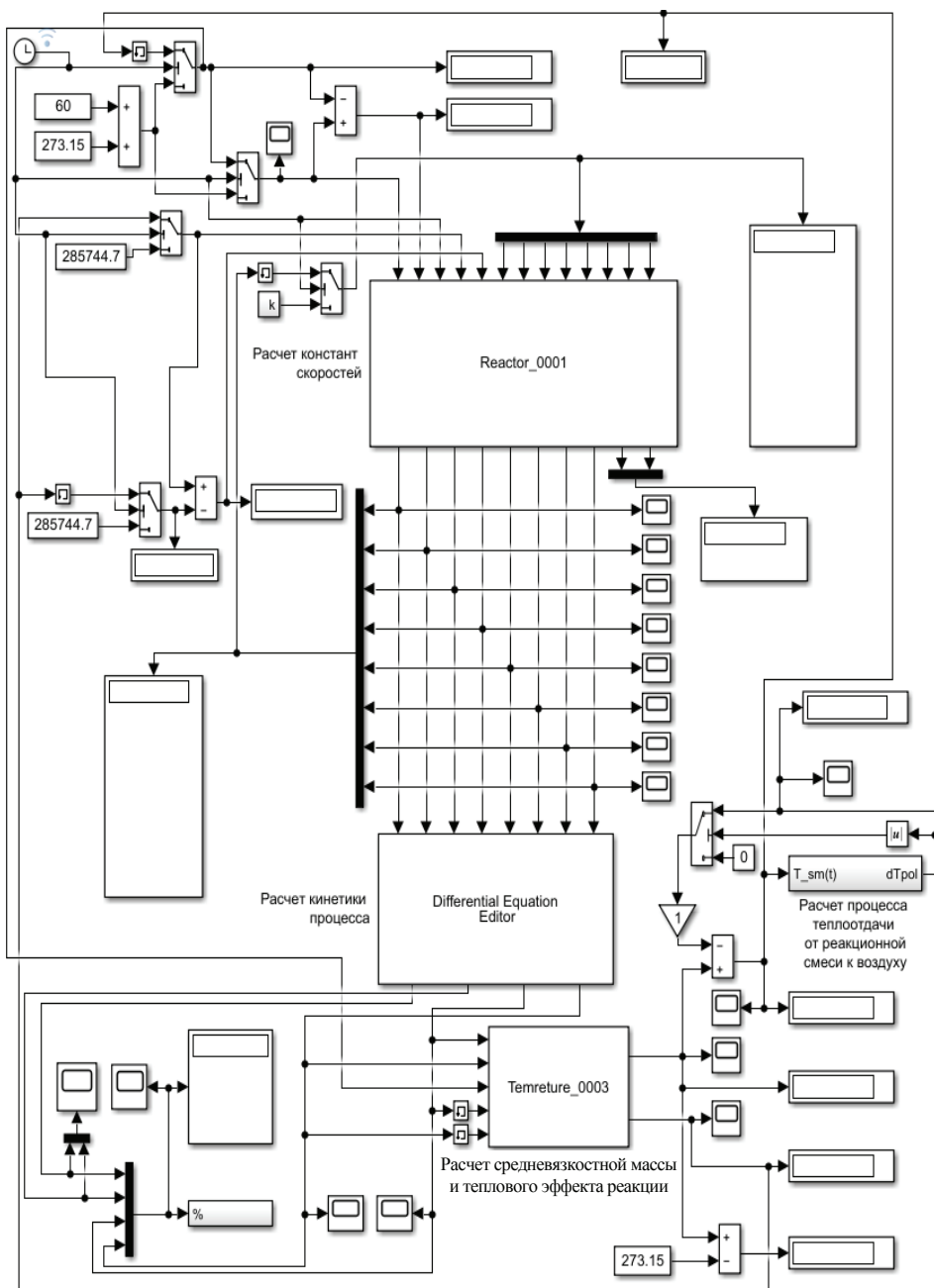


Рис. 3. Стартовая форма Simulink-программы

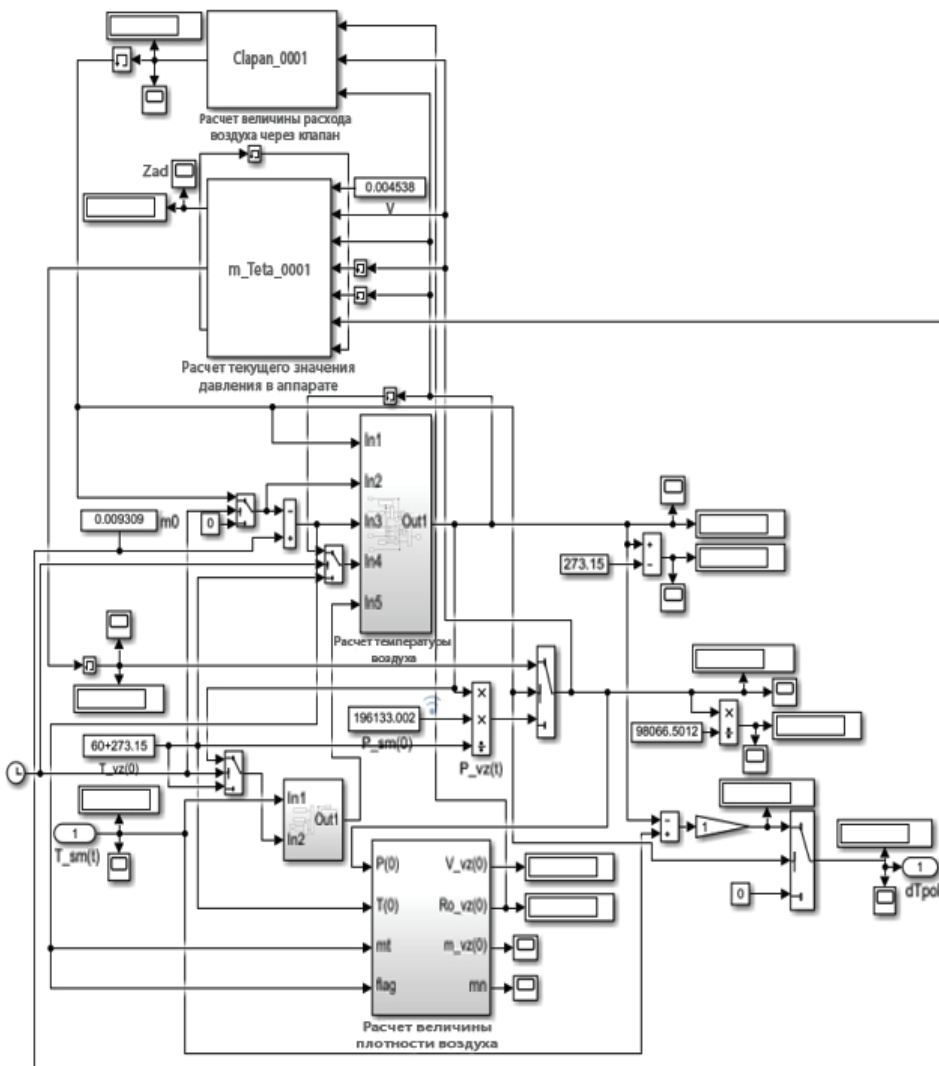
Программное обеспечение включает в себя подпрограммы и подсистемы, выполняющие следующие функции:

- расчет констант скоростей химических реакций. Проводится перерасчет значений удельных скоростей реакций в соответствии с изменением температуры реакционной смеси и молекулярной массы полимера;
- решение системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику изменения концентраций компонентов реакционной среды;

- расчет текущего значения средневязкостной молекулярной массы и количества теплоты, выделившегося в результате изменения концентраций полимера;
- моделирование тепловых процессов, протекающих в реакционной среде и расчет величин управляющих воздействий.

На рисунке 4 представлена подсистема, выполняющая расчет физических процессов, протекающих в верхней части реактора при управлении температурным режимом деструкции: процесс передачи тепловой энергии, выделяющейся в результате протекания экзотермической реакции обрыва полимерных цепей, от реакционной среды к воздушной шапке реактора, процесс адиабатического расширения и отвода воздуха из реактора с последующим снижением давления.

Предложенная архитектура программного обеспечения позволяет реализовывать в виде отдельных подпрограмм все стадии процесса управления температурным режимом работы реактора с учетом изменения физических параметров смеси и воздушного слоя реактора.



**Рис. 4. Программная архитектура подсистемы «Расчет процесса теплоотдачи от реакционной смеси к воздуху»**

## Заключение

Результаты проведенных экспериментов по имитационному моделированию и программной эмуляции работы автоматизированной системы управления показали эффективность разработанного программного обеспечения [11]. Использование данного программного инструмента позволяет выполнить основное требование к системе управления процессом термоокислительной деструкции, заключающееся в обеспечении максимального быстродействия и точности расчета управляющих воздействий. Заложенный в программу функционал позволяет выполнять оперативный расчет и коррекцию траектории управляющего воздействия на основе прогнозирующих моделей с учетом инерционности основных и перекрестных каналов объекта управления.

Таким образом, разработано программное обеспечение, позволяющее выполнять эмуляцию процесса управления температурным режимом. Данный программный продукт в дальнейшем может быть конвертирован в код промышленного контроллера, реализующего принцип упреждающего программного управления в режиме реального времени.

### *Список литературы*

1. Системный анализ процесса термоокислительной деструкции полимеров как объекта управления / В. К. Битюков, И. А. Хаустов, А. А. Хвостов, А. П. Попов // Вестн. Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. – 2014. – № 3 (61). – С. 61 – 66.
2. Monitoring and Estimation of Basic Quality Parameters of Polymers During the Degradation Process in Grount / S. G. Tikhomirov, I. A. Khaustov, A. A. Khvostov [et al.] // Advances in Environmental Biology. – 2014. – Т. 8, № 10. – С. 283 – 289.
3. Контроль и прогнозирование параметров качества полимеров в процессе их деструкции в растворе / С. Г. Тихомиров, М. Е. Семенов, И. А. Хаустов [и др.] // Теорет. основы хим. технологии. – 2018. – Т. 52, № 4. – С. 466 – 472. doi: 10.1134/S0040357118040085
4. Дискретное математическое описание процесса термоокислительной деструкции полимеров в растворе / В. К. Битюков, С. Г. Тихомиров, И. А. Хаустов [и др.] // Каучук и резина. – 2014. – № 6. – С. 44 – 47.
5. Система управления реактором суспензионной полимеризации с упреждением по каналам управления / Д. П. Вент, А. Г. Лопатин, Б. А. Брыков, А. Ю. Стекольников // Изв. Тульского гос. ун-та. Техн. науки. – 2019. – № 12. – С. 431 – 436.
6. Моделирование динамики производственной системы / В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. А. Шатилова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 452 – 458.
7. Свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ № 2019612794. Библиотека цифровых моделей и виртуальный полигон для выполнения цифровых двойников / ООО «Центр Реактивного Программирования» (РФ). – Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 28.02.2019.
8. Чистякова, Т. Б. Программный комплекс для ресурсосберегающего управления процессами жидкофазной полимеризации / Т. Б. Чистякова, А. А. Иванов, И. В. Новожилова // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности : материалы X Междунар. науч.-практ. конф., 16 – 23 сентября 2016 г., пос. Дивноморское. – Саратов, 2016. – С. 38 – 46.
9. Мокрозуб, В. Г. Постановка задачи разработки математического и информационного обеспечения процесса проектирования многоассортиментных химических производств / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 252 – 264. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.252-264

10. Шариков, Ю. В. Системы управления с использованием математических моделей технологических объектов в контуре управления / Ю. В. Шариков, Ф. Ю. Шариков // *Math Designer*. – 2016. – № 1. – С. 4 – 8.

11. Системный анализ и синтез предиктивной системы управления процессом термоокислительной деструкции полимера в реакторе периодического действия / А. П. Попов, С. Г. Тихомиров, И. А. Хаустов [и др.] // *Вестн. Воронежского гос. ун-та. Серия: Системный анализ и информ. технологии*. – 2020. – № 1. – С. 36 – 50. doi: 10.17308/sait.2020.1/2582

12. Малыгин, Е. Н. Математическое моделирование трубчатого реактора. Управление активностью катализатора / Е. Н. Малыгин, В. С. Рябинин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 38 – 42.

13. Краснянский, М. Н. Методология прогнозирования и обеспечения надежности функционирования технических систем многоассортиментных химических производств / М. Н. Краснянский, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2010. – Т. 16, № 1. – С. 6 – 15.

---

## Software to Control the Temperature Mode of Operation of the Reactor for Thermo-Oxidizing Destruction of Periodic Polymers

A. P. Popov, S. G. Tikhomirov, O. G. Neizvestny, N. K. Obratsov

*Department of Information and Control Systems, aleksej\_p\_91@mail.ru;  
Voronezh State University Engineering Technologies, Voronezh, Russia*

**Keywords:** predictive control system; software architecture; software; software control; thermal oxidative destruction; functional structure.

**Abstract:** The architecture of the software for an automated system for controlling the temperature regime of the reactor for thermo-oxidative destruction of polymers is presented. A description of the functional capabilities of a set of developed software modules is given, with the help of which a method of predictive (proactive) control of a technological process is implemented on the basis of a set of simulation models of physicochemical stages of the process.

### *References*

1. Bityukov V.K., Khaustov I.A., Khvostov A.A., Popov A.P. [System analysis of the process of thermal oxidative destruction of polymers as a control object], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2014, no. 3 (61), pp. 61-66. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Tikhomirov S.G., Khaustov I.A., Khvostov A.A., Popov A.P., Semenov M.E. Monitoring and Estimation of Basic Quality Parameters of Polymers During the Degradation Process in Grount, *Advances in Environmental Biology*, 2014, vol. 8, no. 10, pp. 283-289.

3. Tikhomirov S.G., Semenov M.Ye., Khaustov I.A. [et al.] [Control and prediction of the quality parameters of polymers in the process of their destruction in solution], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 2018, vol. 52, no. 4, pp. 466-472, doi: 10.1134/S0040357118040085 (In Russ., abstract in Eng.)



4. Bitjukov V.K., Tikhomirov S.G., Khaustov I.A. [et al.] [Discrete mathematical description of the process of thermooxidative destruction of polymers in solution], *Kauchuk i rezina* [Rubber and rubber], 2014, no. 6, pp. 44-47. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Vent D.P., Lopatin A.G., Brykov B.A., Stekol'nikov A.Yu. [Control system of the slurry polymerization reactor with a lead-in through control channels], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of the Tula State University. Technical science], 2019, no. 12, pp. 431-436. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Shatilova A.A., Filina A.Ye., Semerzhinskiy S.G. [Modeling the dynamics of the production system], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 3, pp. 452-458. (In Russ., abstract in Eng.)
7. ООО «Тсентр Реактивного Программирования» *Библиотека tsifrovyykh modeley i virtual'nyy poligon dlya vypolneniya tsifrovyykh dvoynikov* [Library of digital models and a virtual testing ground for the execution of digital twins], Russian Federation, 2019, Certificate of state registration of computer programs No. 2019612794. (In Russ.)
8. Chistyakova T.B., Ivanov A.A., Novozhilova I.V. *Logistika i ekonomika resursoenergoberezheniya v promyshlennosti* [Logistics and economics of resource-energy saving in industry], Proceedings of the X International scientific practical conference, 16 - 23 September, 2016, pos. Divnomorskoe, Saratov, 2016, pp. 38-46. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [Formulation of the problem of development of mathematical and information support for the design process of multi-assortment chemical production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 252-264, doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.252-264 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Sharikov Yu.V., Sharikov F.Yu. [Control systems using mathematical models of technological objects in the control loop], *Math Designer*, 2016, no. 1, pp. 4-8. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Popov A.P., Tikhomirov S.G., Khaustov I.A., Khvostov A.A., Tikhomirov G.S. [System analysis and synthesis of a predictive control system for the process of thermal oxidative destruction of a polymer in a batch reactor], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technology], 2020, no. 1, pp. 36-50, doi: 10.17308/sait.2020.1/2582 (In Russ., abstract in Eng.)
12. Malygin Ye.N., Ryabinin V.S. [Mathematical modeling of a tubular reactor. Management of catalyst activity], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 38-42. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Krasnyanskiy M.N., Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [Methodology for forecasting and ensuring the reliability of the functioning of technical systems of multi-assortment chemical production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 1, pp. 6-15. (In Russ., abstract in Eng.)

---

## **Die Software des Systems zur Steuerung des Temperaturregimes des Betriebes des Reaktors der thermischen oxidativen Zerstörung der Polymere der periodischen Handlung**

**Zusammenfassung:** Es ist die Architektur der Software für ein automatisiertes System zur Steuerung des Temperaturregimes des Reaktors zur thermo-oxidativen Zerstörung von Polymeren vorgestellt. Es ist die Beschreibung der funktionalen

Fähigkeiten einer Reihe von entwickelten Softwaremodulen gegeben, mit deren Hilfe die Methode zur prädiktiven (proaktiven) Steuerung des technologischen Prozesses auf der Grundlage einer Reihe von Simulationsmodellen der physikalisch-chemischen Prozessstufen implementiert worden ist.

---

### **Logiciel du système de gestion de la température du régime de réacteur de la dégradation par oxydation thermique des polymères à action périodique**

**Résumé:** Est présentée l'architecture du logiciel du système automatisé du contrôle de la température du réacteur de la destruction d'oxydation thermique des polymères. Est donnée la description des fonctionnalités de l'ensemble des modules logiciels élaborés à l'aide desquels est réalisée la méthode du contrôle prédictif (proactif) du processus technologique à la base d'un ensemble des modèles de simulation des étapes physico-chimiques du processus.

---

**Авторы:** *Попов Алексей Петрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем; *Тихомиров Сергей Германович* – доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем; *Неизвестный Олег Геннадьевич* – программист; *Образцов Николай Константинович* – магистрант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Россия.

**Рецензент:** *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.