

## Системный анализ реактора дегидрирования этилбензола как объекта управления

Алексей П. Попов	<sup>1</sup>	aleksej_p_91@mail.ru
Виталий К. Битюков	<sup>1</sup>	prezident@vsuet.ru
Сергей Г. Тихомиров	<sup>1</sup>	tikhomirov_57@mail.ru
Олег Г. Неизвестный	<sup>2</sup>	o.neizvestnyi@mail.ru
Евгений Д. Чертов	<sup>1</sup>	ched@vsuet.ru

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет, Московский пр-т, 14, г. Воронеж, 394036, Россия

**Реферат.** Каталитическое дегидрирование этилбензолной шихты в двухступенчатом адиабатическом реакторе непрерывного действия является основной стадией процесса производства стирола. Анализ существующих автоматизированных систем управления данным технологическим процессом выявил следующий основной недостаток, заключающийся в том, что данные системы требуют больших усилий от производственного персонала для обеспечения изменения температурного режима в ступенях реакторного блока в соответствии с падением концентрации стирола, обусловленным дезактивацией каталитического слоя. Следовательно, в области технической кибернетики актуальным является синтез системы предиктивного управления концентрацией целевого продукта на выходе из ступеней реакционного аппарата. В представленной статье отображены результаты системного анализа реактора дегидрирования как объекта управления. Главным итогом проведенных исследований является выбор способа управления температурным режимом протекания химических превращений в реакторных ступенях, при использовании которого представляется возможным обеспечить повышение энергоэффективности и производительности данного аппарата. На основе системного подхода сформулированы общая и частная задачи синтеза управляющей системы, произведен информационный и функциональный синтез АСУ температурным режимом, разработаны информационная и функциональная схемы подсистем управления технологическим оборудованием реакторного блока. В качестве управляющей системы выбрана АСУ, реализующая изменение температуры парэтилбензолной смеси на входах в реакционные зоны 1-й и 2-й секций реактора в соответствии с алгоритмом программного управления на базе прогнозирующих моделей, описывающих теплообменные процессы внутри реакторных ступеней, а также динамику изменения таких параметров, как концентрация коксовых отложений, активность катализатора, концентрации основных и побочных продуктов химических реакций.

**Ключевые слова:** дегидрирование этилбензола, структурная схема, система управления, структурный синтез, температурный режим реакторного блока, коммуникационная схема АСУ

## System analysis of the ethylbenzene dehydrogenation reactor as a control object

Aleksei P. Popov	<sup>1</sup>	aleksej_p_91@mail.ru
Vitalii K. Bitjukov	<sup>1</sup>	prezident@vsuet.ru
Sergei G. Tikhomirov	<sup>1</sup>	tikhomirov_57@mail.ru
Oleg G. Neizvestnyi	<sup>2</sup>	o.neizvestnyi@mail.ru
Evgeny D. Chertov	<sup>1</sup>	ched@vsuet.ru

<sup>1</sup> Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia

<sup>2</sup> Voronezh state technical university, Moskovskii Av., 14, Voronezh, 394036, Russia

**Summary.** Catalytic dehydrogenation of ethylbenzene charge in a two-stage continuous-action adiabatic reactor is the main stage of the styrene production process. The analysis of this technological process existing automated control systems revealed the following main drawback, that these systems require great efforts from production personnel to ensure a change of the reactor temperature regime in the stages of the reactor in accordance with styrene concentration drop, which is caused by deactivation catalytic layer deactivation. Therefore, the synthesis of the target product concentration at the reactor outlet predictive control system is actual task in the field of technical cybernetics. This article presents the system analysis results of the dehydrogenation reactor as a control object. The main research result is a method choice for controlling of the chemical transformations temperature regime in the reactor, using that, it is possible to increase the energy efficiency and productivity of this device. The general and specific tasks of the control system synthesis are formulated on the basis of the system analysis, the information and functional synthesis of the temperature regime ACS is produced, the information and functional schemes of the reactor unit process equipment control subsystems are developed. As an operating system ACS is selected, which realizes of steam-ethylbenzene mixture temperature change at the reaction zones entrances of the 1st and 2nd reactor sections in accordance with the program control algorithm on the basis of predicting models, describing the heat exchange processes occurring inside the reactor stages as well as the dynamics of changes in such parameters as the concentration of coke deposits, catalyst activity, the basic and by-products concentration of chemical reactions.

**Keywords:** ethylbenzene dehydrogenation, block diagram, control system, structural synthesis, temperature regime of the reactor block, automated control system communication scheme

Для цитирования

Попов А.П., Битюков В.К., Тихомиров С.Г., Неизвестный О.Г., Чертов Е.Д. Системный анализ реактора дегидрирования этилбензола как объекта управления // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 2. С. 77–85. doi:10.20914/2310-1202-2018-2-77-85

For citation

Popov A.P., Bitjukov V.K., Tikhomirov S.G., Neizvestnyi O.G., Chertov E.D. System analysis of the ethylbenzene dehydrogenation reactor as a control object. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 2. pp. 77–85. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-2-77-85

### Введение и постановка задачи

Основным продуктом, образующимся в результате химической реакции отделения водорода от этилбензольной шихты является стирол – основное сырье (мономер) для производства полимеров, сополимеров и пластиков. Производство данного вида мономера является крупнотоннажным и на большинстве нефтехимических предприятий осуществляется посредством каталитического дегидрирования этилбензола в двухступенчатых адиабатических реакторах непрерывного действия.

С точки зрения технической кибернетики реактор дегидрирования представляет собой «серый ящик», ввиду неполной изученности физико-химических процессов, протекающих при прохождении парозтилбензольной смеси через каталитическую зону.

Основным малоисследованным фактором, оказывающим негативное влияние на:

- активность и селективность каталитической системы;
- динамику протекания химических реакций;
- управляемость технологического процесса;
- скорость образования стирола;

является накопление углистых отложений (кокса) на активных центрах каталитической поверхности в процессе эксплуатации реакторного блока. Это обуславливает сложности в управлении реакторными отделениями, температурный режим работы которых лежит в диапазоне 560–630 °С [1]. Исходя из текущих значений концентрации стирола на выходе, эксплуатационный персонал изменяет технологические параметры функционирования реакторного блока, в основном, температуру контактного газа на входах в реакционные зоны. В конечном итоге это приводит к несвоевременности выработки и неточности величин управляющих воздействий, позволяющих стабилизировать и поддерживать управляемые параметры в заданных интервалах на протяжении определенного периода времени эксплуатации.

Таким образом, в процессе эксплуатации не представляется возможным оперативно предотвратить потери стирола на выходе, а также не допускать перерасход греющего водяного пара и топливного газа.

Потребность промышленности Российской Федерации в стироле за последние годы имеет тенденцию к росту. Поэтому для обеспечения соответствия количества произведенного стирола внутреннему спросу необходимо повысить

производительность и межостановочный период работы реакционных аппаратов при одновременном снижении тепло- и ресурсозатрат на проведение процесса.

Решение данной задачи невозможно без синтеза новых и/или усовершенствования ранее внедренных автоматизированных систем управления реакторным блоком дегидрирования, в состав которого входят:

- 1-я и 2-я ступени пароперегревательной печи;
- 1-я и 2-я ступени реакционного аппарата.

При этом проектирование управляющих систем необходимо выполнять с учетом результатов вычислительных экспериментов по исследованию динамики образования стирола с учетом снижения каталитической активности [2, 5] для построения горизонтов изменения управляющих (расход греющего пара и / или расход топливного газа) и управляемых (температура протекания процесса, активность катализатора и концентрация стирола) величин.

Таким образом, создание предиктивной АСУ, упреждающей последствия коксообразования на каталитической системе является актуальной задачей технической кибернетики [8].

### Системный анализ реактора дегидрирования как объекта управления

Технологический процесс дегидрирования этилбензола включает в себя следующие стадии: нагрев и испарение этилбензольной шихты в последовательно расположенных теплообменных аппаратах; подогрев водяного пара, поступающего с ТЭЦ в ступенях пароперегревательной печи (П-201); смешение подогретых до определенной температуры водяного пара и шихты на входе в первую ступень реактора; протекание процесса каталитического отделения водорода в ступенях реакторного блока с промежуточным подогревом парозтилбензольной смеси в межступенчатом подогревателе (Р-202–1 и Р-202–2).

Для эффективного управления стадией, на которой происходит протекание химических превращений необходимо прибегнуть к стратегии системного анализа реакционного аппарата – объекта управления, реализация которой выполнена на основе разработанного математического обеспечения [2-4, 6, 7], совокупно описывающего химическую кинетику, динамику коксообразования и снижение каталитической активности в зависимости от изменения температурного режима работы реактора и позволяющего достоверно выявить системную связь между входными величинами и:

- выходными параметрами элементов реакторного блока;
- параметрами катализатора и контактной смеси по мере её перемещения по длине реакционных зон.

В результате выполненного анализа реактора составлена структурная схема объекта (рисунок 1), на которой отображены основные управляемые величины и управляющие параметры, а также возможные возмущения, влияющие на скорость процесса и процентное содержание целевого продукта.

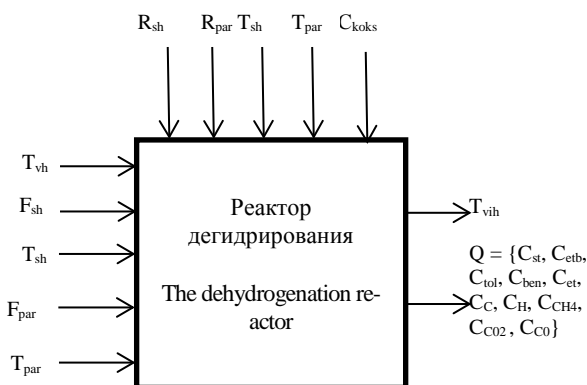


Рисунок 1. Структурная схема объекта управления  
Figure 1. Block diagram of the control object

**Входные величины:**

- температура шихты на входе в 1-ю и 2-ю ступени реактора ( $T_{vih}$ ), °C;
- расход этилбензольной шихты ( $F_{sh}$ ), т/ч;
- температура этилбензольной шихты ( $T_{sh}$ ), °C;
- расход греющего водяного пара, поступающего в межступенчатый перегреватель 2-й ступени реактора и, соответственно, в 1-ю ступень реакторного блока ( $F_{par}$ ), м<sup>3</sup>/ч;
- температура перегретого водяного пара ( $T_{par}$ ), °C.

**Выходные параметры:**

- процентное содержание продуктов реакции: стирола, этилбензола, толуола, бензола, этилена, углерода, водорода ( $Q = \{C_{st}, C_{etcb}, C_{tol}, C_{ben}, C_{et}, C_c, C_n, C_{cn4}, C_{co2}, C_{co}\}$ ), масс.%;
- температура контактного газа на выходе из реактора ( $T_{vih}$ ), °C.

**Возмущающие воздействия:**

- расход этилбензольной шихты ( $R_{sh}$ ), т/ч;
- расход греющего пара ( $R_{par}$ ), м<sup>3</sup>/ч;
- температура греющего водяного пара, поступающего с ТЭЦ ( $T_{par}$ ), °C;
- температура этилбензольной шихты ( $T_{sh}$ ), °C;
- коксообразование на поверхности катализатора ( $C_{koks}$ ), масс.%.

По мере увеличения температуры смеси шихты и греющего пара перед началом химических превращений происходит рост количества молекул, минимальная энергия которых выше значения, являющегося энергетическим барьером для протекания реакций. Также по мере повышения температурного режима протекания процесса возрастает интенсивность отложения углистых образований на катализаторе. Следовательно, ключевым управляющим параметром, оказывающим прямое влияние на скорость основных и побочных реакций, а также на интенсивность коксообразования является температура пароэтилбензольной смеси, поступающей в каталитический отдел ступеней реактора. То есть, скоростью процесса дегидрирования, а соответственно и величиной выхода конечного продукта, можно эффективно управлять путем изменения температурного режима работы реактора.

Варьирование температурой шихты в начале реакционной зоны можно обеспечить следующими способами:

- изменением величин расходов топливного газа, подаваемого на горелки первой и второй ступени пароперегревательной печи, что способствует повышению температуры водяного пара на входе в реактор;
- изменением величины расхода водяного пара, поступающего с ТЭЦ для подогрева этилбензола на входах реакторных ступеней.

При уменьшении количества пара по сравнению с регламентным значением повышаются парциальные давления компонентов сырья, что уменьшает выход стирола и приводит к увеличению закоксованности каталитической системы. Увеличение расхода данного теплоносителя приводит к возрастанию давления в реакторе и существенно увеличивает энергозатраты. Таким образом, в качестве управляющего параметра целесообразно использовать расход топливного газа, подаваемого на горелки пароперегревательной печи.

**Разработка функциональной схемы АСУ реакторным блоком**

Исходя из вышеизложенного, предложена система управления (СУ) температурой этилбензольной шихты на входе в каждую из ступеней реактора, функциональная схема которой представлена на рисунке 2. Система реализует управление данным параметром путем изменения расхода топливного газа на горелки пароперегревательной печи, что влечет за собой повышение температуры греющего водяного пара на выходе из пароперегревателя и её увеличение на входе в первое и второе отделение реактора. При этом величины необходимых расходов и их изменения рассчитываются программно (по рассчитанной оптимальной

температурной кривой процесса) для каждого момента времени рабочего цикла реактора. Предложенная система имеет возможность

расчета оптимального температурного режима в условиях действия возмущений. АСУ реализуется на базе промышленного контроллера.

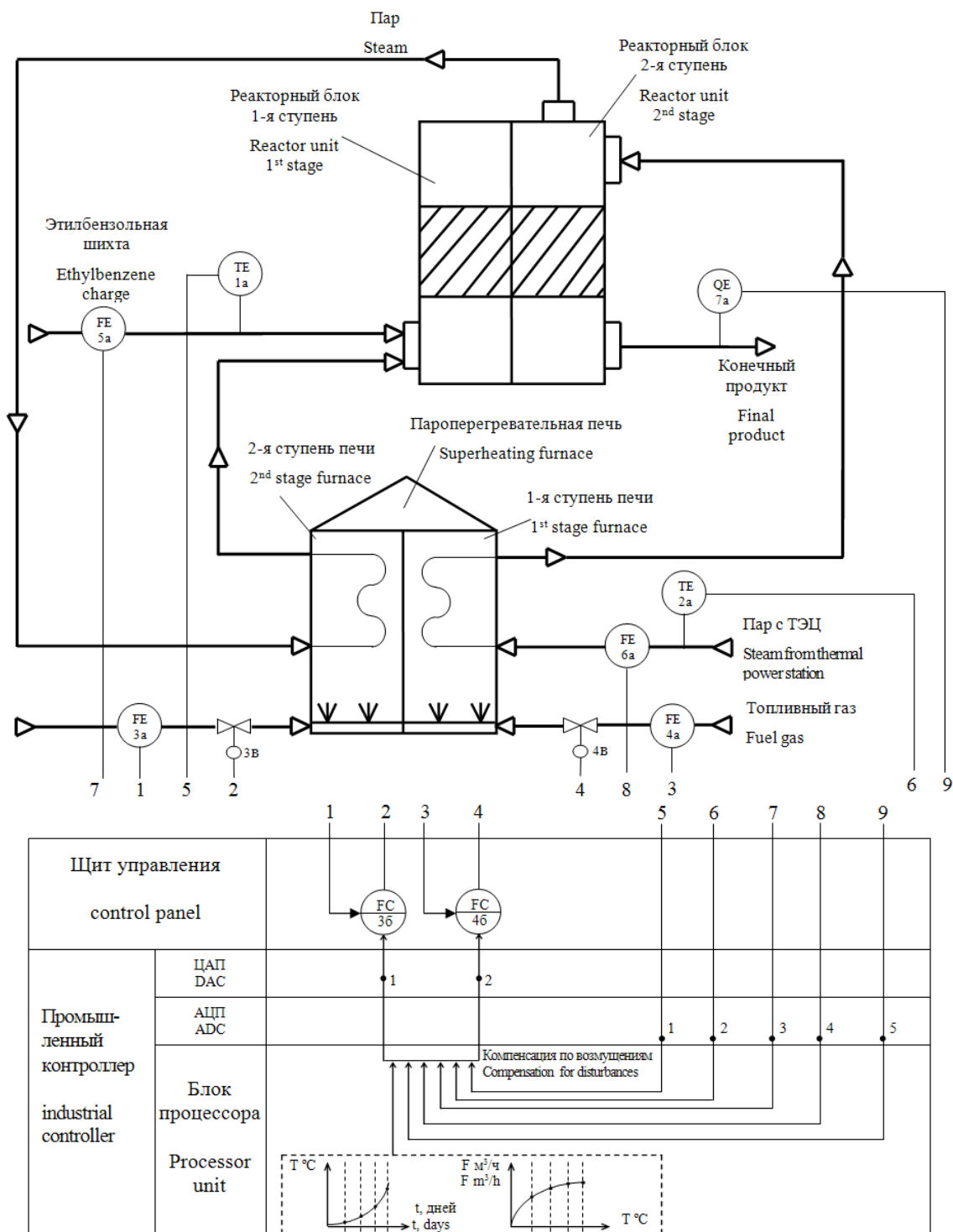


Рисунок 2. Функциональная схема системы управления температурным режимом работы реакторного блока дегидрирования: ТЕ (поз. 1а-2а) – датчики температуры, FE (поз. 3а-6а) – датчики расхода, FC (поз. 3б-4б) – регуляторы расхода, QE (поз. 7а) – датчик состава шихты

Figure 2. Functional diagram of the control system with the temperature regime of the operation of the dehydrogenation unit: TE (items 1a-2a) – temperature sensors, FE (pos.3a-6a) – flow sensors; FC (item 3b-4b) – flow controllers, QE (item 7a) – the sensor of the composition

**Структурный синтез системы управления температурным режимом работы реактора**

Для модернизации существующей АСУ реакторным блоком в соответствии с поставленной научной задачей, на основе системного подхода,

выполнены представленные ниже этапы проектирования системы управления температурным режимом протекания реакции дегидрирования. Первым этапом стало выделение исследуемого объекта управления из внешней среды и постановка задачи управления (таблица 1).

Таблица 1.

Выделение исследуемого объекта управления из внешней среды и постановка задачи управления

Table 1.

Isolation of the investigated control object from the external environment and setting of the control task

Задача управления Management task	Элементы системы управления Elements of the control system	Внешние системы External system	Исходные данные Source data
Управление температурным режимом работы ступеней реакторного блока производства стирола Controlling the temperature regime of the stages of the reactor unit of styrene production	1. Подсистема управления температурой пара на выходе из 1-й ступени пароперегревательной печи П-202-1 1. The steam temperature control subsystem at the 1st stage steam superheater P 202-1 outlet 2. Подсистема управления температурой пара на выходе из 2-й ступени пароперегревательной печи П-202-1 2. The steam temperature control subsystem at the 2nd stage steam superheater P 202-2 outlet 3. Подсистема мониторинга состояния технологического оборудования 3. The technological equipment monitoring subsystem 4. Центральная вычислительная система 4. Central computing system	1. Система подогрева этилбензольной шихты в каскаде цепочке теплообменных аппаратов 1. Heating system of ethylbenzene charge in cascade of heat exchangers 2. Система подогрева водяного пара в ТЭЦ 2. Steam heating system in thermal power station 3. Внешняя среда: возмущающие воздействия 3. External environment: disturbance	1. Значения технологических параметров процесса 1. The values of the technological parameters of the process 2. Траектория изменения температуры в реакционной зоне реакторных ступеней в течение времени эксплуатации аппарата 2. The trajectory of temperature change in the reaction zone of the reactor stages during the operation 3. Технические характеристики и основные параметры реакторного блока и пароперегревательной печи 3. Technical characteristics and main parameters of the reactor block and superheating furnace

В процессе проектирования формируются общая и частная задачи синтеза управляющей системы:

- **общая задача:** синтез структур управляемой и управляющих систем – определение состава элементов и связей между ними.
- **частная задача:** выработка управляющих сигналов, обеспечивающих своевременное (через определенные временные промежутки протекания реакции  $\Delta t$ ) повышение температуры на величины  $\Delta T$ , компенсирующее снижение активности катализатора в процессе работы реактора.

2. Структурирование системы управления.

В качестве технологического объекта управления (ТОУ) выступают ступени адиабатического реактора, необходимый тепловой режим работы которых обеспечивается подачей перегретого водяного пара из ступеней пароперегревательной печи. Для выполнения поставленной задачи управления необходимо обеспечить подогрев водяного пара, подаваемого в смесительную камеру реактора до значения, необходимого в текущий момент производственного цикла. Упрощенная структурная схема данного технологического участка представлена на рисунке 3.

Исходя из стоящих перед создаваемой системой задач и принимая во внимание жесткость связей между управляемыми объектами

(ступени пароперегревательной печи и реакторного блока), когда незначительная ошибка управления любого из рассматриваемых технологических аппаратов, возникающая в произвольный момент времени эксплуатации производственной линии может привести к неработоспособности всей системы, можно сделать вывод, что синтезируемая АСУ характеризуются значительной сложностью, которая обуславливается большим числом элементов и выполняемых ими функций, высокой степенью взаимодействия элементов, сложностью алгоритмов расчета управляющих воздействий, а также большими объемами перерабатываемой информации.

Согласно постулату выбора принципа целенаправленности системного подхода, динамику такого рода систем невозможно однозначно предсказать и экстраполировать даже при априорном знании свойств этой системы. В связи с этим общая задача управления подразделяется на ряд взаимосвязанных под задач:

- регулирование величины расхода топливного газа в ступени пароперегревательной печи П-202-1 в соответствии с прогнозом движения (динамики) управляемого объекта, определенным прогнозирующей математической моделью на некотором конечном отрезке времени эксплуатации данного аппарата (горизонте прогноза);

– регулирование величины расхода топливного газа в ступень пароперегревательной печи П-202–2 в соответствии с прогнозом движения (динамики) управляемого объекта, определенным прогнозирующей математической моделью на некотором конечном отрезке времени эксплуатации данного аппарата (горизонте прогноза);

– коррекция величин расхода топливного газа на основе полученной с помощью измерительных приборов информации о состоянии технологических параметров управляемых объектов (температуры и расхода водяного пара, температуры и расхода парозтилбензолной смеси, концентрации целевого продукта) путем

изменения величин задающих воздействий, подаваемых на входы регулирующих устройств подсистем управления данными аппаратами.

В итоге, выполнена декомпозиция общего процесса управления, исходя из результатов которой можно сделать вывод, что проектируемая система должна реализовывать программное движение ТОУ из одного состояния в заранее определенное следующее состояние с коррекцией по возможным изменениям технологических параметров и при возникновении возмущающих воздействий. Управляемыми объектами являются: П-202–1, П-202–2, Р-202–1, Р-202–2.

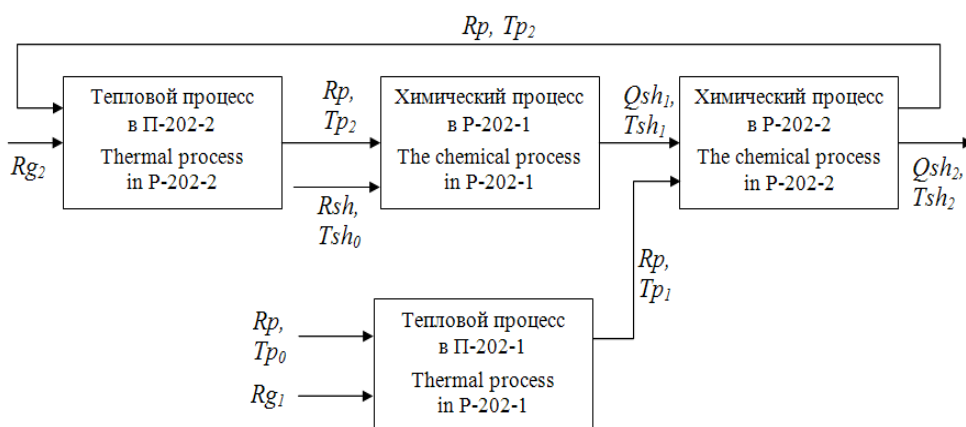


Рисунок 3. Упрощенная структурная схема отделения дегидрирования этилбензола процесса производства стирола

Figure 3. Simplified block diagram of the ethylbenzene dehydrogenation department of the styrene production process

$Rp$  – расход водяного пара,  $Rsh$  – расход этилбензолной шихты,  $Rg_1, Rg_2$  – расход топливного газа в первую и вторую ступени пароперегревательной печи соответственно;

$Tr_0, Tr_1, Tr_2$  – температура водяного пара на входе в первую ступень пароперегревательной печи, на выходе из первой ступени пароперегревательной печи и на входе во вторую ступень пароперегревательной печи соответственно;

$Tsh_0, Tsh_1, Tsh_2$  – температура этилбензолной шихты на входе в первую ступень реактора, на выходе из первой ступени реактора и на входе во вторую ступень реактора соответственно;

$Qsh_1, Qsh_2$  – состав парозтилбензолной смеси на выходе из первой и второй ступени реактора соответственно.

Из результатов анализа следует, что для управления производственным отделением дегидрирования этилбензола необходима многоуровневая система программного управления по принципу обратной связи на основе одного из современных методов теории автоматического управления – метода прогнозирующих моделей. Функциональная архитектура АСУ реактором дегидрирования, обеспечивающая техническую реализацию системы включает следующие уровни:

0-й уровень АСУ – локальные средства автоматизации: датчики, регуляторы, исполнительные механизмы.

1-й уровень АСУ – программируемый микропроцессорный контроллер

2-й уровень АСУ – рабочая станция (автоматизированное рабочее место – ЭВМ с человеко-машинным интерфейсом).

### 3. Информационный синтез системы управления.

Анализ входных, выходных и внутренних информационных потоков позволил получить информационное описание АСУ отделения дегидрирования (рисунок 4), где:

МО – математическое обеспечение АСУ;

Model 1 – математическая модель химической кинетики дегидрирования и теплообменных процессов, преобразованная в программный код микропроцессорного контроллера;

Model2 – математическая модель перегрева водяного пара в пароперегревательной печи, преобразованная в программный код микропроцессорного контроллера;

ПО – программное обеспечение АСУ;

MPC Controller – микропроцессорный контроллер;

ЦВС – центральная вычислительная система.

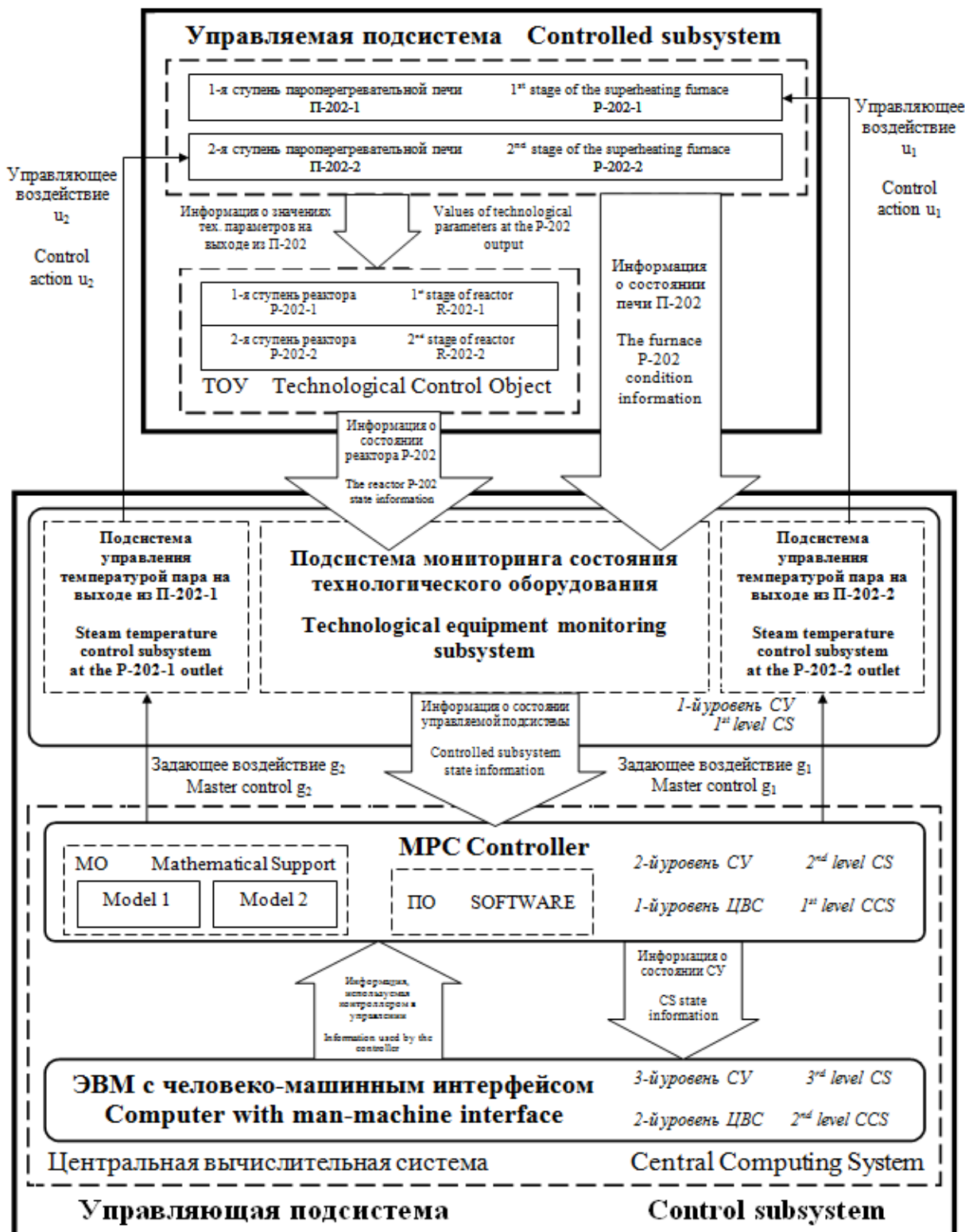


Рисунок 4. Коммуникационная схема информационных потоков в системе управления

Figure 4. Communication scheme of information flows in the control system

MPC Controller представляет собой 1-й уровень ЦВС, который выполняет следующие функции:

- приём и преобразование в цифровую форму информации от контрольно-измерительных приборов;

- выработка величин задающих воздействий с последующей их передачей на входы регуляторов расхода топливного газа;

- первичная обработка информации в реальном масштабе времени;

Второй уровень ЦВС представлен ЭВМ с человеко-машинным интерфейсом, основные функции которой состоят в:

— вторичной обработке информации, полученной от измерительных приборов

— организация многофункционального интерфейса оператор-система.

— организация обмена информацией и правление работой микропроцессорного контроллера.

4. Контроль работоспособности всей системы управления.

5. Преобразование математических моделей процесса дегидрирования в программный код для настройки микропроцессорного программируемого контроллера.

### **Заключение**

В результате проведенного системного анализа, получены результаты, являющиеся ос-

новой для усовершенствования АСУ реакторного блока производства стирола. Основные итоги исследований можно обобщить следующим образом:

1. Определены параметры, оказывающие существенное влияние на скорость протекания процесса и процентное содержание стирола в реакционной смеси, выявлены управляемые параметры и возмущающие воздействия.

2. Предложен способ управления, обеспечивающий повышение энергоэффективности и производительности реакционного аппарата.

3. В качестве управляющей системы выбрана АСУ реакторным блоком, реализующая изменение управляемых величин в соответствии с алгоритмом программного управления на основе прогнозирующих моделей.

4. На основе системного подхода произведен информационный и структурный синтез системы управления температурным режимом в реакторных ступенях.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1 Технологический регламент производства стирола на ОАО «Нижнекамскнефтехим», 1980.

2 Битюков В.К., Попов А.П., Тихомиров С.Г., Неизвестный О.Г. Моделирование кинетики процесса дегидрирования этилбензола с учетом дезактивации каталитического слоя реактора // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2017. Т. 79. № 1 (71). С. 73–80.

3 Попов А.П., Неизвестный О.Г., Подвальный С.Л., Тихомиров С.Г. Моделирование изотермической кинетики дегидрирования этилбензола // Моделирование энергоинформационных процессов. Сборник статей VI международной научно-практической интернет-конференции. Воронеж: ВГУИТ, 2017. С. 194–198

4 Jackson G. Simulation of an Isothermal Catalytic Membrane Reactor for the dehydrogenation of ethylbenzene // Chemical and Process Engineering Research. 2012. V. 3. P. 14-28.

5 Jian Z., Dang S.S., Raoul B., Robert S. et al. Surface Chemistry and Catalytic Reactivity of a Nanodiamond in the Steam-Free Dehydrogenation of Ethylbenzene // *Angewandte Chemie - International edition*. 2010. V. 49. №46. P. 8640-8644.

6 Charles M. Sheppard, Edward E. Maler, Hugo S. Caram Ethylbenzene Dehydrogenation Reactor Model // *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 1986. V. 25. №1. P.207-210.

7 Shelepova E.V., Vedyagin A.A., Mishakov I.V., Noskov A.S. Modeling of Ethylbenzene Dehydrogenation in Catalytic Membrane Reactor with Porous Membrane // *Catalysis for Sustainable Energy* - 2014. - Vol. 2. - P. 1-9.

8 Abdelhamid A., Emaddine A. Dynamic Modeling and Control of a Fluidized Bed Reactor for the Oxidative Dehydrogenation of Ethylbenzene to Styrene // *J. King Saud Univ.* 1998. № 10(2). pp. 141-162.

### **REFERENCES**

1 Tekhreglament proizvodstva stirola na OAO «Nizhnekamsk» [Technological regulation of production of styrene at Nizhnekamskneftekhim] 1980. (in Russian)

2 Bityukov V.K., Popov A.P., Tikhomirov S.G., Neizvestnyi O.G. Modeling of ethylbenzene dehydrogenation kinetics process taking in-to account deactivation of catalyst bed of the reactor. *Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]* 2017, vol. 79.no. 1(71). pp. 73–80. (in Russian)

3 Popov A.P., Neizvestnyi O.G., Podvalnyi S.L., Tikhomirov S.G. The isothermal kinetics modeling of ethylbenzene dehydrogenation. *Modelirovanie energoeffektivnykh protsessov [Modeling of energy information processes: Articles collection of the VI international scientific and practical Internet conference]* Voronezh, VSUET, 2017. pp. 194–198. (in Russian)

4 Jackson G. Simulation of an Isothermal Catalytic Membrane Reactor for the dehydrogenation of ethylbenzene. *Chemical and Process Engineering Research*. 2012. vol. 3. pp. 14-28.

5 Jian Z., Dang S.S., Raoul B., Robert S. et al. Surface Chemistry and Catalytic Reactivity of a Nanodiamond in the Steam-Free Dehydrogenation of Ethylbenzene. *Angewandte Chemie - International edition*. 2010. vol. 49. no. 46. pp. 8640-8644.

6 Charles M. Sheppard, Edward E. Maler, Hugo S. Caram Ethylbenzene Dehydrogenation Reactor Model. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 1986. vol. 25. no. 1. pp. 207-210.

7 Shelepova E.V., Vedyagin A.A., Mishakov I.V., Noskov A.S. Modeling of Ethylbenzene Dehydrogenation in Catalytic Membrane Reactor with Porous Membrane. *Catalysis for Sustainable Energy*. 2014. vol. 2. pp. 1-9.

8 Abdelhamid A., Emaddine A. Dynamic Modeling and Control of a Fluidized Bed Reactor for the Oxidative Dehydrogenation of Ethylbenzene to Styrene // *J. King Saud Univ.* 1998. no. 10(2). pp. 141-162



#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Алексей П. Попов** к.т.н., ст. преподаватель, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, aleksej\_p\_91@mail.ru

**Виталий К. Битюков** д.т.н., профессор, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, prezident@vsuet.ru

**Сергей Г. Тихомиров** д.т.н., профессор, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, tikhomirov\_57@mail.ru

**Олег Г. Неизвестный** аспирант, Воронежский государственный технический университет, Московский пр-т, 14, г. Воронеж, 394036, Россия, o.neizvestnyi@mail.ru

**Евгений Д. Чертов** д.т.н., профессор, и.о. ректора, зав. кафедрой технической механики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ched@vsuet.ru

#### КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**ПОСТУПИЛА 04.04.2018**

**ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 15.05.2018**

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Aleksei P. Popov** Cand. Sci. (Engin.), senior lecturer, Information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, aleksej\_p\_91@mail.ru

**Vitalii K. Bityukov** Dr. Sci. (Engin.), professor, Information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, prezident@vsuet.ru

**Sergei G. Tikhomirov** Dr. Sci. (Engin.), professor, information technology management department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, tikhomirov\_57@mail.ru

**Oleg G. Neizvestnyi** graduate student, Voronezh state technical university, Moscow Av., 14 Voronezh, 394036, Russia, o.neizvestnyi@mail.ru

**Evgeny D. Chertov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Acting Director Rector, Head of the Department of Technical Mechanics, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ched@vsuet.ru

#### CONTRIBUTION

All authors equally participated in writing the manuscript and responsible for the plagiarism

#### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

**RECEIVED 4.4.2018**

**ACCEPTED 5.15.2018**