

AUTOMATION OF PRODUCTION LINES DURING THE PROCESS OF EQUIPMENT RECONFIGURATION

A.V. SHAKHOVSKOY¹, Cand. Sc., V.N. VLASOVA² Cand. Sc.
E.G. ROTANOV¹, Cand. Sc.

¹ K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management
73, Zemlyanoy Val str., Moscow, 109004, Russian Federation;
e-mail: shahand291072@gmail.com

² Volga Cossack Institute of Management and Food Technologies
30, st. Gvardeyskaya, Dimitrovgrad, 433515, Ulyanovsk region, Russian Federation;
e-mail: vlasova-va75@mail.ru

The article shows that carrying out methodical evaluation of methods and methods of automation of production lines is possible by methods of diagnostics of equipment used for fixing of production indicators. The application of methods of reconfiguration of technological equipment is possible only when reconfiguring the software structure, which is achieved by establishing new parameters. It is determined that the possibilities of using equipment configurations are formed on the basis of previously indicated parameters. SCADA-system is used as a control object during equipment reconfiguration.

Keywords: automation, production, configuration, development, system, channel, data transmission.

Поступила в редакцию/received: 01.12.2022; после рецензирования/revised: 20.12.2022;
принята/accepted: 26.12.2022

УДК 681.516

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИМ РЕАКТОРОМ СУСПЕНЗИОННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ С УЧЕТОМ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ КАНАЛОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

А.Ф. ЕГОРОВ¹, д-р техн. наук, А.Г. ЛОПАТИН², канд. техн. наук,
Б.А. БРЫКОВ², ст. препод.

¹ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева
125047, Москва, Миусская площадь, 9; e-mail: egorov.a.f@muctr.ru

² Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева
Тульская обл., 301665, Новомосковск, ул. Дружбы, 8; e-mail: lopatin.a.g@muctr.ru

© Егоров А.Ф., Лопатин А.Г.,
Брыков Б.А., 2023

Рассмотрен вопрос управления химическими реакторами периодического действия на примере процессов суспензионной полимеризации. Актуальность работы обусловлена характером процессов суспензионной полимеризации, протекающих в реакторе и не позволяющих обеспечить управление на основе классических

одноконтурных систем управления. Показано, что эффективное с точки зрения технологии процесса управление реактором синтеза полимеров возможно благодаря наличию в системе управления двух контуров стабилизации: температуры реакционной массы и скорости вращения мешалки. Даны структурные схемы таких систем управления, описан принцип их работы. Сравнительный анализ качества систем выполнен путем имитационного моделирования. Сделан вывод о том, что приведенные системы управления по всем показателям качества превосходят одноконтурные системы, что подтверждает целесообразность их разработки.

Ключевые слова: система автоматического управления, двухконтурные системы, реактор периодического действия, суспензионная полимеризация.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-78-86

ВВЕДЕНИЕ

Химические реакторы по своему значению всегда занимают центральное место в технологической схеме производства любого химического продукта. Химический реактор, помимо чисто кинетических аспектов, одновременно является теплообменником и массообменным аппаратом. Ему приходится обеспечивать контакт между различными фазами исходных и конечных продуктов химической реакции, использовать перемешивающие устройства, а также проводить синтез конечных продуктов в условиях высоких температур и давления. В связи с этим возникают серьезные проблемы при создании систем контроля и управления основными технологическими параметрами химического реактора.

Классическими процессами, протекающими в химических реакторах периодического действия (ХРПД), являются процессы суспензионной полимеризации стирола, метилметакрилата и т. п. В динамическом соотношении ХРПД характеризуются весьма сложными и нелинейными зависимостями скорости реакции полимеризации от температуры и рецептуры загрузки реактора [1]. Экзотермический тепловой эффект реакции суспензионной полимеризации играет роль положительной обратной связи. Вследствие этого возникает опасность появления неустойчивых состояний ХРПД и развития аварийных режимов. В то же время желание достигнуть максимальной производительности ХРПД побуждает вести процесс суспензионной полимеризации на границе тепловой устойчивости.

Для ХРПД, используемых в настоящее время в промышленности, характерно наличие двух одноконтурных систем автоматического управления (САУ). Первая система предназначена для поддержания заданного значения температуры реакционной массы в процессе протекания реакции суспензионной полимеризации, а вторая обеспечивает стабилизацию скорости вращения мешалки ХРПД. Главной особенностью использования данных САУ является большое различие инерционности по каналам управления, от нескольких секунд в канале управления скоростью вращения мешалки (быстродействующий канал) до нескольких часов в канале управления температурой реакционной массы (инерционный канал) [1], также они оказывают взаимное влияние на работу друг друга [1, 2].

Основной негативный фактор, влияющий на температурный режим протекания процессов суспензионной полимеризации, – наличие гель-эффекта, который в момент возникновения приводит к резкому, а иногда и неконтролируемому увеличению температуры реакционной массы, что может вызвать аварийную остановку процесса суспензионной полимеризации в ХРПД. Из-за наличия данного эффекта процессы суспензионной полимеризации, подверженные влиянию гель-эффекта, проводят при

большом водном модуле (например, синтез полиметилметакрилата методом суспензионной полимеризации проводят при соотношении мономер:вода = 1:4).

ОПИСАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В результате исследования процессов суспензионной полимеризации стирола и метилметакрилата [2–4, 10] выявлено, что в момент возникновения гель-эффекта увеличивается вязкость реакционной массы, что отмечается в виде увеличения токовой нагрузки на электродвигатель мешалки ХРПД. Кроме того, поскольку инерционность канала управления скоростью вращения мешалки намного меньше инерционности канала стабилизации температуры реакционной массы, данное условие можно использовать для упреждающего воздействия на контур управления температуры, чтобы сгладить отрицательное воздействие гель-эффекта на температуру реакционной массы.

С учетом данной особенности были разработаны пять структурных схем САУ ХРПД (рис. 1) [5–9]. Обозначения на рис. 1: R_N – регулятор, стабилизирующий скорость вращения мешалки; ММ – математическая модель ХРПД; КУ – корректирующее устройство; ХРПД – химический реактор периодического действия; R_T – регулятор, стабилизирующий температуру реакционной массы; БП – блок питания; АЭД – асинхронный электродвигатель.

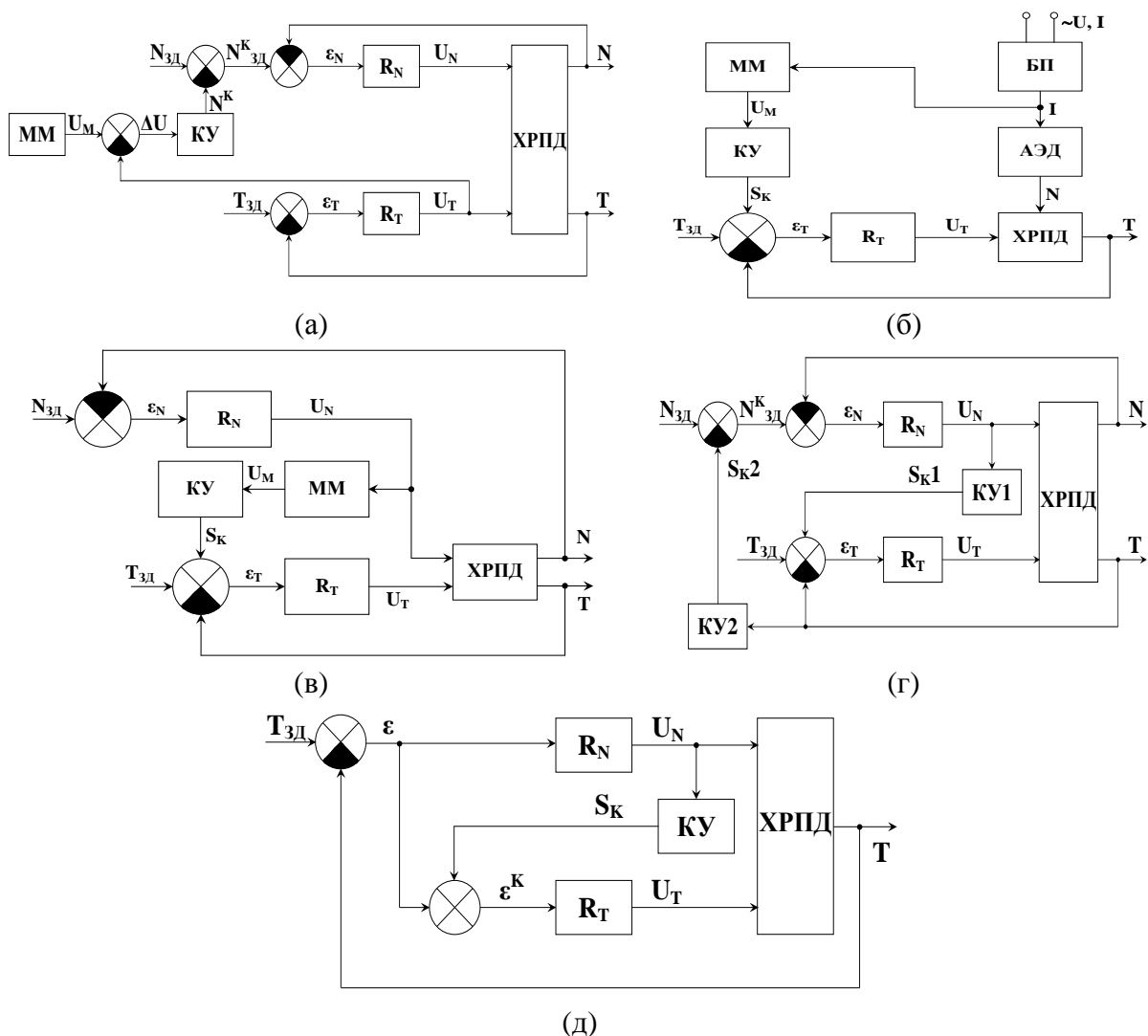


Рис. 1. Структурные схемы САУ

В качестве технологического объекта управления при имитационном моделировании разработанных САУ используется математическая модель ХРПД, которая представляется в виде совокупности уравнений кинетики суспензионной полимеризации и уравнений теплового баланса, записанных для потока хладагента в рубашке, для стенки корпуса реактора и для реакционной массы. Вид ХРПД, описание его физических размеров и численные значения параметров, входящих в состав уравнений кинетики процесса, опубликованы в работах [10–12]. Расчет выполнен в среде динамического моделирования MATLAB Simulink с учетом зависимости параметров реакционной массы от времени реакции, что существенно повышает точность математической модели, а также позволяет адекватно оценить работоспособность разработанных САУ.

Рассмотрим результаты имитационного моделирования разработанных САУ на примере процесса суспензионной полимеризации стирола. Результаты представлены в виде трех графиков (рис. 2): X_m – конверсия мономера, %; T – температура реакционной массы, °C; N – скорость вращения мешалки, мин^{-1} .

Кривые, представленные на графиках изменения температуры реакционной массы (T) и скорости вращения мешалки (N), имеют следующие обозначения:

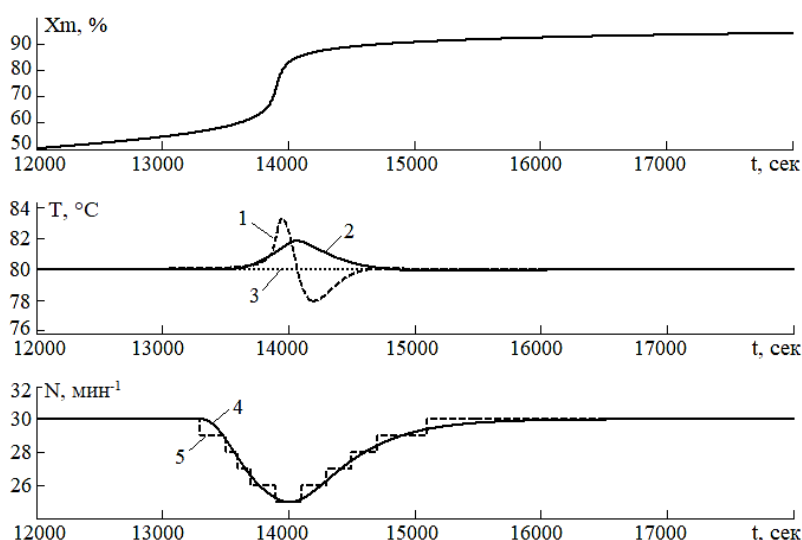
1 – кривая изменения температурного режима в случае применения одноконтурной САУ температурой реакционной массы;

2 – кривая изменения температурного режима в случае применения предлагаемой САУ;

3 – кривая изменения задания контура управления температурой реакционной массы;

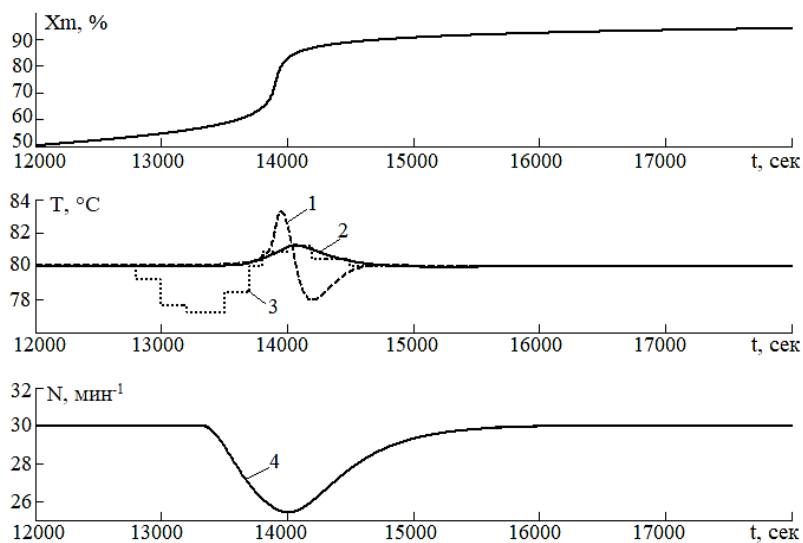
4 – кривая изменения скорости вращения мешалки;

5 – кривая изменения задания контура управления скоростью вращения мешалки.

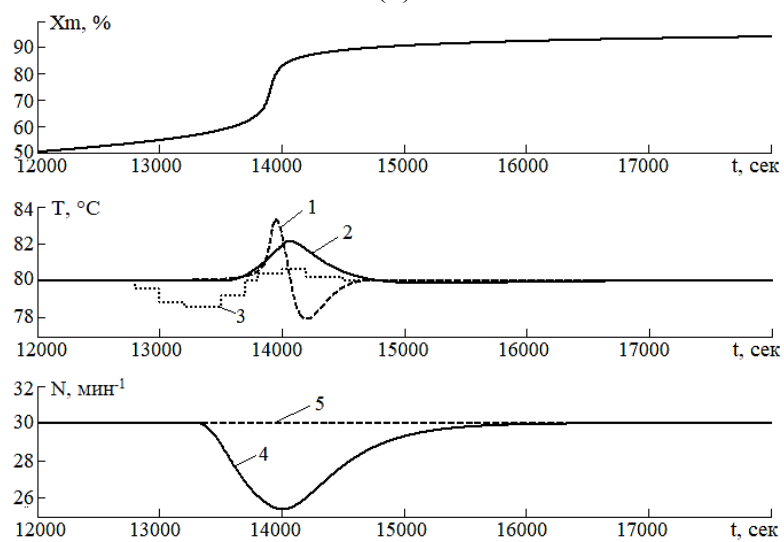


(a)

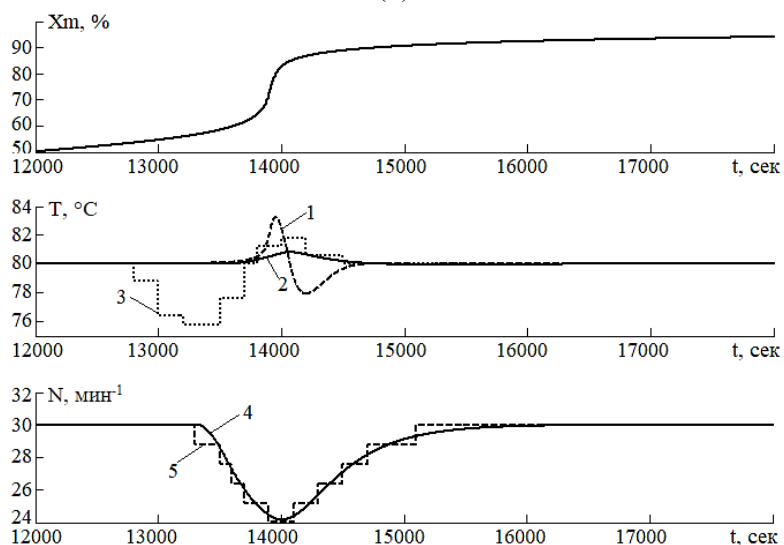
Рис. 2. Результаты имитационного моделирования работы САУ



(б)



(в)



(г)

Рис. 2. Продолжение

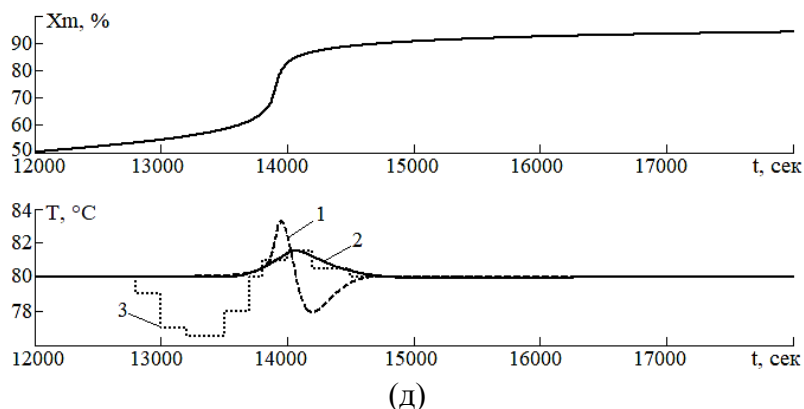


Рис. 2. Окончание

Приведенная на рис. 1а САУ с учетом математической модели процесса для коррекции скорости вращения мешалки ХРПД состоит из двух контуров управления [5]. Первый контур обеспечивает стабилизацию скорости вращения мешалки, а второй – стабилизацию температуры реакционной массы в ХРПД.

С целью уменьшения в ХРПД вязкости реакционной массы, которая начинает расти в момент проявления гель-эффекта, что может привести к «козлообразованию» во всем объеме ХРПД, в контур управления скоростью вращения введен специальный сигнал с блока КУ.

Блок КУ работает следующим образом: в течение всего процесса суспензионной полимеризации в блоке ММ рассчитывается оптимальная кривая изменения управляющего сигнала с регулятора R_T , который обеспечивает стабилизацию температуры реакционной массы в ХРПД. Пока сигнал с элемента сравнения $\Delta U = U_M - U_T = 0$, мешалка вращается с заданной первоначальной скоростью вращения $N_{3д}$. Как только $\Delta U \neq 0$, блок КУ вырабатывает корректирующее воздействие, которое меняет текущее заданное значение на величину N^K , т. е. $N_{3д}^K = N_{3д} - N^K$.

Изменение сигнала N^K с выхода блока КУ возможно как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения скорости вращения мешалки в ХРПД. Когда вязкость реакционной массы начинает увеличиваться, скорость вращения мешалки снижается, что способствует уменьшению слипания полимер-мономерных частиц (ПМЧ) и, как следствие, уменьшению вероятности полного слипания ПМЧ во всем объеме ХРПД, а также снижению диссипации механической энергии на перемешивание, за счет чего можно существенно снизить отклонение текущей температуры реакционной массы в ХРПД от заданного значения.

После прохождения липкой стадии в процессе суспензионной полимеризации скорость вращения мешалки за счет увеличения сигнала N^K возвращается к начальному заданному значению $N_{3д}$. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 2а.

В представленной на рис. 1б САУ с упреждающим воздействием в контуре температуры в зависимости от нагрузки на электродвигатель мешалки реактора вводится дополнительное корректирующее воздействие в виде сигнала S_K с блока КУ [6]. Блок ММ в течение всего процесса суспензионной полимеризации отслеживает скорость изменения токовой нагрузки I на АЭД. Когда скорость начинает резко возрастать (что соответствует проявлению гель-эффекта, способствующего резкому увеличению текущего значения температуры реакционной массы в ХРПД), при превышении заданного значения блок ММ выдает сигнал U_M на блок КУ, который за счет сигнала S_K увеличивает ошибку рассогласования $\varepsilon_T = T_{3д} - T + S_K$, в результате

чего возрастает подача хладагента в рубашку ХРПД. Это приводит к уменьшению отклонения текущей температуры реакционной массы в ХРПД от заданного значения. Токовый сигнал I на АЭД выбран в качестве сигнала упреждения, поскольку вязкость реакционной массы начинает изменяться раньше, чем температура реакционной массы, из-за большой разности инерционности по каналам прохождения сигналов [1]. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 2б.

Развитием структурной схемы САУ, показанной на рис. 1б, является структурная схема САУ, приведенная на рис. 1в, отличительной особенностью которой является наличие контура стабилизации скорости вращения мешалки в ХРПД [8].

В схеме САУ, представленной на рис. 1в, в блоке ММ оценивается скорость изменения сигнала U_N на выходе регулятора R_N . В момент проявления гелевого эффекта увеличивается вязкость реакционной массы, что приводит к резкому изменению сигнала U_N , который указывает на увеличение температуры реакционной массы. В этот момент блок ММ выдает сигнал на блок КУ, который за счет сигнала S_K способствует увеличению ошибки рассогласования $\varepsilon_T = T_{зд} - T + S_K$ в контуре стабилизации температуры реакционной массы в ХРПД, что приводит к заблаговременному снижению температуры реакционной массы в ХРПД от заданного значения. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 2в.

Структурная схема САУ с двумя контурами управления и коррекции показана на рис. 1г [7]. В каждый контур управления включен канал коррекции, при этом по изменению сигнала U_N блок КУ1 изменяет значение ошибки рассогласования $\varepsilon_T = T_{зд} - T + S_{K1}$, способствуя тем самым заблаговременному уменьшению отклонения температуры реакционной массы в ХРПД от заданного значения. Изменение сигнала U_T на входе блока КУ2 способствует выработке сигнала коррекции S_{K2} , который изменяет заданное значение скорости вращения мешалки $N_{зд}^K = N_{зд} - S_{K2}$, что способствует снижению слипаемости ПМЧ. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 2г.

Показанная на рис. 1д САУ температурой реакционной массы с каналом упреждения по скорости вращения мешалки включает два контура управления (быстродействующий и инерционный) одной переменной – температурой реакционной массы [9]. Быстродействующий контур управления обеспечивает стабилизацию температуры реакционной массы внутри ХРПД с помощью регулятора R_N . Инерционный контур управления обеспечивает стабилизацию температуры реакционной массы внутри ХРПД с помощью регулятора R_T .

В инерционный контур управления, как показано на рис. 1д, введен канал упреждения, вырабатывающий сигнал коррекции S_K на выходе блока КУ, который в течение процесса суспензионной полимеризации отслеживает состояние ХРПД, используя быстродействующий канал управления. Это позволяет заблаговременно определить момент увеличения диссипации механической энергии на перемешивание, что фиксируется в блоке КУ на основе изменения сигнала U_N на выходе регулятора R_N . Если значение U_N превышает заданный предел, вырабатывается сигнал S_K , увеличивающий значение сигнала $\varepsilon^K = \varepsilon + S_K$, что способствует значительному замедлению роста температуры реакционной массы в ХРПД. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 2д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа графиков изменения температуры реакционной массы, полученных при моделировании классической одноконтурной САУ, и графиков изменения температуры реакционной массы, полученных при моделировании разработанных

САУ, видно, что максимальная динамическая ошибка регулирования всегда меньше по сравнению с классической одноконтурной САУ. Большое отклонение температуры реакционной массы от заданного значения может отрицательно сказаться на устойчивой работе ХРПД. Кроме того, для разработанных САУ характерно полное отсутствие перерегулирования, что также является очень хорошим показателем качества предложенных САУ.

Таким образом, полученные результаты моделирования говорят о высоком качестве регулирования САУ, предложенных в работе.

С точки зрения промышленной реализации разработанных САУ наиболее предпочтительно использовать САУ, представленные на рис. 1б, в и г, поскольку отсутствует необходимость в программной реализации на промышленных средствах автоматизации математической модели ХРПД для конкретного процесса суспензионной полимеризации. Данная модель включает в себя большое количество дифференциальных, алгебраических и эмпирических уравнений, а также реализации численных алгоритмов их совместного решения в реальном масштабе времени (в течение процесса суспензионной полимеризации).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-07-00914 А)

ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Дранишников Л.В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы полимеризации. М.: Наука, 1991. 349 с.
2. Реакторная динамика процесса суспензионной полимеризации стирола / Д.П. Вент [и др.] // *Теоретические основы химической технологии*. 2020. Т. 54. № 5. С. 615–622.
3. Факторный анализ кинетики радикальной полимеризации метилметакрилата / Д.П. Вент [и др.] // *Теоретические основы химической технологии*. 2018. Т. 52. № 5. С. 555–561.
4. Прикладная кинетика суспензионной полимеризации стирола / Д.П. Вент [и др.] // *Теоретические основы химической технологии*. 2014. Т. 48. № 3. С. 356–360.
5. Патент РФ 2534365. *Способ автоматического управления реактором синтеза суспензионной полимеризации стирола* / Сафин М.А., Вент Д.П., Лопатин А.Г., Савельянов В.П. Заявл. 24.04.2012. Оpubл. 27.11.2014. Бюл. № 33.
6. Патент РФ 2649039. *Способ автоматического управления реактором суспензионной полимеризации стирола* / Лопатин А.Г., Вент Д.П., Самородова И.И. Заявл. 30.01.2017. Оpubл. 29.03.2018. Бюл. № 10.
7. Патент РФ 2669791. *Способ автоматического управления реактором суспензионной полимеризации* / Лопатин А.Г., Вент Д.П., Брыков Б.А., Стекольников А.Ю. Заявл. 04.06.2018. Оpubл. 16.10.2018. Бюл. № 29.
8. Патент РФ 2679221. *Способ автоматического управления реактором суспензионной полимеризации* / Лопатин А.Г., Вент Д.П., Брыков Б.А., Стекольников А.Ю. Заявл. 16.04.2018. Оpubл. 06.02.2019. Бюл. № 4.
9. Патент РФ 2754804. *Способ автоматического управления реактором суспензионной полимеризации* / Лопатин А.Г., Вент Д.П., Брыков Б.А. Заявл. 20.02.2020. Оpubл. 07.09.2021. Бюл. № 25.
10. Лопатин А.Г., Брыков Б.А., Вент Д.П. Исследование динамических свойств промышленного реактора синтеза полиметилметакрилата // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 9 (140). С. 91–100.

11. Curteanu S. Modeling and simulation of free radical polymerization of styrene under semibatch reactor conditions // *Central European Journal of Chemistry*. 2003. V. 1. № 1. P. 69–90.

12. Silvia Curteanu V.B., Lisa C. Free radical polymerization of methyl methacrylate: modeling and simulation by moment generating function // *Iranian Polymer Journal*. 1998. V. 7. P. 225–233.

Для цитирования: Егоров А.Ф., Лопатин А.Г., Брыков Б.А. Разработка систем управления периодическим реактором суспензионной полимеризации с учетом взаимного влияния каналов регулирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 78–86.

DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEMS FOR A SUSPENSION POLYMERIZATION BATCH REACTOR WITHIN THE MUTUAL INFLUENCE OF CONTROL CHANNELS

A.F. EGOROV¹, Dr. Sc., A.G. LOPATIN², Cand. Sc., B.A. BRYKOV², Senior Lecturer

¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation; e-mail: egorov.a.f@muctr.ru

² Novomoskovsk Institute of MUCTR
8, st. Druzhby, Novomoskovsk, 301665, Russian Federation; e-mail: lopatin.a.g@muctr.ru

The issue of control of batch chemical reactors is considered on the example of suspension polymerization processes. The relevance of the work is due to the nature of the suspension polymerization processes occurring in the reactor and not allowing to provide control based on classical single-loop control systems. It is shown that efficient control of the polymer synthesis reactor from the point of view of process technology is possible due to the presence of two stabilization loops in the control system: mixture temperature and stirrer rotation speed. Block diagrams of such control systems are given, the principle of their operation is described. Comparative analysis of the quality of systems was carried out by simulation. It is concluded that the above control systems are superior to single-circuit systems in all quality indicators, which confirms the feasibility of their development.

Keywords: automatic control system, double-loop systems, batch reactor, suspension polymerization.

Поступила в редакцию/received: 22.11.2022; после рецензирования/reviced: 28.11.2022;
принята/accepted: 05.12.2022