

## ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ (НА ПРИМЕРЕ ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ЭТИЛЕНА В ТРУБЧАТОМ РЕАКТОРЕ)

А.П. Веревкин (Уфимский государственный нефтяной технический университет),  
Д.В. Калашник (ОАО «Уфаоргсинтез»)

Повышение эффективности управления ТП и уровня промышленной безопасности связано с развитием систем усовершенствованного управления. Статья рассматривает:

– методы повышения безопасности на основе использования моделей прогнозирования изменения технологических параметров и показателей качества;

– вопросы интеграции систем управления по качеству и систем обеспечения безопасности.

Ключевые слова: усовершенствованное управление, модели, прогнозирование, системы безопасности.

### Введение

Общепризнанная архитектура распределенной иерархической АСУТП концептуально имеет функциональное и аппаратное разделение на подсистемы обеспечения безопасности (СОБ) и управления в штатном режиме (распределенная система управления, РСУ) [1]. Под «штатным» здесь понимается режим, в котором с высокой вероятностью исключена возможность возникновения аварийной ситуации — все технологические параметры находятся на допустимых по технологическому регламенту значениях.

В свою очередь в РСУ могут быть выделены уровни подсистем «control» — уровень регулирования технологических параметров (нижний уровень), и SCADA — уровень (верхний, диспетчерский уровень). На этом уровне ручную, автоматизированно или автоматически осуществляются контроль и управление процессом с целью обеспечения качества продукции, а также оптимизации технико-экономических показателей (ТЭП). Обязательной подсистемой СОБ является система противоаварийной защиты (СПАЗ) (рис. 1). Кроме того, в СОБ могут входить подсистемы диагностики отказов технических средств, мониторинга и прогноза (на рис. 1 не показаны).

Через  $S_1 \dots S_n$  на рис. 1 обозначены контроллеры автоматических систем регулирования (АСР) технологических параметров нижнего уровня (control). Через  $C_1 \dots C_m$  обозначены контроллеры уровня SCADA. Если АСУТП решает задачи оперативной оптимизации ТЭП, отдельно может быть выделен контроллер  $P$  для целей оптимизации.

Перспективы повышения качества управления и уровня промышленной безопасности потенциально опасных ТП связаны с разработкой систем усовершенствованного управления, оптимизации и обеспечения безопасности на основе использования моделей ТП.

Модели прогнозирования технологических режимов и показателей качества (ПкК) продуктов производства преимущественно используются либо для разработки алгоритмов автома-

тического управления по ПкК и оперативной оптимизации ТЭП в штатных режимах, либо для упреждающего срабатывания СПАЗ и обеспечения работы систем мониторинга и прогнозирования [1, 2, 3].

Помимо двух основных состояний ТП (штатные и аварийные режимы) существуют промежуточные состояния, когда РСУ уже не справляется с задачей управления по возвращению процесса в штатный режим, а для срабатывания СПАЗ условия еще не наступили. Особенность промежуточных состояний заключается в том, что в условиях ненулевых рисков изменения состояния процесса в сторону аварийных режимов формирование управлений должно проводиться по правилам, учитывающим значения рисков. Заметим, что правила управления в штатных режимах обычно не оперируют такими категориями, как риски аварий или аварийных состояний. В то же время реализация аварийных состояний или аварий резко снижает эффективность управления ТП.

На примере управления ТП производства полиэтилена рассмотрим задачи разработки:

1) концепции комплексирования задач управления качеством полиэтилена и обеспечения безопасности в предаварийных режимах на основе прогнозных моделей;

2) метода и алгоритма управления по предотвращению аварийных ситуаций, повышению уровня безопасности и эффективности системы управления

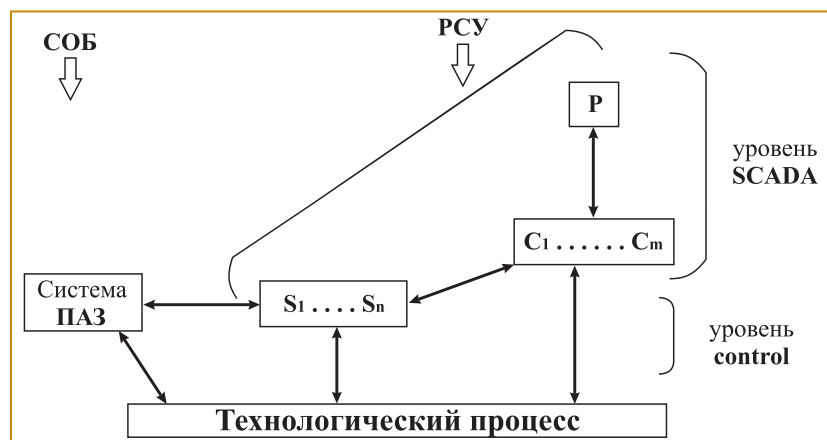


Рис. 1. Архитектура АСУТП

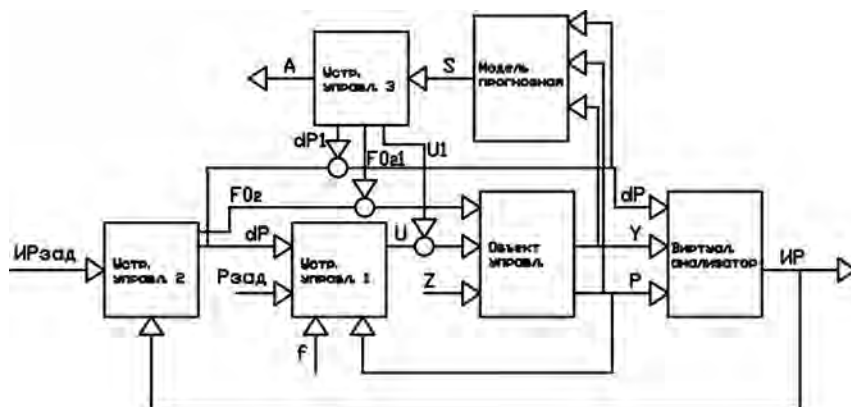


Рис. 2. Структурная схема системы оперативного управления качеством полиэтилена, дополненная системой повышения уровня безопасности

в предаварийных ситуациях с оценкой эффективности предлагаемых технических решений;

3) технических решений по реализации подсистемы обеспечения безопасности и ее интеграции в систему управления качеством полиэтилена.

В работах [4, 5] рассмотрены вопросы прогнозного оценивания ПкК и технологических параметров для повышения качества управления производством полиэтилена на трубчатом реакторе.

Трудности управления процессом обусловлены наличием рецикла и нестационарным характером технологии: по технологическим условиям происходит периодический сброс давления в реакторе.

В производстве полиэтилена основным ПкК, на основе которого производится управление процессом, является индекс расплава (ИР) полиэтилена.

В работе [5] приведены результаты разработки системы оперативного управления по ИР на базе производственной системы и оценена ее эффективность.

В структурной схеме АСУ процессом полимеризации (рис. 2) к части системы управления по ИР в штатном режиме относятся: объект управления, устройство управления 1 (УУ1), виртуальный анализатор (программно-аппаратная реализация моделей расчета ИР в виде разностных уравнений для текущего ИР<sub>тек</sub> и прогнозного ИР<sub>прог</sub> значений) и устройство управления 2 (УУ2). Объект управления и УУ1 рассматривается как неизменяемая часть системы, так как УУ1 поставляется вместе с технологией производства полиэтилена как единый комплекс.

В связи с тем, что производство относится к потенциально опасным ТП (давление до 1500 атм., большое выделение тепла в процессе реакции, опасность теплового взрыва), систему управления необходимо и целесообразно дополнить подсистемой управления СУ<sub>ПА</sub> в промежуточных между штатными и аварийными состояниями.

На рис. 2 к СУ<sub>ПА</sub> относятся устройство управления 3 (УУ3) и вычислитель «Модель прогнозная», предназначенный для формирования вектора переменных  $M$ . Элементами вектора  $M$  являются текущее, прогнозируемое на один шаг и прогнозируемое на два шага зна-

чения ИР и технологических параметров.

Состояние объекта управления определяется следующими параметрами: расходом инициатора реакции — кислорода  $FO_2$ , выходом  $U$  устройства УУ1, а также набором параметров  $Z$ , включающим значения уставок максимального периода сброса давления в реакторе  $t_{max}$  и максимальной заданной температуры в реакторе  $T_{max}^{зад}$ , вводимых оператором. Состояние объекта управления характеризуется давлением в реакторе  $P$ , а также вектором параметров  $Y$ , включающим температуру по длине трубчатого реактора

$T_{14}, T_{18}, T_{25}, T_{29}$  и период сброса давления в реакторе  $t$ .

Состояние УУ1 определяется следующими параметрами: значением заданного давления в реакторе  $P_{зад}$ , частотой  $f$  срабатывания программы сброса давления при достижении максимальной температуры  $T_{max}^{зад}$ , текущим значением давления в реакторе  $P$  и заданной глубиной сброса давления  $dP$ . Таким образом, УУ1 формирует значение управляющего сигнала на исполнительное устройство поддержания давления в реакторе  $U$  как некую композицию перечисленных параметров.

#### Разработка концепции комплексирования задач управления качеством полиэтилена и обеспечения безопасности в предаварийных режимах на основе прогнозных моделей

Концепция разработки системы управления, позволяющей осуществлять «мягкий» вывод объекта из предаварийных состояний, сводится к следующим шагам:

На этапе подготовки проекта разработки СУ<sub>ПА</sub> проводится:

1) классификация ситуаций с учетом текущего и прогнозного состояний автоматизированного технологического комплекса «объект управления, управляющие устройства УУ1, УУ2», и на принципах ситуационного управления анализатором состояний формируются классы управлений для следующих ситуаций:

- штатные режимы (управление осуществляется УУ1 и УУ2 [5]);
- существует ненулевой риск аварии, необходима коррекция алгоритмов управления (управление передается УУ3);
- риск аварии велик (управление передается системе ПА3);

2) определяются методы и алгоритмы формирования управляющих воздействий для каждого вида ситуации с учетом конкретных значений технологических параметров и оценок их близости к критическим значениям;

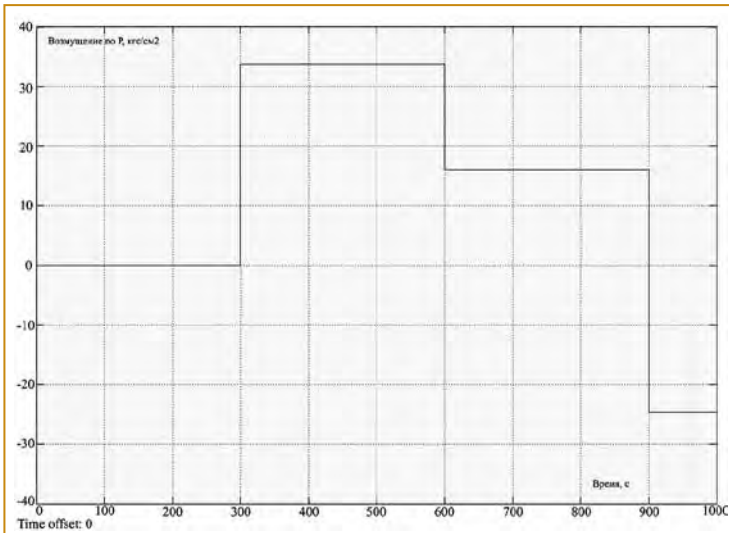


Рис. 3. Подаваемые возмущения по давлению в реакторе

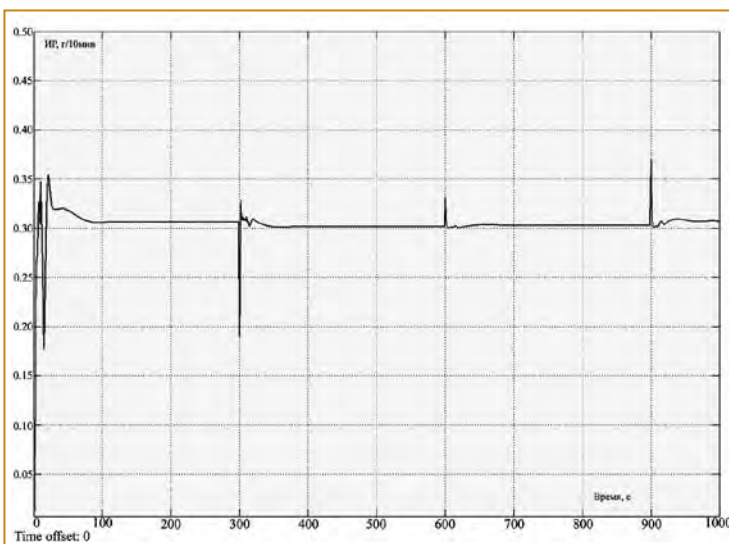
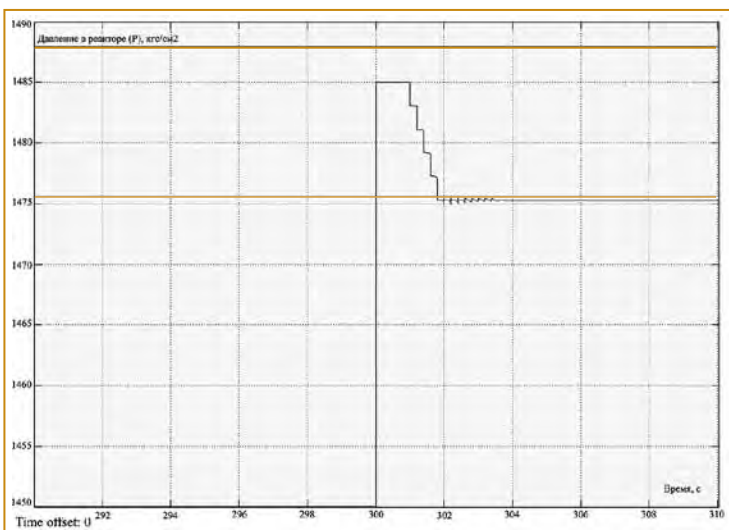


Рис. 4. Изменение индекса расплава при управлении

Рис. 5. Стабилизация параметров процесса полимеризации в предаварийной ситуации по давлению в реакторе. Горизонтальные линии: верхняя – критическое значение, состояние классифицируется как аварийное,  $A=1$ ; нижняя – предупредительное значение, состояние классифицируется переменной  $War$ 

3) определяется близость вектора прогнозных значений каждого из параметров реакции полимеризации к критическому значению;

4) проводится отнесение текущей ситуации к одной из трех, перечисленных в п. 1;

5) управление ТП передается либо системе управления в штатном режиме (УУ1, УУ2), либо подсистеме управления в предаварийных режимах (СУ<sub>ПА</sub>), либо системе ПАЗ.

Последние три пункта выполняются в оперативном (on-line) режиме.

Управляющее устройство УУ3 состоит из двух частей:

– анализатора состояния процесса, предназначенного для определения близости текущей ситуации к аварийной;

– блока формирования управлений в предаварийных ситуациях.

Предлагается следующий алгоритм работы анализатора состояний:

– каждый из элементов вектора прогнозных значений сравнивается с критическим значением соответствующего технологического параметра; критическое значение может либо вводиться оператором, либо передается из системы ПАЗ;

– полученная разность преобразуется в значение функции принадлежности в диапазоне 0...1 по правилу — чем меньше разность, тем значение функции принадлежности ближе к 1. Разность, при которой в результате преобразования получается 0, определяется индивидуально для каждого параметра реакции полимеризации, исходя из опасности возникновения аварийной ситуации и допустимых рисков. Например, для давления в реакторе и глубины сброса давления в реакторе — 50 кгс/см<sup>2</sup>, для периода сброса давления в реакторе — 20 с, для разности температур между 25 и 18 коленами реактора — 10 °С, для разности температур между 29 и 14 коленами реактора — 20 °С;

– полученное значение передается на вход анализатора состояния процесса, который относит ситуацию к одной из трех по п. 1;

– если ситуация классифицируется как предаварийная, запускается алгоритм формирования управлений в предаварийных ситуациях.

#### Разработка метода и алгоритма формирования управлений в предаварийных ситуациях

Вектор входных параметров модуля «Модель прогнозная» совпадает с входными параметрами виртуального анализатора. Вектор выходных параметров  $M$  представляет собой набор прогнозных значений ИР и параметров процесса, рассчитанных по моделям в виде разностных уравнений.



Для УУЗ вектор  $M$  является входным. Выходом УУЗ являются управляющие воздействия:

1)  $dP1$ ,  $FO_21$ ,  $U1$  — параметры, направленные на предотвращение критических предаварийных ситуаций;

2)  $A$  — команда инициализации работы системы ПАЗ.

Окружности на схеме (рис. 2) обозначают логические переключатели, работающие по следующему принципу: при нахождении технологических параметров в безопасных пределах (ситуация классифицируется как штатная) управление производится УУ1 и УУ2. В случае возникновения допустимого риска аварии управление осуществляется УУ3 для устранения аварийной ситуации или минимизации ее последствий.

Формирование структуры управляющей части УУ3 может проводиться либо на основе процедур обучения (если УУ3 реализуется, например, в нейросетевом базисе), либо в виде набора продукционных правил.

В работе выбран последний вариант, а в качестве базы построения части УУ3, отвечающей за анализ вектора прогнозных значений каждого из параметров реакции полимеризации, использован алгоритм Сугено [6].

В качестве базы построения части УУ3, отвечающей за управление в различных ситуациях, использован алгоритм Мамдани [7]. В качестве входных переменных регулятора использована оценка близости вектора параметров ТП к критическим значениям. В качестве управляющих воздействий использованы следующие параметры:  $PoutSS$  — изменение давления в реакторе,  $FO_2outSS$  — изменение расхода инициатора реакции кислорода и  $dPoutSS$  — изменение глубины сброса давления в реакторе.

Кроме разработки анализатора состояния и алгоритмов управления, необходимо также синтезировать переключатель между системой управления в штатном режиме и СУ<sub>ПА</sub>. На рис. 2 переключатель обозначен тремя окружностями.

Входными параметрами такого устройства являются управляющие сигналы с системы управления по ПкК ( $FO_2out$ ,  $dPout$ ) и СУ<sub>ПА</sub> ( $PoutSS$ ,  $dPout$ ,  $FO_2out$ ), а также двоичный логический сигнал оценки риска аварийной ситуации (выход  $WarSS$ ). При входном сигнале  $WarSS = 0$  управление осуществляется системой управления по ПкК. При входном сигнале  $WarSS = 1$  управление переходит к СУ<sub>ПА</sub>.

В случае высокой опасности аварийной ситуации УУ3 формирует еще один сигнал  $A=1$ , по которому управление переходит к системе ПАЗ.

#### Оценка эффективности предлагаемых решений

Для настройки и испытания работоспособности предлагаемой системы в среде программного пакета Simulink разработан симулятор и проведены эксперименты, связанные со стабилизацией работы объекта управления при приближении к критическому параметру.

В качестве исследуемого параметра использовалось давление в реакторе. Подаваемые возмущения имели следующие параметры: максимальная амплитуда не превышала 50 кгс/см<sup>2</sup>, среднее значение давления в реакторе было равно 1450 кгс/см<sup>2</sup> (критическим считается значение 1500 кгс/см<sup>2</sup>), возмущения носили псевдослучайный характер (рис. 3).

Результаты моделирования реакции системы на возмущения (рис. 4, 5) по давлению (результаты экспериментов по другим возмущениям аналогичны) позволяют сделать вывод о том, что предложенная система идентифицирует возможные, в том числе аварийные, состояния системы и при возникновении опасности аварийной ситуации эффективно вмешивается в процесс управления технологическим объектом, предотвращая аварийные ситуации при высокой интенсивности возмущений.

Совместная работа систем управления по ПкК и СУ<sub>ПА</sub> позволяет стабилизировать значение ИР в предаварийных ситуациях, допуская отклонения ИР лишь на короткий временной период — до нескольких минут.

В состояниях с высокими рисками аварийных ситуаций управление передается системе ПАЗ. При этом выигрыш во времени за счет прогнозирования развития технологической ситуации дает возможность скорректировать алгоритмы работы системы ПАЗ и уменьшить последствия аварийного события. В частности, имеется возможность уменьшить время срабатывания защит путем использования прогнозных, а не измеренных значений технологических переменных.

Для оценки эффективности предложенных решений были проведены эксперименты по стабилизации ИР при больших возмущениях (до 100% по длительности цикла реакции), которые характерны для моментов времени перехода от сброса давления по температуре к сбросу давления по длительности цикла.

Анализ переходных процессов на симуляторе при действии возмущений по давлению показал, что применение системы управления по ПкК в комплексе с системой управления в предаварийных ситуациях, использующих прогнозные модели и управляющие устройства на основе нечеткой логики, позволяет увеличить выпуск продукции высшего сорта на 34% за счет сокращения выпуска продукции первого сорта на 16% и продукции второго сорта — на 18%.

#### Технические решения по реализации системы управления в предаварийных ситуациях и ее интеграции в систему управления качеством полиэтилена

Для реализации комплексной системы управления по ПкК и в предаварийных ситуациях в реальном времени предлагается использовать возможности программного комплекса MATLAB/Simulink в интеграции со SCADA-системой iFIX, которая используется в АСУТП рассматриваемой технологической установки. Интеграция обеспечивается пакетом MATLAB-to-iFIX. Последний (M2F) служит для передачи функциональности MATLAB/Simulink в SCADA-систему iFIX.

Исполняемый модуль генерируется автоматически в реальном времени на основе С-кода. Таким образом, проектировщик может сосредоточиться на проблемах разработки системы СУПА, не заботясь о деталях реализации. Это позволяет значительно сократить время разработки.

#### Выводы

1. Разработана подсистема анализа состояния и защиты ТП в предаварийных ситуациях с использованием моделей прогнозирования изменения технологических параметров. Прогнозирование параметров реакции полимеризации этилена проводится на три цикла реакции с погрешностью  $\leq 10\%$ , что в среднем равно 3 мин. При возникновении предаварийных ситуаций этого времени достаточно для автоматического переключения управления со штатного режима на управление в предаварийных режимах.

2. Исследование работоспособности и эффективности системы обеспечения безопасности, разработка программных приложений по реализации СУПА проведена на основе программного комплекса MATLAB/Simulink с дальнейшей интеграцией программного кода в существующую SCADA-систему на основе пакета MATLAB-to-iFIX, что позволило существенно сократить время разработки.

3. Использование прогнозных моделей дает возможность повысить качество (сортность) выпуска-

емой продукции. При высокой частоте возмущений потенциально можно увеличить выпуск продукции высшего сорта примерно на треть.

#### Список литературы

1. Ахметов С.А., Ишмияров М.Х., Веревкин А.П., Докучаев Е.С., Малышев Ю.М. Технология, экономика и автоматизация процессов переработки нефти и газа. М.: Химия. 2005. 735 с.
2. Дозорцев В.М., Ицкович Э.Л., Кнеллер Д.В. Усовершенствованное управление технологическими процессами (APC): 10 лет в России. // Автоматизация в промышленности. 2013. № 1. С. 12-19.
3. Terrence Blevins, Willy K. Wojciszyn, Mark Nixon. Advanced Control Foundation: Tools, Techniques and Applications. ISA. 2012. 556 p.
4. Веревкин А.П., Калашник Д.В., Хуснияров М.Х. Моделирование оперативного определения индекса расплава для управления процессом производства полиэтилена // Башкирский химический журнал. 2013. Т. 20. № 1. С. 69-74.
5. Веревкин А.П., Калашник Д.В., Хуснияров М.Х. Оперативное управление процессом производства полиэтилена по показателю качества (индексу расплава) // Территория нефтегаз. 2013. № 5. С. 12-16.
6. Thithi, I. Control System Parameter Identification Using the Poulation Based Incremental Learning (PBIL) // Proc. of the International Conference on Control'96: Conference Publication. 1996. № 427. P. 1309 -1314.
7. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithm for simple dynamic plant // Proc. IEEE. 1974. № 12. P. 1585-1588.

*Веревкин Александр Павлович — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Уфимского государственного нефтяного технического университета, Калашник Дмитрий Владимирович — инженер по АСУП ОАО «Уфаоргсинтез». Контактный телефон (917) 494-01-26. E-mail: apverevkin@mail.ru kalash.ufa@mail.ru*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО УЧЕБНОГО КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ТП В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

**О.Д. Антипов (РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина), О.Ю. Першин (Компания Honeywell), В.Е. Попадьюко (РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина), А.Н. Халитова (Компания Honeywell), В.В. Южанин (РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина)**

Приводятся примеры проектов, реализованных на базе интегрированного комплекса для компьютерного моделирования и управления ТП, используемого в учебном процессе РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина: системы усовершенствованного управления процессом дебутанизации, а также моделирование и управление процессом первичной переработки нефти.

Ключевые слова: моделирование технологических процессов, усовершенствованное управление, ПИД-алгоритм, обучение, процесс дебутанизации, первичная переработка нефти.

#### Введение

На современном этапе при автоматизации ТП подготовки и переработки углеводородного сырья используются средства компьютерного моделирования и системы управления класса APC (Advanced Process Control), для которых в русскоязычной литературе обычно используется термин «усовершенствованное управление». Системы APC управляют технологическим объектом с учетом его сложной

многосвязной структуры и оптимизируют его работу по технико-экономическому критерию в реальном времени. Сложность и эффективность таких систем заметно выше по сравнению с системами предыдущего поколения, основанными на децентрализованном управлении процессами по ПИД-алгоритмам. Неудивительно, что опыт эксплуатации внедренных APC-систем на ряде нефтеперерабатывающих заводов указывает на нехватку персонала требуемой