



## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПУСКА ПЕЧЕЙ ПИРОЛИЗА УГЛЕВОДОРОДОВ

В.И. Елизаров, В.В. Елизаров, Р.А. Замалетдинов (ФГБОУ ВПО «КНИТУ»)

Описывается алгоритм управления пуском печей пиролиза E-BA-121, E-BA-122 типа SRT-IV, с выводом на установившийся режим работы<sup>1</sup>.

Ключевые слова: печи пиролиза, нечеткая логика, программа управления, пуск, математическая модель.

### Введение

Пиролиз — процесс термического разложения углеводородов с водяным паром состоит из множества простых последовательно и параллельно протекающих реакций [1]. В печах за счет сжигания топлива (газообразного, жидкого и комбинированного) реализуется процесс нагрева перерабатываемого продукта. Рассматриваемый объект автоматизации можно разделить на следующие зоны: радиантная секция печи, конвекционная секция печи, система генерации пара

высокого давления, состоящая из барабана котла-утилизатора, закалочно-испарительных аппаратов (ЗИА), пароперегревателей.

В промышленности наибольшее распространение получили трубчатые печи пиролиза. Эксплуатация печных блоков ведется в циклическом режиме: нагрев — пиролиз — выжиг кокса — охлаждение — чистка ЗИА. Длительность пробега печей зависит от:

1) процесса прогрева печи. Скорость подъема средней температуры (COT — Coil Outlet Temperature)

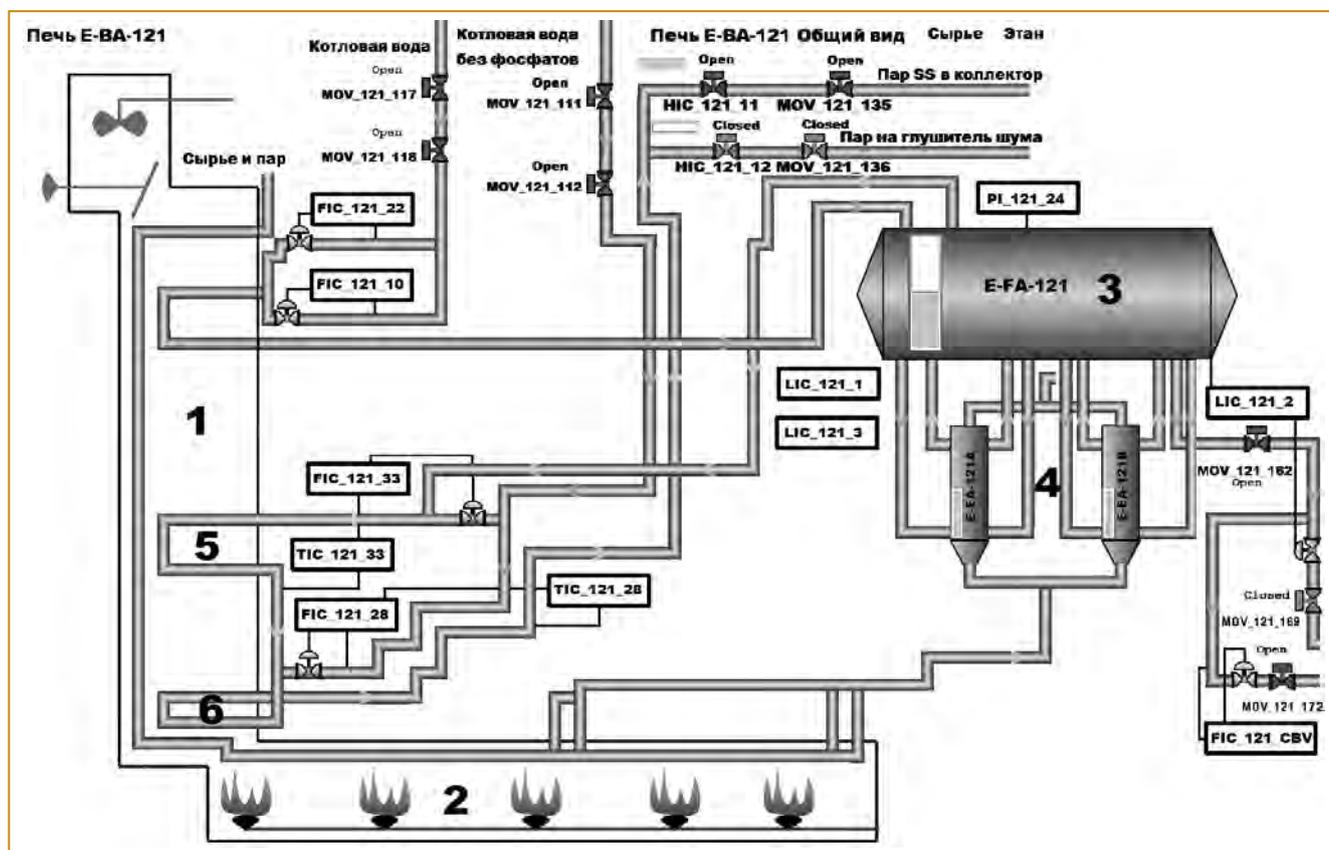


Рис. 1. Мнемосхема парогенерации печи пиролиза E-BA-121 в PCY Centum CS3000 R3, где 1-конвекционная секция печи, 2-радиантная секция печи, 3-барабан котла-утилизатора, 4-ЗИА, 5-модуль перегрева пара высокого давления №1, 6-модуль перегрева пара высокого давления №2

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках использования гранта президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МД-5663.2014.8.

на выходе из змеевиков не должна превышать регламентного значения (пока  $СОТ < 540^{\circ}\text{C}$  скорость роста температуры составляет  $\leq 1^{\circ}\text{C}/\text{мин.}$ , при  $СОТ > 540^{\circ}\text{C}$  скорость роста температуры составляет  $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{мин.}$ );

2) температуры процесса во время пиролиза. Чем выше температура, тем больше в пирогазе концентрация соединений, приводящих к образованию и отложению кокса на стенках труб. Глубина превращения исходных углеводородов в кокс в промышленных печах невелика. Выход кокса составляет  $\geq 0,01\%$  от расхода сырья [2], при этом неблагоприятное воздействие пленки кокса на результаты пиролиза значительно.

#### Описание объекта автоматизации

Печи пиролиза завода «Этилен-600» ОАО «Нижнекамскнефтехим» (г. Нижнекамск) находятся под управлением РСУ Centum CS 3000 R3 (рис. 1).

Время перевода печи, находящейся в положении полной остановки, в режим нормального функционирования занимает в среднем около 100 ч, тогда как на пуск всего производства требуется 144 ч. Останов печи на декоксование и ремонт выполняется 10 раз в год и составляет около 15% от общего объема рабочего времени оборудования. Материальные и энергетические затраты в период пуска/останова составляют непроизводственную часть расходов, которые включаются в себестоимость продукции.

Пуск печей проводится с помощью контроллеров РСУ Centum CS3000 в режиме ручного управления, а также по команде путем включения/отключения технологических потоков по месту печи аппаратчиком.

В этих условиях пуск установок является сложным и ответственным этапом в процессе функционирования производства, он осложняется взаимодействием большого числа работников предприятия и большим числом контролируемых параметров. Рассматриваемая печь по регламенту при пуске с теплого резерва должна выходить на установившийся режим пиролиза за 14...15 ч. Фактическое время пуска печи с резерва в ручном режиме составляет 25,2 ч. Такой длительный пуск печи объясняется тем, что из-за человеческого фактора в процессе пуска возможны недопустимые нарушения температурного и технологического режимов в виде гидравлических и температурных ударов.

С целью сокращения периода пуска печи и минимизации влияния человеческого фактора предлагается перевести процесс пуска с ручного управления на автоматический. Для решения этой задачи разработано ПО, включающее математическое моделирование процесса пуска печи при различных технологических параметрах, реализацию алгоритма управления. ПО интегрировано в РСУ Centum CS3000.

Для построения системы управления процессом пуска печи экспериментально-статистическим методом [3–5] в результате обработки экспериментальных данных при пуске печей пиролиза этана (пропан-бутановой фракции) завода Этилен-600 ОАО «Нижне-

камскнефтехим» получены математические модели процесса пуска печи для различных контролируемых и регулируемых технологических параметров в форме уравнений регрессии.

#### Средства разработки системы управления установкой

В ходе анализа процесса пуска печи было выявлено, что необходим сложный алгоритм управления, с большим числом вложенных циклов и шагов. Для его реализации решено использовать язык структурированного текста, так как схожесть синтаксиса с такими языками программирования, как C++ и Open Pascal позволяет снизить трудозатраты на написание программного кода, значительно ускорить процесс отладки и увеличить читаемость программного кода. Система Centum CS 3000R3 предлагает использовать для реализации таких программ язык SEBOL, который является разновидностью языка ST. Использование данного языка программирования возможно в блоке SFC, где создаются шаги, которые представляют собой отдельные стадии пуска печи. В каждом шаге записана программа на языке SEBOL, организованная в цикле WHILE, который будет исполняться до тех пор, пока переменная окончания шага не примет значение «истина».

#### Алгоритм управления пуском печей пиролиза

Было решено разделить процесс пуска на 14 следующих шагов:

- 1) инициализация, включающая описание всех используемых каналов регулирования, позиций индикации;
- 2) управление набором уровня воды в барабане котла-утилизатора, а также подключением системы продувки котловой воды;
- 3) управление поджогом горелок и подъема температуры дымовых газов до температуры  $150^{\circ}\text{C}$  на перевале печи;
- 4) управление поддержанием температуры дымовых газов равной  $150^{\circ}\text{C}$  на перевале печи в течение 20 ч (сушка печи, этап 1);
- 5–6) управление подъемом средней температуры на выходе из змеевиков до  $400$  и  $540^{\circ}\text{C}$ ;
- 7) управление поддержанием средней температуры на выходе из змеевиков в  $540^{\circ}\text{C}$  в течение 24 ч (сушка печи, этап 2);
- 8–9) управление подъемом средней температуры на выходе из змеевиков до  $760$  и  $800^{\circ}\text{C}$ ;
- 10) управление снижением средней температуры на выходе из змеевиков до  $700^{\circ}\text{C}$ ;
- 11) управление поддержанием средней температуры на выходе из змеевиков в  $700^{\circ}\text{C}$  в течение 4 ч (обработка змеевиков ДМДС);
- 12) управление подъемом средней температуры на выходе из змеевиков до  $800^{\circ}\text{C}$ ;
- 13) управление нагрузкой печи по сырью с поддержанием средней температуры на выходе из змеевиков в пределах  $810...830^{\circ}\text{C}$ ;

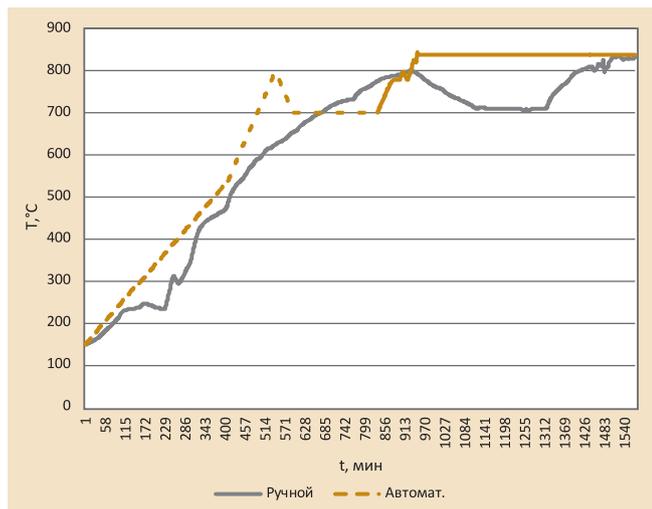


Рис. 2. Графики средней температуры на выходе змеевиков

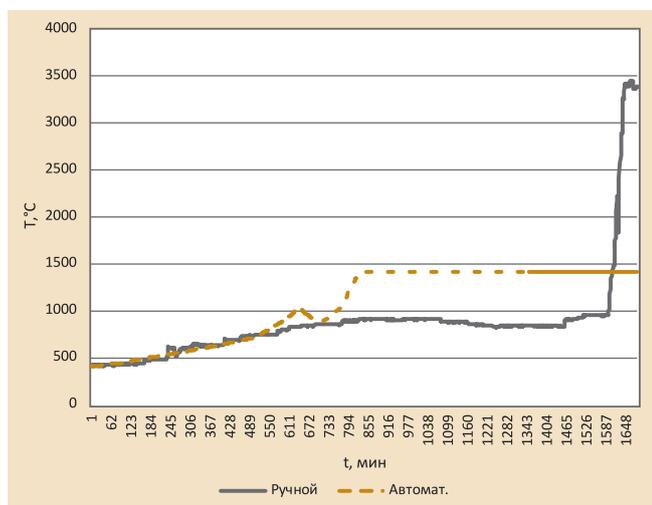


Рис. 3. Графики расхода топливного газа

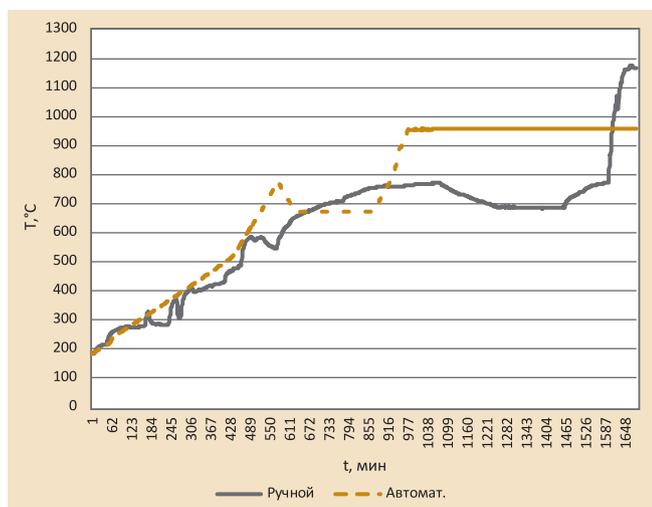


Рис. 4. Графики температуры дымовых газов на перевале печи

14) управление процессом пиролиза.

Рассмотрим подробнее алгоритм управления поджогом горелок и подъема температуры дымовых газов до температуры 150 °С на перевале печи.

В начале работы программы происходит проверка условий: уровень в барабане котла-утилизатора >36%, температура дымовых газов на перевале печи >50°C. Если условие выполняется, то тег окончания шага 2 принимает значение “истина”. Выдается команда на открытие запорной арматуры по котловой воде (рис. 1), а также главной арматуры слива котловой воды из барабана котла-утилизатора. Далее происходит выбор системы продувки. Если давление в барабане котла-утилизатора ≥7 МПа, то отключается система периодической продувки закрытием арматуры слива котловой воды в систему периодической продувки, подключается система постоянной продувки открытием арматуры слива котловой воды в систему постоянной продувки, отключается контур поддержания уровня LIC-121-2. Если давление <7 МПа, то подключается система периодической продувки, отключается система постоянной продувки, подключается контур поддержания уровня LIC-121-2 с заданием в 50%.

Далее проводится проверка средней температуры на выходе из радиантных змеевиков. Если температура меньше 180 °С, то расход пара разбавления устанавливается на 0.

Проводится проверка режима работы контура поддержания уровня воды в барабане котла утилизатора. Если клапан FCV-121-22 не находится в каскадном режиме управления, то он переводится в автоматический режим управления с заданием расхода в 3500 кг/ч. Это связано с тем, что при снижении расхода котловой воды ≤3200 кг/ч срабатывает ПАЗ печи. Включается в работу малый клапан FCV-121-10 и подключается контур поддержания уровня воды в барабане котла-утилизатора LIC-121-3 с заданием в 50%.

Проводится проверка на окончание шага 2. Если условие выполняется, то выдается команда на открытие запорной арматуры по котловой воде, закрываются все клапаны арматуры для продувки из котла-утилизатора.

Программа управления входит в цикл по условию для удержания программы в данном шаге до набора уровня воды 36% в барабане котла-утилизатора. В ходе работы данного цикла проходит проверка на подъем уровня воды до 3%. В случае выполнения условия подключается система периодической продувки и проводится проверка работы контура поддержания уровня воды в барабане котла-утилизатора LIC-121-2. Если контур не активен, то он включается в работу.

Проводится проверка на набор уровня в 36%. Если условие выполняется, то тег окончания шага 2 принимает значение “истина”. После проверки условия осуществляется возврат в начало цикла и программа обрабатывает данный цикл до тех пор, пока уровень воды не станет больше 36%, после чего программа выходит из данного цикла и переходит к следующему шагу.

Для управления средней температурой на выходе из змеевиков, а также температурой перегретого пара



Рис. 5. Графики температуры дымовых газов на выходе печи

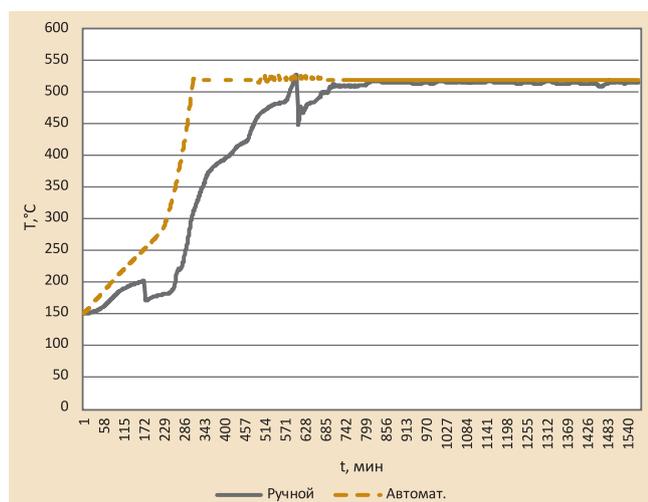


Рис. 6. Графики температуры пара высокого давления на выходе печи

высокого давления используются программные регуляторы с элементами нечеткой логики [6, 7].

Согласно регламенту прогрева печи в режиме пуска, увеличение средней температуры на выходе из радиантных змеевиков (СОТ) до  $СОТ < 540^{\circ}C$  установлено  $1^{\circ}C/мин.$ , а при  $СОТ \geq 540^{\circ}C$   $2^{\circ}C/мин.$

Управление температурой прогрева в соответствии с программой осуществляется посредством изменения расхода топливного газа на горелки печи. Измеренное минутное значение температуры  $T(t)$  сравнивается с программным  $T_3(t)$ , и вычисляются отклонения  $\Delta T(t) = T(t) - T_3(t)$ , где  $t$  — время. В идеальном случае  $\Delta T(t) = 0$  и управляющее воздействие равно программному. В действительности, в силу неучтенных возмущений отклонения  $\Delta T(t)$  будут ненулевыми, образуя нечеткое множество с функцией принадлежности  $\mu(\Delta T)$  и множество управляющих воздействий с функцией принадлежности  $\mu G(\Delta T)$ .

В результате многочисленных расчетов отклонений  $\Delta T(t)$  и управляющих воздействий  $G(t)$ , удовлетворяющих регламенту прогрева печи, при возможных

вариантах измеряемой температуры получены эвристические правила работы регулятора.

1. Если отклонение находится в пределах  $\Delta T \approx 1^{\circ}C$ , то регулятор удерживает текущее программное значение расхода топливного газа.

2. Если отклонение находится в пределах  $-5^{\circ}C < \Delta T < -1^{\circ}C$ , то регулятор увеличивает расход топливного газа на 1 кг/ч.

3. Если отклонение  $\Delta T \leq -5^{\circ}C$ , то регулятор увеличивает расход топливного газа на 3 кг/ч.

4. Если отклонение  $\Delta T > 2^{\circ}C$ , то регулятор уменьшает расход топливного газа на 2 кг/ч.

На шаге 13, когда производится подача сырья в печь, используется другой набор правил.

1) Если отклонение находится в пределах  $\Delta T \approx 1^{\circ}C$ , то регулятор удерживает текущее программное значение расхода топливного газа.

2) Если отклонение находится в пределах  $-5^{\circ}C \leq \Delta T < -1^{\circ}C$ , то регулятор увеличивает расход топливного газа на 2 кг/ч;

3) Если отклонение находится в пределах  $-10^{\circ}C < \Delta T < -5^{\circ}C$ , то регулятор увеличивает расход топливного газа на 6 кг/ч;

4) Если отклонение  $\Delta T \leq -10^{\circ}C$ , то регулятор увеличивает расход топливного газа на 15 кг/ч;

5) Если отклонение  $5^{\circ}C > \Delta T > 1^{\circ}C$ , то регулятор уменьшает расход топливного газа на 2 кг/ч.

6) Если отклонение  $10^{\circ}C > \Delta T \geq 5^{\circ}C$ , то регулятор уменьшает расход топливного газа на 6 кг/ч.

7) Если отклонение  $\Delta T \geq 10^{\circ}C$ , то регулятор уменьшает расход топливного газа на 15 кг/ч.

По таком уже принципу были созданы правила для управления расходом котловой воды в модуле охлаждения пара высокого давления.

### Моделирование пуска печи в ручном и автоматизированном режимах

Автоматизированный пуск печей пиролиза позволяет сократить время пуска печи с теплового резерва на 9,3 ч, с 25,2 ч (печь выходит на режим через 1517 мин) до 15,9 ч (печь выходит на режим через 954 мин.) (рис. 2).

На рис. 3 приведены графики работы регулятора расхода топливного газа, согласно установленным эвристическим правилам.

На данный момент печь выводится на максимальную проектную производительность по сырью в 20 т/ч, вместо регламентных 16 т/ч. Расход пара разбавления составляет 33% от расхода сырья вместо регламентных 30%. Это приводит к повышению температуры дымовых газов на перевале печи до  $1185^{\circ}C$ , при ограничении в  $1080^{\circ}C$ . Программа управления пуском печей пиролиза выводит печи на регламентный режим работы, за счет чего происходит снижение температуры дымовых газов до  $956^{\circ}C$  на перевале печи и  $121^{\circ}C$  на выходе из печи (рис. 4, 5).

Применение программного регулятора с элементами нечеткой логики в управлении позволяет сра-

зу переводить генерируемый пар высокого давления в общезаводской коллектор (рис. 6) после достижения температуры пара в 505 °С.

#### Заключение

На основе формализованной математической модели процесса пуска печи в ручном режиме разработана система программного управления процессом пуска в автоматизированном режиме с обратной связью.

Введение в алгоритме управления элементов нечеткой логики обеспечивает во время пуска равномерный рост температуры на выходе из змеевиков со скоростью 1 и 2 °С/мин, снижая скорость активного роста кокса на стенках змеевиков, термическое сопротивление стенок и повышая срок их службы.

Разработанная система автоматизированного управления пуском печей пиролиза позволяет сократить время пуска печей на 9,3 ч, пуск ведется в «мягком» режиме. Система управления выводит печь на регламентный режим работы, при этом снижается температура дымо-

вых газов на выходе из печи со 171 °С до 121 °С, а следовательно, повышается КПД печи.

#### Список литературы

1. Мухина Т.Н., Баранов Н.Л., Бабаиш С.Е. и др. Пиролиз углеводородного сырья. М.: Химия 1987. 240 с.
2. Froment G.F. Thermal cracking for olefins production. Fundamentals and their application to industrial problems//Chemical Engineering Science. 1981. V. 36. pp. 1271-1282.
3. Замалетдинов Р.А., Мушнин А.В., Елизаров В.В., Елизаров В.И. Математическое моделирование процесса пуска и останова печей пиролиза Е-ВА-121, Е-ВА-122. Вестник КТУ. 2014. № 9. с. 285-289.
4. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.: Химия. 1985. 448 с.
5. Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов. М.: Академкнига. 2006. 416 с.
6. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. Под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002. 744с.
7. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 2. // СТА. 2007. №1. с.78-88.

*Елизаров Виктор Иванович — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой автоматизации технологических процессов и производств (АТПП) Нижнекамского химико-технологического института (филиал)*

*Казанского национального исследовательского технологического университета (ФГБОУ ВПО «КНИТУ»),*

*Елизаров Виталий Викторович — д-р техн. наук, проф. кафедры (АТПП) (ФГБОУ ВПО «КНИТУ»),*

*Замалетдинов Руслан Айратович — инженер кафедры (АТПП) (ФГБОУ ВПО «КНИТУ»).  
Контактный телефон (8555) 39-18-88.  
E-mail ZRuslan2006@gmail.com*

#### Введена в эксплуатацию обучающая система по ПЛАС для комплекса производства битума Новошахтинского завода нефтепродуктов

Фирмой КРУГ успешно введена в эксплуатацию обучающая система по ПЛАС (план ликвидации аварийных ситуаций) для комплекса производства битума Новошахтинского завода нефтепродуктов на базе российской SCADA-системы КРУГ-2000. Внедренная система предназначена для обучения оперативного персонала действиям по ликвидации аварийных ситуаций на установке по производству битума.

Компьютерная обучающая система представляет собой программно-вычислительный комплекс, включающий три ПК, соединенных между собой в локальную сеть Ethernet-коммутатором. Данная структура позволяет реализовать принцип «преподаватель — обучаемый», то есть преподаватель в режиме реального времени контролирует действия обучаемых операторов.

Система включает более 20 графических экранных форм в соответствии с документом «План ликвидации аварийных ситуаций». На каждой графической экранной форме представлена часть ТП в пределах одного блока объекта с установленными клапанами, насосами, запорной арматурой. Компьютерные тренажеры позволяют имитировать реальные действия оператора по управлению ТП, контролировать надлежущую очередность и оперативность принятия решений. Оператор, контролируя развитие ситуации и управляя исполнительными механизмами, отрабатывает практические навыки по предупреждению аварий и ликвидации их последствий на тех-

нологических объектах с блоками I и II категорий взрывоопасности. Процесс обучения и отработки практических навыков персонала протоколируется и архивируется. Срок хранения отчетной информации неограничен.

Внедрение системы обеспечивает:

— приобретение практических навыков выполнения работ по предупреждению, локализации и ликвидации аварийных ситуаций;

— непрерывный и периодический контроль и тестирование уровня знаний и навыков по локализации аварийных ситуаций;

— повышение качества подготовки рабочих и инженерно-технических работников, занятых ведением технологического процесса и эксплуатацией оборудования, а также повышение на этой основе качества ведения технологического процесса;

— снижение влияния «человеческого фактора» на вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Система разработана на базе типового технического решения — Компьютерные тренажеры для обучения персонала по ПЛАС для химических и нефтеперерабатывающих производств.

Ранее фирмой «КРУГ» были внедрены аналогичные системы для установок первичной переработки нефти: АТ-1, АТ-2 Туапсинского НПЗ; АТ-2, ЭЛОУ АВТ Краснодарского НПЗ; ЭЛОУ АВТ Новошахтинского завода нефтепродуктов.

[Http://www.krug2000.ru](http://www.krug2000.ru)