



## ИМИТАЦИОННЫЙ СТЕНД ДЛЯ ОТЛАДКИ И ТЕСТИРОВАНИЯ АСУТП ПРОИЗВОДСТВ СПЕЦХИМИИ С ФУНКЦИЯМИ ТРЕНИНГА ОПЕРАТОРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Д.Г. Абрамов, А.В. Кодолов, А.В. Литвинов,

Ф.А. Попов (АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай»)

*Рассмотрены особенности создания и результаты эксплуатации имитационного стенда, предназначенного для отладки и тестирования АСУТП производств спецхимии, обеспечивающего также тренинг операторов АСУТП. На конкретном примере рассмотрены особенности отладки и тестирования систем управления как на стенде, так и на реальном объекте, особенности использования стенда в качестве тренажера операторов систем управления технологическими процессами.*

*Ключевые слова: имитационный стенд, тренажер оператора, отладка и тестирование, производство спецхимии.*

Первые инструментальные системы, предназначенные для разработки программного обеспечения уровня АСУТП, выполнявшие часто роль тренажеров операторов, создавались и использовались в НПО «Алтай» (ФНПЦ «Алтай») с начала 1970-х гг. XX века. Эти системы были представлены двумя категориями: кросс-системы, обеспечивающие разработку программного обеспечения для систем управления на базе микро- и мини-ЭВМ (кросс-ассемблер с мнемокода М-6000 для ЭВМ-БЭСМ-6, инструментальная система ДИАЛЭМ, инструментальная система УКЛАД), и системы, предназначенные для использования на специальных стендах, реализованных с применением целевых ЭВМ (инструментальная система УКЛАД) [1–4].

В настоящее время данные работы остаются актуальными и продолжаются на предприятии с использованием современных средств вычислительной техники и программного обеспечения. Направлены эти работы на создание интегрированной системы, сочетающей функции инструментального комплекса для разработки программного обеспечения уровня АСУТП спецхимии и его тестирования, а также тренажера для операторов технологических процессов [4, 5].

Объясняется это тем фактом, что современные автоматизированные системы управления специальными химическими производствами представляют собой сложные информационно-управляющие системы, в основе эффективной работы которых лежат адаптивные алгоритмы управления и регулирования. Практика показывает, что отладка и настройка таких алгоритмов непосредственно на производственном объекте во время выполнения пусконаладочных работ является задачей трудоемкой и дорогостоящей. Именно поэтому в последнее время все чаще разработчики АСУТП проводят проверку создаваемых систем на специализированных отладочных и имитационных стендах.

В общем случае такой стенд представляет собой набор программно-аппаратных средств, позволяющих с той или иной степенью адекватности моделировать поведение автоматизируемого объекта [6]. Объем выявляемых при использовании такого подхода ошибок и неточностей в программном обеспечении напрямую будет зависеть от полноты описания математической модели технологического процесса, а также от вычислительных возможностей аппаратной части имитационного стенда, способных в реальном масштабе времени реализовывать эту модель. Недостаток вычислительных ресурсов может стать причиной значительного различия между динамическими характеристиками реального объекта управления и его моделью, что недопустимо при автоматизации специальных химических производств.

Основной отличительной особенностью специальных химических производств является наличие в производственном цикле хотя бы одного потенциально опасного технологического процесса. Характерным признаком таких технологических процессов, отличающих их от других процессов химической технологии, является то, что они могут находиться в трех режимах функционирования: нормальном, предаварийном и аварийном.

*Режим нормального функционирования* — это режим, при котором значения опасных технологических параметров (температура, давление, концентрация и др.) находятся в границах, определенных в технологическом регламенте, а работа оборудования проходит в пределах расчета их прочностных характеристик.

*Предаварийный режим функционирования* — это режим, при котором под влиянием внешних возмущений значения опасных технологических параметров приближаются к границе области неустойчивости. При этом энергии, накопленной в аппарате, например, при увеличении давления, еще недостаточно для

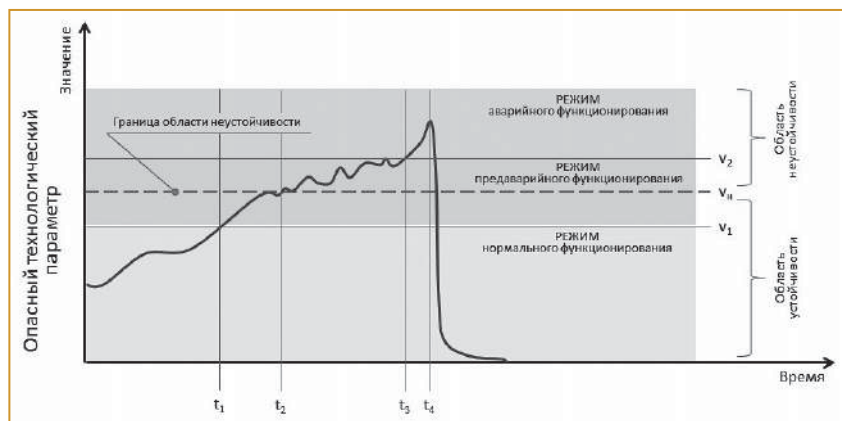


Рис. 1. Пример протекания потенциально опасного технологического процесса

его разрушения, но для того, чтобы вернуть процесс в регламентное состояние, необходимо применить специальные управляющие воздействия. Область неустойчивости характеризуется тем, что любое возмущение приводит к расходящемуся во времени переходному процессу и, как следствие, в ближайшей перспективе к возникновению аварийной ситуации.

*Аварийный режим функционирования* — это режим, при котором аварийное состояние (авария) еще не наступило, однако значения опасных технологических параметров находятся в зоне неустойчивости, и продолжает накапливаться энергия, достаточная для разрушения технологического оборудования. Предотвратить аварию возможно только путем экстренной остановки или ликвидации процесса [7].

Характер протекания потенциально опасного технологического процесса показан на рис. 1 [3].

Учитывая данную особенность потенциально опасных технологических процессов, отладка и тестирование АСУТП специальных химических производств проводится в три этапа.

1. *Нормальный режим функционирования автоматизируемого объекта.* На имеющемся стенде запускаются имитационные модели технологических объектов управления [6], созданные на основе большого числа статистических данных работы при нормальном режиме функционирования. По заранее подготовленной программе испытаний, во многом повторяющей последовательность операций регламента ведения технологического процесса, выполняется тестирование функций АСУТП. По результатам тестирования при необходимости вносятся изменения в адаптивные алгоритмы управления или корректируется система управления.

2. *Предаварийный режим функционирования автоматизируемого объекта.*

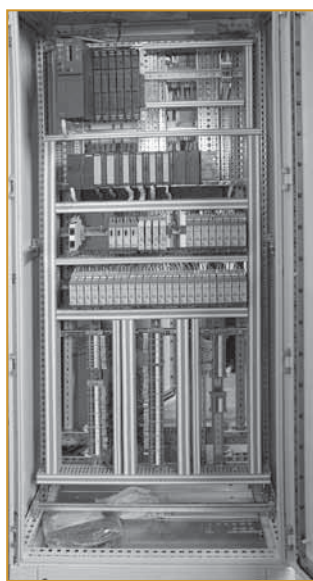


Рис. 2. Имитационный стенд

На имитационном стенде используются модели технологических объектов управления в режиме предаварийного функционирования, полученные в результате проведения исследовательских работ в пилотном варианте установки. В соответствии с программой испытаний, имитируются величины опасных технологических параметров вблизи области неустойчивости. В результате отслеживается реакция АСУТП и систем противоаварийной защиты, выполняющих оперативное воздействие на процесс с целью возвращения его в нормальный режим функционирования [8, 9].

3. *Аварийный режим функционирования автоматизируемого объекта.*

С целью отладки и тестирования системы управления в режиме аварийного функционирования на имитационном стенде формируется изменение одного или нескольких опасных технологических параметров с динамическими характеристиками, свойственными им или предполагаемыми для данного режима, и регистрируется реакция АСУТП и системы противоаварийной защиты.

В качестве примера потенциально опасного технологического процесса отметим одну из фаз изготовления изделий спецхимии — процесс вакуумного перелива (слива). Особенностью данной фазы является то, что в аппаратно-технологической схеме используются одни и те же трубопроводы, запорно-регулирующая арматура для перемещения различных газоздушных (воздух, азот, углекислый газ, вакуум) смесей. Процесс изготовления усложняется тем, что при определенных операциях необходимо наличие глубокого вакуума в закрытых полостях и неверная подача газоздушной смеси может привести к браку.

**Особенности отладки и тестирования на специализированных имитационных стендах**

С целью отладки и тестирования основных функций программного обеспечения АСУТП указанной фазы изготовления, авторами разработан специализированный имитационный стенд, позволяющий имитировать работу реального объекта управления. Внешний вид стенда представлен на рис. 2.

В аппаратную часть стенда входят модули ввода/вывода дискретных и аналоговых сигналов, центральный процессор, коммуникационный модуль, блок нормирующих преобразователей, источники питания, а также ПЭВМ.

Программная часть стенда состоит из операционной системы Windows

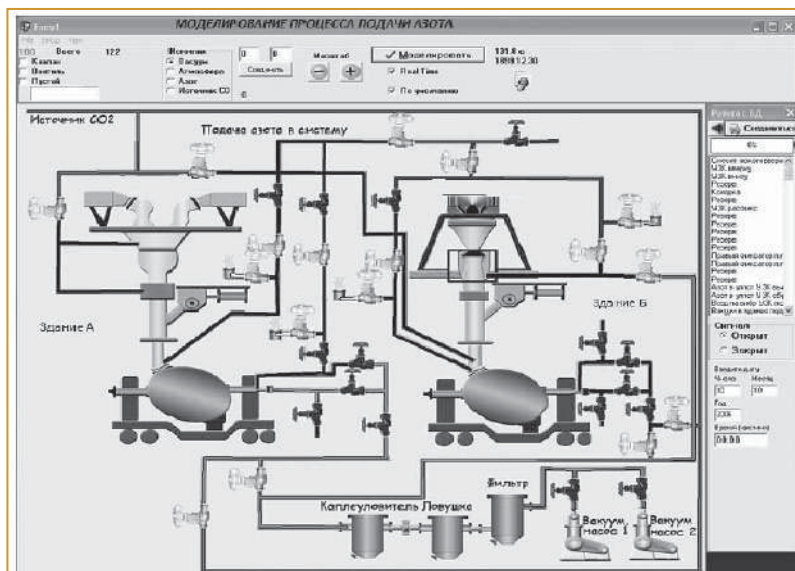


Рис. 3. Главное окно программы имитации перемещения различных газоздушных смесей

и специализированного программного обеспечения. Внешний вид главного окна программного обеспечения приведен на рис. 3.

В программное обеспечение заложены имитационные модели объектов управления при нормальном режиме работы установки, причем модели реализуются в реальном масштабе времени с целью соответствия динамическим характеристикам реального оборудования.

Имитационный стенд подключается к существующей АСУТП, и выполняется процесс отладки. При помощи различных задатчиков осуществляется процесс имитации поведения реального объекта в различных условиях, оценивается адекватность реагирования разработанной АСУТП.

Отладка программного модуля АСУТП вакуумного перелива с использованием данной системы позволила выявить ряд несоответствий в аппаратно-технологической схеме процесса и изменить конфигурацию отдельных элементов оборудования и трубопроводов за счет оптимизации числа запорно-регулирующей арматуры управляемой дистанционно оператором и ручных элементов, расположенных по месту.

Таблица. Пример таблицы безопасности для двух технологических объектов

Параметры, определяющие опасность процесса	Место установки датчиков	Предупредительное значение параметра	Действия при достижении предупредительного значения	Предельно допустимое значение	Алгоритм защиты
Максимально допустимая температура нитросмеси в дозаторе	Бачок-дозатор	Температура > 44°C и изменение температуры за интервал времени 3с более чем на 2°C	Световая сигнализация, закрытие клапана подачи продукта в дозатор, приостановка процесса	Температура выше 52°C	Закрытие отсечного клапана подачи продукта, световая и звуковая сигнализации оператору, открытие сливного клапана и подача нейтрализующей смеси
Загазованность в производственном помещении этанолом	Воздух производственного помещения	Более 5% от нормального значения	Световая и звуковая сигнализации	31 г/м <sup>3</sup> (15% от нормального значения)	Включение аварийной вентиляции, отключение электрооборудования, перевод процесса в безопасное состояние

Кроме того, по результатам использования данной системы составлены таблицы безопасности для каждого этапа реализации процесса, содержащие данные о состоянии технологического оборудования на всех временных интервалах, в течение которых это состояние может подвергнуться изменению. Данные из этих таблиц учитываются в логике управляющей программы и, по сути, составляют основной алгоритм противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ), позволяющий однозначно определить требуемое безопасное состояние оборудования на любой стадии его протекания в реальном масштабе времени. Пример таблицы безопасности приведен в таблице.

В целом использование рассмотренных выше имитационных средств позволило выявить и устранить до 90% ошибок в управляющей программе до запуска ее на реальном объекте.

#### Особенности отладки и тестирования на реальном объекте

На реальном объекте на первом этапе осуществляется тестирование ПО с целью проверки работоспособности всех контуров управления в режиме холостого хода. С этой целью подаются команды управления на все автоматические контуры, замкнутые по обратной связи, и проверяются цепи управления исполнительными механизмами оборудования и цепи контроля состояния проверяемого оборудования.

Второй этап — это комплексная проверка работоспособности оборудования и ПО, которому предшествует разработка производственной программы, содержащей все способы данной проверки методом имитации различных критических ситуаций. В данной программе описывается каждый шаг выполнения ПО при реализации функций управления как в дистанционном (по командам оператора), так и автоматическом режимах с описанием ожидаемых реакций системы и состояний безопасного положения оборудования при проверке той или иной критической ситуации.

Основные цели отработки комплексной проверки программного обеспечения заключаются в следующем:

- поиск решений по улучшению функциональной надежности технических систем, конструкций аппаратов и отдельных узлов оборудования;
- получение экспериментальных данных, подтверждающих правильность принятых решений и обеспечивающих сохранение заряда на любой стадии его формования при наступлении возможных нештатных (критических) ситуаций;
- проверка работоспособности аппаратных и программных блокировок в случае наступления таких ситуаций;
- анализ действий обслуживающего персонала в нештатных ситуациях, времени их устранения, необходимого для сохранения изделия;
- уточнение таблиц безопасности;
- выработка рекомендаций по бездефектному изготовлению серийных изделий за счет предотвращения любых нештатных ситуаций на ранних стадиях их возникновения;
- корректировка производственной программы и других нормативных документов по ведению процесса на основании полученных данных.

В частности, при тестировании АСУТП имитировались следующие наиболее вероятные критические ситуации:

- аварийный останов процесса в произвольный момент времени;
- сбой системы электропитания;
- переключение на схемы аварийного электропитания;
- поломка вакуумного насоса и компрессора, сбой в работе маслостанции;
- превышение регламентных значений давлений в корпусе и барокамере;
- выход из строя управляющего компьютера;
- выход из строя контроллера УСО.

Кроме того, выполнены:

- проверка герметичности коммуникаций;
- аварийный сброс вакуума азотом;
- оценка качества весоизмерительной системы.

В случае наступления нештатных ситуаций в реальном процессе тестируемая АСУТП должна осуществлять перевод оборудования в наиболее безопасное состояние с точки зрения исполняемой технологии и стабилизации важных технологических параметров. Перевод осуществляется на определенный промежуток времени, достаточный для устранения проблемы без значительных, влияющих на качество заряда отступлений от регламентных требований.

Обработанные совместно с конструкторскими и технологами подразделениями данные комплексного тестирования в дальнейшем использованы для создания и уточнения таблиц безопасности.

Далее, в качестве примеров охарактеризованы результаты тестирования программного перевода объ-

екта управления в безопасное состояние при имитации режима «Аварийный останов» в момент слива массы в корпус и аппаратного перевода объекта в безопасное состояние при имитации состояния «пробой силового кабеля технологического участка».

Состояние оборудования на момент имитации режима «Аварийный останов»:

- корпус изделия находится в барокамере;
- сливная система собрана с корпусом;
- смеситель находится на позиции слива;
- переходник находится в рабочем состоянии;
- маслостанция отключена;
- включен вакуум по всем позициям;
- выполняется режим слива топливной массы в корпус заряда.

Анализ полученных данных показал, что в рассмотренной ситуации выполняются программно — логические блокировки на любой стадии текущей технологической операции и оборудование объекта управления остается в таком состоянии, которое не может привести к нарушению регламентных норм контролируемых параметров. Зафиксированное при этом незначительное падение вакуума по всем позициям относительно начальных значений связано с тем, что после перевода оборудования в состояние блокировки приборы регистрировали вакуум в коммуникациях до запорной арматуры. Этот факт свидетельствует о надежности программных блокировок в режиме «Аварийный останов», работоспособности приборов регистрации вакуума и герметичности коммуникаций.

В данном случае при условии герметичности запорно-регулирующей арматуры и исправности оборудования контролируемые параметры за 1 час нахождения процесса в режиме «Аварийный останов» практически остались неизменными. Следовательно, в течение этого периода не произойдет значительных изменений физико-механических показателей топливной массы, так как время жизни ее компонентного состава намного превышает период остановки.

Для проверки аппаратного способа перевода оборудования в безопасное состояние и определение правильной последовательности вывода оборудования в рабочий режим имитировалась ситуация пробоя силового кабеля питания стойки управления УСО зданием. Состояние оборудования на момент имитации то же, что и в предыдущем случае.

Эксперимент был выполнен дважды, но с различным порядком вывода оборудования в рабочий режим. Анализ результатов показал, что при наступлении имитируемого события аппаратные блокировки не всегда обеспечивают надежное удержание контролируемых параметров в пределах регламентных требований. Это связано с тем, что проектом АСУТП не предусмотрено дистанционное управление вакуумными насосами из-за их конструктивных и паспортных особенностей, требующих ручных операций при их штатном включении или выключении.

Однако при изменении порядка выхода из критической ситуации результат был положительным. Таким образом, рассмотренный метод позволяет найти приемлемые режимы работы оборудования на объекте управления при наступлении критических ситуаций и определить порядок вывода оборудования в рабочий режим без потери качества управления.

Аналогичным образом составляются таблицы безопасности и по другим вероятно возможным нештатным ситуациям. По сути, каждая такая таблица описывает пошаговую логику перевода объекта на регламентные режимы работы после устранения обнаруженных неисправностей.

Описанные способы проверки и отладки программного обеспечения АСУТП, включая систему безопасности, позволили не только построить и уточнить таблицы безопасности, но и определить максимально возможное время нахождения процесса в безопасном состоянии, в течение которого важные технологические параметры остаются в пределах нормы.

Это, в свою очередь, позволило уточнить нормы времени для ремонтного персонала службы КИПиА, которыми они могут располагать для поиска и устранения неисправности при реально наступивших нештатных ситуациях.

#### **Особенности использования имитационного стенда в качестве тренажера операторов технологических процессов производств спецхимии**

Основными элементами, входящими в состав стенда, обеспечивающими его использование в качестве компьютерного тренажера, являются:

- тренажерная модель, имитирующая работу реального технологического процесса;
- операторский интерфейс, посредством которого осуществляется взаимодействие оператора с тренажерной моделью [10];
- автоматизированное рабочее место инструктора.

Тренажерная модель разрабатывается в соответствии со следующими требованиями:

- обладать правдоподобными динамическими свойствами;
- адекватно отражать работу установки в широком диапазоне технологических режимов и ситуаций, в том числе предаварийных и аварийных.

Обмен данными между моделью и рабочей станцией обучаемого осуществляется посредством стандартных промышленных протоколов. Рабочее место инструктора для эффективного обучения обеспечивает достижение следующих возможностей:

- слежение за действиями обучаемого оператора в реальном времени;
- работа с несколькими обучаемыми;
- создание сценариев обучения;
- работа с архивами сценариев обучения.

Сценарий обучения создается в соответствии с разработанными таблицами безопасности для каждого технологического процесса. При помощи программ-

ного обеспечения имитационного стенда формируется ситуация, представленная в таблицах безопасности, оператор выдает необходимые управляющие воздействия, проводится регистрация действий оператора системой управления и последующий анализ с целью определения правильности выдаваемых воздействий в конкретной имитируемой ситуацией.

В общем случае на тренажере оператора имитируются следующие ситуации:

- повышение концентрации вещества выше допустимой нормы;
- возгорание в технологическом зале;
- механическое повреждение вращающихся частей машин;
- подача вещества в оборудование не в соответствии с регламентной последовательностью;
- повышение температуры смеси выше допустимой нормы;
- повышение уровня смеси выше допустимой нормы;
- отказ различных элементов безопасности технологического процесса;
- повреждение гидравлического, пневматического и электрического привода.

#### **Заключение**

Сформулируем основные цели отладки и тестирования АСУТП на специализированных отладочных и имитационных стендах:

- поиск решений по улучшению функциональной надежности технических систем, конструкций аппаратов и отдельных узлов оборудования;
- получение экспериментальных данных, подтверждающих правильность принятых решений и обеспечивающих требуемое качество готового изделия на любой стадии его изготовления при наступлении возможных нештатных (критических) ситуаций;
- проверка работоспособности аппаратных и программных блокировок в случае наступления таких ситуаций;
- анализ действий обслуживающего персонала в нештатных ситуациях, времени их устранения, необходимого для сохранения требуемого качества готового изделия;
- уточнение требований к системе управления;
- выработка рекомендаций по бездефектному изготовлению серийных изделий за счет предотвращения любых нештатных ситуаций на ранних стадиях их возникновения;
- корректировка производственной программы и других нормативных документов по ведению процесса на основании полученных данных.

Большинство компонентов рассматриваемой системы реализованы и находятся в рабочем состоянии. В настоящее время совершенствуются модели технологических процессов, интерфейсы обучаемого и инструктора, сценарии обучения. Особое внимание в плане разработки такого рода систем уделяется

созданной И. В. Вельбицким под научным руководством ак. В. М. Глушкова графической системе разработки программного обеспечения, в значительной мере упрощающей, улучшающей и ускоряющей процессы проектирования сложных программных систем [11].

#### Список литературы

1. Попов Ф.А., Груздев Г.П., Филиппов С.А. Технология разработки программного обеспечения ЭВМ М-400 и М-6000 с использованием ЭВМ БЭСМ-6 // Управляющие системы и машины. 1980. №1. С.41-45.
2. Попов Ф.А., Карлов А.А. Диалог-диалоговая система для разработки математического обеспечения ЭВМ в режиме эмуляции // Тр. III всесоюзной конф. "Диалог Человек-ЭВМ". Протвино: ИФВЭ, 1983. С.69.
3. Попов Ф.А., Жарков А.С., Филиппов С.А. Диалоговая система для программирования микропроцессорных управляющих устройств на основе КТС ЛИУС-2 // Передовой производственный опыт. 1986. № 5. С. 25.
4. Жарков А.С., Звольский Л.С., Литвинов А.В., Попов Ф.А. Проблемы создания интегрированных АСУ для производств спецхимии и пути их решения. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. 2014. 266 с.
5. Абрамов Д.Г., Звольский Л.С., Кодолов А.В., Попов Ф.А. Особенности и перспективы создания АСУ технологическими процессами производств спецхимии // Фундаментальные исследования. 2015. № 9. С. 407-413.
6. Абрамов Д.Г., Кодолов А.В., Попов Ф.А. Система противоаварийной защиты процесса кассетного формования малогабаритных изделий из смесового композиционного материала // Международный симпозиум «Компьютерные измерительные технологии». Москва. 2015. С. 38-40.
7. Абрамов Д.Г., Абрамов Д.Г., Кодолов А.В., Попов Ф.А. Особенности создания систем противоаварийной защиты для современных специальных химических производств // Автоматизация в промышленности. Февраль 2016, №2. с. 10-12.
8. Обновленский П.А. Мусяков Л.А., Чельцов А.В. Системы защиты потенциально опасных процессов химической технологии. Л.:Химия, 1978. 224 с.
9. Федоров Ю.Н. Основы построения АСУТП взрывоопасных производств. В 2-х томах. Методология. Т. 1. М.: СИНТЕГ, 2006. 720 с.
10. Абрамов Д.Г., Кодолов А.В., Попов Ф.А. Особенности построения пользовательских интерфейсов для автоматизированных систем управления производствами спецхимии // Автоматизация в промышленности. 2018. №6. С. 52-57.
11. Вельбицкий И.В. Новая графическая концепция программирования // Южно-Сибирский научный вестник. 2018. №4(24). С.83-98.

*Абрамов Дмитрий Георгиевич — зам. генерального директора по качеству и промышленной безопасности,*

*Кодолов Артем Владимирович — начальник отделения вычислительной техники и автоматики,*

*Литвинов Андрей Владимирович — д-р техн. наук, советник главного конструктора по НИОКР АО «ФНПЦ «Алтай»,*

*Попов Федор Алексеевич — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник АО «ФНПЦ «Алтай».*

*Контактный телефон +7(3854)30-12-00.*

*E-mail: abramov.biysk@gmail.com ovtia.frpc@gmail.com altai-biysk@mail.ru pfa2004@mail.ru*

DOI: 10.25728/avtprom.2020.03.02

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

**О.Н. Гринюк (ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»),**

**О.В. Алексашина (ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»)**

**А.В. Архипов (ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»)**

*Рассматриваются особенности расчета проекта электрохимической защиты магистральных трубопроводов для обеспечения их надежной и безопасной эксплуатации, а также предотвращения их разрушения по причине коррозии.*

*Ключевые слова: электрохимическая защита трубопроводов, анодное заземление системы катодной защиты, информационное сопровождение проектных расчетов.*

Обеспечение надежной и безопасной работы трубопроводов и предотвращение их разрушения по причине коррозии достигается за счет реализации комплекса мероприятий, важнейшим из которых является активное противодействие негативным процессам при помощи электрохимической защиты (ЭХЗ). Все трубопроводы (кроме проложенных надземно) независимо от условий эксплуатации согласно ГОСТ Р 51164-98 подлежат ЭХЗ. Электрохимическая защита должна обеспечивать в течение всего срока эксплуатации непрерывную по времени ка-

тодную поляризацию трубопровода на всем его протяжении (и на всей его поверхности) таким образом, чтобы значения потенциалов на трубопроводе были (по абсолютной величине) не меньше минимального и не больше максимального значений.

Электрохимическую защиту следует проектировать в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51164, ГОСТ 9.602-89, РД 91-020.00-КТН-234-10, СНиП 2.05.06-85 «Магистральные трубопроводы», «Правил устройства электроустановок», «Руководство по эксплуатации систем противокоррозионной защиты трубопроводов»,