

Тенденция развития современных систем автоматического регулирования технологических процессов воздуходелительных установок

© Е.С. Навасардян¹, К.В. Мохов²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана Москва, 105005, Россия

²ПАО «Криогенмаш», г. Балашиха, Московская обл., 143907

Представлен анализ зарубежных и отечественных научных публикаций, посвященных вопросам создания алгоритмов управления для систем автоматического регулирования технологических процессов воздуходелительных установок. Рассмотрены уровни построения автоматизированной системы управления технологическими процессами воздуходелительных установок. Подведен итог текущему состоянию автоматизированных систем управления технологическими процессами современных воздуходелительных установок и предложены пути их дальнейшего развития.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, контур регулирования, объект регулирования, стабилизация технологического процесса, ректификация, разделение воздуха, воздуходеление, воздуходелительная установка

Введение. Известно, что потребление продуктов воздуходеления зависит от конъюнктуры рынка и не является постоянным. Переход с одного технологического режима (изменение производительности по продуктам разделения) на другой, а также контроль и управление процессами на нестационарных режимах пуска-остановки в настоящее время осуществляются оператором воздуходелительной установки (ВРУ) вручную. Это приводит к значительным дополнительным затратам электроэнергии на получение «ненужного» продукта, нарушению технологического процесса, потере качества продукта или останову блока. Современные методы динамического моделирования криогенных систем [1] позволяют выстроить эффективный алгоритм и разработать на основе динамической модели систему автоматического регулирования технологическим процессом ВРУ.

Решению приведенных проблем призваны служить системы автоматического регулирования технологического процесса разделения воздуха, над которыми сегодня активно работают исследователи по всему миру.

Объектом исследования является система автоматического регулирования технологического процесса воздуходеления. Цель ра-

боты — поиск перспективного направления в области автоматизации ВРУ.

Структурный анализ кислородного производства как объекта автоматизации. Технологический цикл производства и обеспечения продуктами разделения состоит из последовательности технологических процессов, реализуемых в соответствующих функциональных блоках (рис. 1), цели регулирования которых приведены в табл. 1.

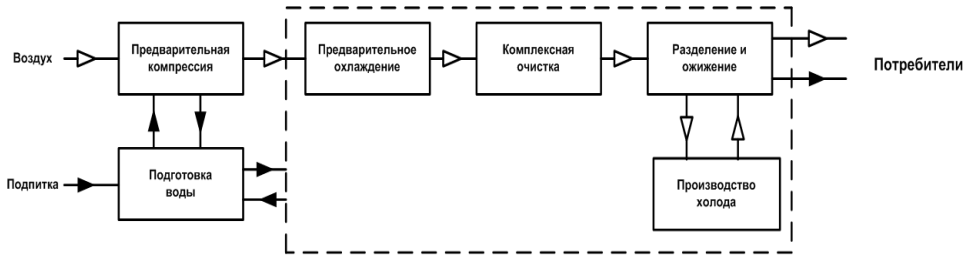


Рис. 1. Структурная схема воздухоразделительной установки

Таблица 1

Воздухоразделительная установка как объект автоматизации

Название блока	Описание блока	Цель регулирования	Возмущающие воздействия
Блок предварительной компрессии	В блоке осуществляется предварительное сжатие атмосферного воздуха до требуемого давления. Блок представляет собой ряд параллельно работающих многоступенчатых центробежных компрессоров с промежуточным водяным охлаждением (без конечного охладителя) и влагоотделителями	Поддержание давления воздуха на выходе из компрессорного агрегата [2, 3]	Колебания давления в коллекторе в связи с изменением производительности ВРУ (изменение режима технологического процесса) или других потребителей (в случае подключения к общезаводскому коллектору сжатого воздуха). Колебания параметров атмосферного воздуха (температура и влажность) и оборотной воды (температура)
Блок подготовки воды	В блоке осуществляется подготовка охлаждающей оборотной воды технологического процесса. Блок может быть представлен либо двумя контурами циркуляции воды (внешний — с градирней и внутренний — с подачей воды потребителям), либо холодильной машиной для охлаждения воды	Поддержание заданной температуры и давления в коллекторе подачи оборотной воды [4]	Колебания давления в коллекторе оборотной воды в связи с переменным потреблением. Колебания параметров окружающей среды (температура и влажность)

Название блока	Описание блока	Цель регулирования	Возмущающие воздействия
Блок предварительного охлаждения	Схемно-технологическое решение блока определяется параметрами блока разделения. Блок может быть представлен воздушным и азотным скруббером и холодильной машиной	Поддержание заданной температуры воздуха на выходе из блока [5]	Колебания температуры и влажности воздуха после блока предварительной компрессии, связанные с сезонными и суточными колебаниями характеристик атмосферы (температура и влажность). Изменение расхода отбросного азота в азотный скруббер (изменение режима технологического процесса)
Блок комплексной очистки (БКО)	В блоке осуществляется очистка воздуха от взрывоопасных примесей и его осушка	Контроль влажности и концентрации взрывоопасных примесей в потоке воздуха, направляемого в блок разделения и ожижения [6].	Колебания расхода воздуха, поступающего на разделение (изменение режима технологического процесса). Изменение свойств адсорбента в процессе эксплуатации установки
Блок производства холода	В блоке осуществляется производство холода, необходимое для компенсации теплопритоков из окружающей среды, холодопотерь, ожижения продуктов разделения	Обеспечение требуемой холодопроизводительности [7]	Изменение параметров потоков, входящих в блок, и требуемой холодопроизводительности в связи с изменением режима технологического процесса
Блок разделения и ожижения	В блоке осуществляется комплексное разделение воздуха, сжатие и ожижение продуктов разделения	Поддержание характеристик продуктов разделения (расходов, концентраций, давлений) на заданном уровне [8]	Изменение параметров воздуха, входящего в блок (расход и давление). Колебания давления в системе хранения и выдачи продуктов, вызванные переменным потреблением продуктов разделения

Хронология совершенствования АСУ ВРУ. В течение длительного времени эксплуатации ВРУ, вплоть до середины 90-х гг. XX в., к системе регулирования процесса разделения воздуха не были предъявлены специальные требования. Функции системы регулирования сводились к локальной стабилизации технологических параметров [9–11]: уровней жидкости, расходов, давлений и обеспечению оптимальных соотношений внутренних потоков.

Современные автоматизированные системы управления (АСУ) технологическими процессами (ТП) ВРУ [12, 13] имеют типовую многоуровневую структуру.

Предлагаемые уровни автоматизации ВРУ [14] представлены на рис. 2.

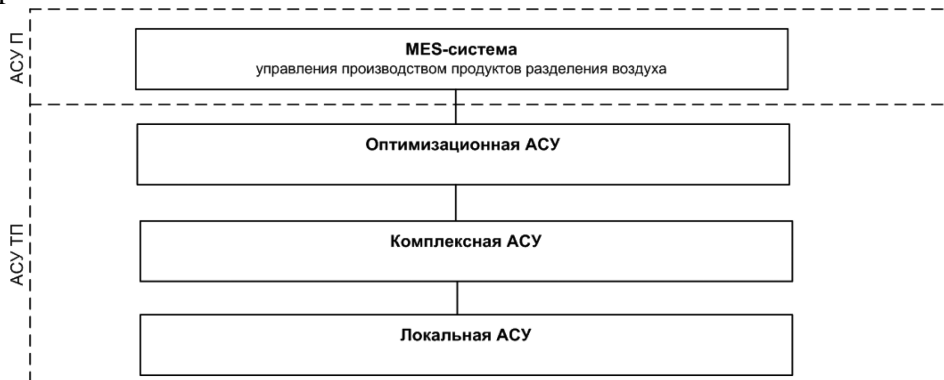


Рис. 2. Уровни автоматизации ВРУ

К функциям уровней АСУ предъявляют следующие требования:
локальная АСУ — проектирование локальных контуров стабилизации отдельных технологических параметров (уровень, давление, расход) узлов установки;

комплексная АСУ — обеспечение автоматической корректировки параметров режима по возмущающему воздействию;

оптимизационная АСУ — выполнение оптимизации технологического процесса по созданной линейной математической модели (исходя из решения математической модели она должна формировать задание для комплексной АСУ);

MES-система — проведение расчета статических режимов работы ВРУ, исходя из плана потребления продуктов разделения, в том числе:

- планирование работы группы установок;
- планирование остановов (в частности, в целях планового ремонта) и соответствующее планирование загрузки системы хранения (создание заделов);
- составление электронной документации;
- создание интерактивного каталога запчастей.

В настоящее время концепция комплексной автоматизации получила наибольшее распространение. Сокращение количества обслуживающего персонала и возможный переход на удаленное управление, безусловно, являются важными направлениями автоматизации ВРУ.

Дальнейшим предполагаемым этапом развития ВРУ является решение задач оптимизации ТП в целях уменьшения затрат ресурсов (в частности, энергозатрат) на получение продуктов разделения, регулирования производительности установки [15–17] в некотором интервале и соответственно эффективной работы ВРУ на различных

технологических режимах посредством введения в структуру оптимизационной АСУ, а также потребность создания экономичного плана производства продуктов (для одной установки или группы установок) [18] — MES-системы.

Наиболее значимые достижения в области построения верхнего уровня управления ТП ВРУ сведены в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Разработки для построения верхнего уровня управления технологическим процессом воздухоразделительной установки

Уровень АСУ ТП ВРУ	Разработчик	Результат работы	Примечание
Оптимизационная (по математическим моделям)	В.Н. Шамкин, И.А. Зауголков, В.А. Лузгачев; ТГТУ, АО «Криогенмаш» [19–21]	Алгоритмы адаптивного управления, пакеты программ и математические модели для ВРУ типа КА и АКАр	Отсутствует возможность реализации в современных ВРУ в связи с развитием технологий (насадочные колонны вместо тарельчатых, БКО вместо регенераторов). Неиспользование в современном программном обеспечении языка Fortran
	ПАО «Криогенмаш» [22]	Разработка программного обеспечения, которое позволяет абсолютно самостоятельно циклу БКО подстраиваться под любые внешние и внутренние изменения в работе ВРУ без последствий для протекания ТП (см. рис. 3)	В результате использования АСУ на типовой установке в 173 000 м ³ /ч затраты электроэнергии при разгрузке на 30 % уменьшаются на 146 кВт/ч
Оптимизационная (экспертная система управления)	W.R. Esposito, L. Megan; Prax-Air Technology [23]	Патент на систему управления жидкостным производством ВРУ в зависимости от потребления продуктов воздухоразделения, полученной по экспертным данным	Разработка не нашла промышленного применения, хотя была перспективна для реализации
	Ю.К. Букурако [24]; ТГТУ	Экспертная система управления для ВРУ КА-32 с возможностью адаптации системы для всего типового ряда установок	По экспертным данным, разработана древовидная графа целей обеспечения качества регулирования
MES-система	И.В. Евсеенко; МЭИ [25]	Разработка системы планирования загрузки группы ВРУ в зависимости от потребности Череповецкого металлургического комбината в продуктах разделения и себестоимости их получения	Разработана динамическая модель и программа расчета режимов работы, представленная в виде дифференциальных уравнений

Для реализации технических идей по созданию оптимизационной АСУ необходим качественный инструмент. Наиболее востребован-

ными из множества систем остаются программно-технические средства фирмы Siemens [26], которые активно используются на площадках

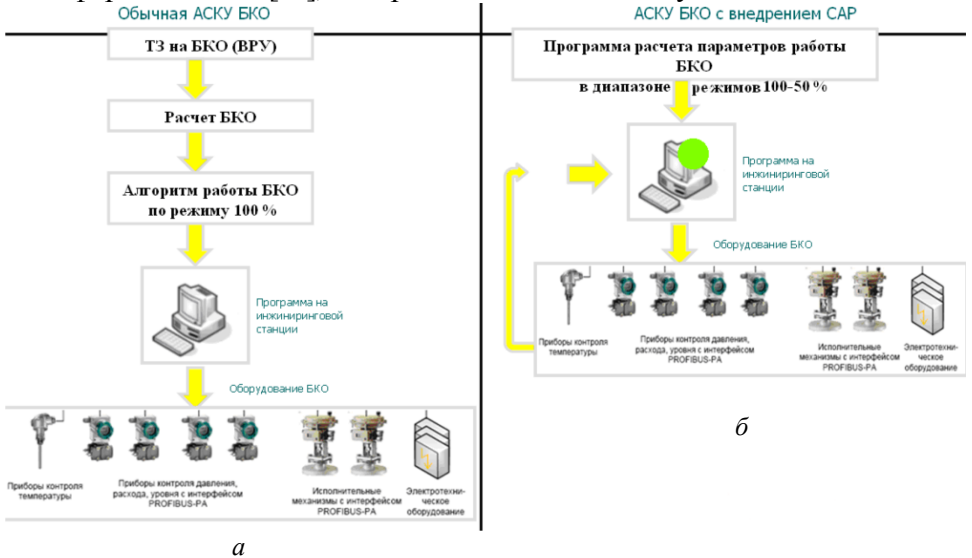


Рис. 3. Система автоматического регулирования работы блока комплексной очистки воздуха в составе воздухоразделительной установки:

а — алгоритм работы БКО по строго заданной циклограмме (система обеспечивает только автоматическую работу БКО); *б* — оптимизационный алгоритм работы БКО (система обеспечивает автоматическую работу БКО и оптимизацию режима работы по конкретным значениям параметров, поступающих с датчиков); АСКУ — автоматическая система контроля и управления; ТЗ — техническое задание

большинства мировых лидеров в области воздухоразделения. С их помощью удастся решить задачу проектирования систем управления на основе программируемых логических контроллеров.

Для сбора, обработки, отражения и архивации информации об объеме мониторинга в реальном времени, а также диспетчерского управления ТП (с возможностью реализации вопроса дистанционного управления) сегодня успешно применяются SCADA-системы (Supervisory Control And Data Acquisition (рис. 4). Лидером по разработке данных систем также является фирма Siemens с ее программно-аппаратными комплексами SIMATIC WinCC и FactoryLink [27, 28].

Более сложной по своей реализации, но и более перспективной по своим задачам является разработка Р. Mahapatra и В.В. Bequette [29], которые создали динамическую модель ВРУ в Aspen HYSYS и интегрировали на площадку с помощью MATLAB Simulink. Эффективность подобного контроллера была доказана посредством сравнения с линейной моделью экспертной и традиционной системы управления и показана надежность и простота реализации данной задачи.

Отдельно хотелось бы отметить комплексное моделирование операционной системы (ОС) для криогенной ВРУ китайских ученых

[30], которую можно использовать для обучения операторов, анализа аварий и неисправностей, а также прогнозирования операционных

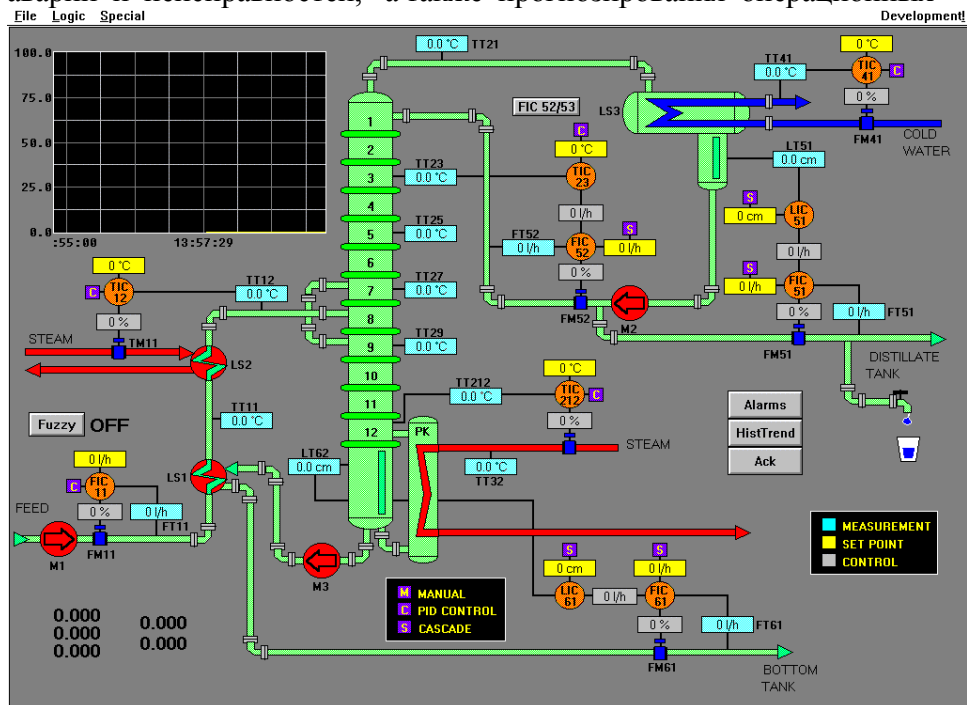


Рис. 4. Технологический процесс разделения воздуха в SCADA-системе

результатов. Симулирование результатов ОС совпадает с моделированными аналогами установок малой (20 000Nm³/h воздуха) и большой (720 000Nm³/h воздуха) производительности.

Выводы. Задача разработки комплексной системы управления процессом разделения воздуха актуальна для создания энергетически эффективных ВРУ.

Система управления современной ВРУ должна решать множество задач, в том числе осуществлять изменение технологического режима работы установки и обеспечивать его полностью автоматическое течение.

В настоящее время наибольшее распространение получила концепция комплексной автоматизации, которую необходимо развивать параллельно с оптимизационной.

Адаптивные системы управления ВРУ не обеспечивают реализацию режима переменной производительности в реальном времени, так как она использует математические модели, которые весьма громоздки и требуют крупных вычислительных затрат, не соизмеримых с темпом ведения процесса. Поэтому базой для разработки АСУ ТП ВРУ должны служить экспертные системы управления, которые ос-

новываются на аналитических данных с действующих площадок от операторов и технологов.

Практически все представленные в статье наработки в области автоматической смены режима работы воздухоразделительной установки являются, по большому счету, теоретическими и не доведенными до практического применения, поэтому вопрос разработки и внедрения системы в производство актуален и сегодня.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Архаров И.А., Нагимов Р.Р., Навасардян Е.С. Задачи и развитие методов динамического моделирования криогенных систем. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2016, № 7, с. 24–27.
- [2] Chen Y.-Y., Lu S.-Z., Shu X.-K. The research of anti-surge control on air separation compressor. *Proceedings of International Conference on Electrical and Control Engineering, 25–27 June 2010*. IEEE Industry Applications Society. Wuhan Institute of Technology, Wuhan, China, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Publ., 2010, pp. 1613–1616.
- [3] Wang S., Jin X., Tian W. A Research on the Methods of Forecasting and Controlling for Air Compressor. *Proceedings of International Conference on Electrical and Control Engineering, 25–27 June 2010*. IEEE Industry Applications Society. Wuhan Institute of Technology, Wuhan, China, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Publ., 2010, pp. 240–243.
- [4] McCormick D.K., McQuade W.F. *Two-zone fuzzy logic liquid level control*. Appl. No 12/577,353, Int. Cl. G 05 D 23/19, assignee York International Corporation, pat. US no. 20100030385, filed on Oct. 12, 2009, pub. date on Feb. 04, 2010, 14 p.
- [5] Wei Lai, Li Nan. Air separation unit pre-cooling system temperature control for optimum design. *Proceedings of International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 24–26 August 2010*. Changchun University of Technology – CCUT. Changchun, China, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Publ., 2010, pp. 381–382.
- [6] Лавренченко Г.К., Копытин А.В., Швец С.Г. Оптимизация узла осушки и очистки воздуха воздухоразделительной установки высокого давления с целью снижения энергопотребления. *Технические газы*, 2006, № 1, с. 28–33.
- [7] Проворный Л.С., Громов А.Ф., Степ Х.Я., Рожинский Б.И., Абрамов А.В., Сухов В.И. *Способ регулирования процесса разделения воздуха в криогенной установке*. Заявка 3235298/23-26, МПК F 25 J 3/04, пат. № 947595 СССР, заявл. 23.10.1980, опубл. 30.07.1982, бюл. № 28, 3 с.
- [8] Steele R.D. *System and method for controlling an air separation unit*. Appl. no. 12/875,053, Int. Cl. B 01 D 53/22, assignee General Electric Company (US), pat. US no. 20120055331, filed on Sep. 02, 2010, pub. date on Mar. 08, 2012, 11 p.
- [9] Дудкин И.Е., Плотников В.В., Гарин В.А., Писарев Ю.Г., Волынский Б.И., Зотов В.И., Алексахин В.В., Рожинский Б.И., Бодров В.И., Курьшев Е.А. *Способ автоматического регулирования процесса разделения воздуха в криогенном комплексе и устройство для его осуществления*. Заявка 4855323/06, МПК F25 J 3/04, заявитель: Балашихинское научно-производственное объединение криогенного машиностроения им. 40-летия Октября, пат. № 1809268 СССР, заявл. 17.05.1990, опубл. 15.04.1993, бюл. № 14, 4 с.

- [10] Дубинин В.А., Проворный Л.С., Курышев Е.А., Кузьмин В.И., Чернецов В.Н. *Способ автоматического регулирования установки разделения воздуха и устройство для его осуществления*. Заявка 93019795/06, МПК F 25 J 3/04, заявитель: Балашихинское научно-производственное объединение криогенного машиностроения им. 40-летия Октября, пат. № 2063590 РФ, заявл. 15.04.1993, опубл. 10.07.1996, 6 с.
- [11] Darrodeau B., Grenier M., Garnier C., Venet F. *Process and installation for producing gaseous nitrogen with variable flow rate*. Appl. no. 136,276, Int. Cl. F 25 J 3/00, assignee l'Air Liquide, pat. US no. 5355680, filed on Oct. 15, 1993, pub. date on Oct. 18, 1994, 5 p.
- [12] Лапшин А.А. Системы автоматизации воздуходелительных установок и кислородных станций производства ОАО «Криогенмаш». *Технические газы*, 2009, № 6, с. 17–25.
- [13] Лебедев В.В., Кашенков А.И., Зудилин А.В., Плотников В.В. Автоматизированная система контроля и управления воздуходелительных установок. *Технические газы*, 2004, № 2, с. 19–23.
- [14] Леньшин В.Н., Куминов В.В., Фролов Е.Б., Будник Р.А. Производственные исполнительные системы (MES) — путь к эффективному предприятию. *Журнал «САПР и графика»*, 2003, № 6, с. 93–96.
- [15] Радченко А.А., Козлов А.В. Анализ способов регулирования производительности воздуходелительных установок. *Актуальные направления научных исследований XXI века: Теория и Практика*. Воронеж, Изд-во ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», 2015, Т. 3, № 7–12 (18–2), с. 383–387.
- [16] Wang J., Kong J., Kong P., Yang J., Li G. Intelligent control of automatic variable-loading system in the process of oxygen production. *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, on July 22–24, 2011*. Shandong University, Yantai University, Shandong, 2011, pp. 5824–5827.
- [17] Xu Z., Zhao J., Chen J., Shao Z., Qian J., Zhu L., Zhou Z., Qin H. Automatic load change system of cryogenic air separation process. *Separation and Purification Technology*, 2011, vol. 81, no. 3, pp. 451–465.
- [18] Megan L., Lennox D.F., Seharf P.F., Adebekun D. *Control of liquid production of air separation plant network*. Appl. no. 10/352,037, Int. Cl. G 05 B 17/00, assignee Praxair, Inc, pat. US no. 20040148264, filed on Jan. 28, 2004, pub. date on Jul. 29, 2004, 8 p.
- [19] Зауголков И.А. *Оптимизация на интервале времени режимов работы установок разделения воздуха низкого давления с получением азота, кислорода и аргона*. Дис. ... канд. техн. наук. Тамбов, 1996, 279 с.
- [20] Лузгачев В.А. *Адаптивное управление установкой разделения воздуха при переменной производительности (на примере ВРУ КА-32)*. Дис. ... канд. техн. наук. Тамбов, 1997, 232 с.
- [21] Шамкин В.Н. *Дестабилизационное управление сложными технологическими объектами*. Дис. ... д-ра техн. наук. Тамбов, 1997, 440 с.
- [22] Орешкин А.Н., Борзенко Н.А., Липа В.И., Федоренко Л.М. Автоматическое обеспечение энергосберегающих режимов работы блоков комплексной очистки воздуха воздуходелительных установок. *Технические газы*, 2015, № 6, с. 71–77.
- [23] Esposito W.R., Megan L. *Method of controlling liquid production utilizing an expert system controller*. Appl. No 11/100,428, Int. Cl. F 25 J 3/00, assignee Praxair Technology, Inc., pat. US no. 7249470, filed on Apr. 07, 2005, pub. date on Jul. 31, 2007, 10 p.

- [24] Букурако Ю.К. *Разработка экспертной системы управления реального времени воздухоразделительной установкой низкого давления*. Дис. ... канд. техн. наук. Тамбов, 2004, 156 с.
- [25] Евсеенко И.В. *Разработка и применение динамической математической модели системы кислородоснабжения на металлургическом комбинате*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2004, 133 с.
- [26] Савельев А.М., Попов С.А., Сергеев Г.И., Шереметьев В.К., Ломакин В.Ф. Программно-технические средства для автоматизации воздухоразделительных установок. *Технические газы*, 2001, № 1–2, с. 55–57.
- [27] Ляпощенко А.В., Скиданенко М.С., Маренок В.М. Опыт внедрения комплексных интегрированных CAD/CAE и SCADA-систем для моделирования и оптимизации химико-технологических процессов. *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Сб. науч. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 томах*. Юго-Западный государственный университет (Россия), Московский государственный машиностроительный университет (Россия), Сумской государственный университет (Украина), Кустанайский государственный университет имени Ахмета Байтурсынова (Казахстан), Курск, Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2015, с. 379–384.
- [28] Belanger W.P. *Method for controlling the operation of a cryogenic rectification plant*. Appl. no. 10/310,020, Int. Cl. P 25 J 3/00, assignee Praxair Technology, Inc., pat. US no. 6647745, filed on Dec. 5, 2002, pub. date on Nov. 18, 2003, 10 p.
- [29] Mahapatra P., Bequette B.W. Process design and control studies of an elevated-pressure air separations unit for IGCC power plants. *Proceedings of the American control conference, 30 June–2 July 2010*. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), American Institute of Chemical Engineers (AIChE), Association of Iron and Steel Technology (AIST), American Society of Civil Engineers (ASCE), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), American Society of Mechanical Engineers (ASME), International Society for Measurement and Control (ISA), the Society for Computer Simulation (SCS), Baltimore, Maryland, USA, Institute of Electrical and Electronics Engineers Publ., 2010, pp. 2003–2008.
- [30] Tong L., Wang L., Sun S., Zhang Y. Research and Development of Operation Simulation System for Cryogenic Air Separation Unit. *Proceedings of the Second WRI World Congress on Software Engineering, 19–20 December 2010*. Hubei, Wuhan, China, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Publ., 2010, pp. 256–258.

Статья поступила в редакцию 12.12.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Наvasардян Е.С., Мохов К.В. Тенденция развития современных систем автоматического регулирования технологических процессов воздухоразделительных установок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 3.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-3-1597>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на 13-й Международной научно-практической конференции «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития», которая состоялась 1–2 ноября 2016 г., Москва

Навасардян Екатерина Сергеевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: криогенные системы разделения и очистки газов и газовых смесей. e-mail: navasard@mail.ru

Мохов Константин Владимирович — аспирант кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер-конструктор ПАО «Криогенмаш». Область научных интересов: регулирование технологического процесса разделения воздуха. e-mail: k.mokhov@omzglobal.com, konstantine-48@mail.ru

Trends in developing modern automated control systems of technological process in air separation units

© E.S. Navasardyan¹, K.V. Mokhov²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russi

²Public joint-stock company “Cryogenmash”, Balashikha town, Moscow region, 143907, Russia

The article presents the analysis of foreign and domestic scientific publications devoted to the establishment of control algorithms for automatic control systems of air separation plant technological processes. The levels of automated process control system for air separation plants are considered. The current state of the process control systems of modern air separation plants is summed up and the ways of their further development is suggested.

Keywords: *automatic control system, control circuit, controlled object, control process loop stabilization, distillation, separation of air, air separation, air separation unit*

REFERENCES

- [1] Arkharov I.A., Nagimov R.R., Navasardyan E.S. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie — Chemical and Petroleum Engineering*, 2016, no. 7, pp. 24–27.
- [2] Chen Y.-Y., Lu S.-Z., Shu X.-K. The research of anti-surge control on air separation compressor. *Proceedings of International Conference on Electrical and Control Engineering, 25–27 June 2010*. IEEE Industry Applications Society. Wuhan Institute of Technology. Wuhan, China, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Publ., 2010, pp. 1613–1616.
- [3] Wang S., Jin X., Tian W. A Research on the Methods of Forecasting and Controlling for Air Compressor. *Proceedings of International Conference on Electrical and Control Engineering, 25–27 June 2010*. IEEE Industry Applications Society. Wuhan Institute of Technology. Wuhan, China, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Publ., 2010, pp. 240–243.
- [4] McCormick D.K., McQuade W.F. *Two-zone fuzzy logic liquid level control*. Patent US no. 20100030385, filed on October 12, 2009, published on February 04, 2010, 14 p.
- [5] Wei Lai, Li Nan. Air separation unit pre-cooling system temperature control for optimum design. *Proceedings of International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 24–26 August 2010*. Changchun University of Technology – CCUT. Changchun, China, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Publ., 2010, pp. 381–382.
- [6] Lavrenchenko G.K., Kopytin A.V., Shvets S.G. *Tekhnicheskie gazy — Industrial Gases*, 2006, no. 1, pp. 28–33.
- [7] Provornyy L.S., Gromov A.F., Step Kh. Ya., Rozhinskiy B.I., Abramov A.V., Sukhov V.I. *Sposob regulirovaniya protsessa razdeleniya vozdukh v kriogennoy ustanovke* [A method for controlling an air separation process in the cryogenic plant]. Patent USSR no. 947595, filed on October 23, 1980, published on July 30, 1982, bulletin no. 28, 3 p.
- [8] Steele R.D. *System and method for controlling an air separation unit*. Patent US no. 20120055331, filed on September 02, 2010, published on March 08, 2012, 11 p.

- [9] Dudkin I.E., Plotnikov V.V., Garin V.A., Pisarev Yu.G., Volynskiy B.I., Zotov V.I., Aleksakhin V.V., Rozhinskiy B.I., Bodrov V.I., Kuryshev E.A. *Sposob avtomaticheskogo regulirovaniya protsessa razdeleniya vozdukh v kriogennom komplekse i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for automatically controlling an air separation process in the cryogenic plant and apparatus for implementation thereof]. Patent USSR no. 1809268 filed on May 17, 1990, published on April 15, 1993, bulletin no. 14, 4 p.
- [10] Dubinin V.A., Provornyy L.S., Kuryshev E.A. Kuzmin V.I., Chernetsov V.N. *Sposob avtomaticheskogo regulirovaniya protsessa razdeleniya vozdukh v kriogennom komplekse i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for automatically adjusting the air separation unit and apparatus for implementation thereof]. Patent RF no. 2063590, filed on April 15, 1993, published on July 10, 1996, 6 p.
- [11] Darrodeau B., Grenier M., Garnier C., Venet F. *Process and installation for producing gaseous nitrogen with variable flow rate*. Patent US no. 5355680, filed on October 15, 1993, published on October 18, 1994, 5 p.
- [12] Lapshin A.A. *Tekhnicheskie gazy — Industrial Gases*, 2009, no. 6, pp. 17–25.
- [13] Lebedev V.V., Kashenkov A.I. Zudilin A.V., Plotnikov V.V. *Tekhnicheskie gazy — Industrial Gases*, 2004, no. 2, pp. 19–23.
- [14] Lenshin V.N., Kuminov V.V., Frolov E.B., Budnik R.A. *SAPR i Grafika — CAD and Graphics*, 2003, no. 6, pp. 93–96.
- [15] Radchenko A.A., Kozlov A.V. *Aktualnye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika — Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2015, vol. 3, no. 7–12 (18–2), pp. 383–387.
- [16] Wang J., Kong J., Kong P., Yang J., Li G. Intelligent control of automatic variable-loading system in the process of oxygen production. *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, July 22–24, 2011*. Shandong University, Yantai University, Shandong, 2011, pp. 5824–5827.
- [17] Xu Z., Zhao J., Chen J., Shao Z., Qian J., Zhu L., Zhou Z., Qin H. *Separation and Purification Technology*, 2011, vol. 81, no. 3, pp. 451–465.
- [18] Megan L., Lennox D.F., Seharf P.F., Adebekun D. *Control of liquid production of air separation plant network*. Patent US no. 20040148264, filed on January 28, 2004, published on July 29, 2004, 8 p.
- [19] Zaugolkov I.A. *Optimizatsiya na intervale vremeni rezhimov raboty ustanovok razdeleniya vozdukh nizkogo davleniya s polucheniem azota, kisloroda i argona*. Diss. cand. tekhn. nauk [Optimization at the time interval of operating modes of low pressure air separation units with production of nitrogen, oxygen and argon. Cand. eng. sc. diss.]. Tambov, 1996, 279 p.
- [20] Luzgachev V.A. *Adaptivnoye upravlenie ustanovkoy razdeleniya vozdukh pri peremennom proizvoditel'nosti (na primere VRU KA-32)*. Diss. cand. tekhn. nauk [Adaptive control of the air separation unit with variable capacity (by the example of VRU KA-32). Cand. eng. sc. diss.]. Tambov, 1997, 232 p.
- [21] Shamkin V.N. *Destabilizatsionnoye upravlenie slozhnymi tekhnologicheskimi obyektami*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Destabilized controlling complex technological objects. Dr. eng. sc. diss.]. Tambov, 1997, 440 p.
- [22] Oreshkin A.N., Borzenko N.A., Lipa V.I., Fedorenko L.M. *Tekhnicheskie gazy — Industrial Gases*, 2015, no. 6, pp. 71–77.
- [23] Esposito W.R., Megan L. *Method of controlling liquid production utilizing an expert system controller*. Patent US no. 7249470, filed on April 07, 2005, published on July 31, 2007, 10 p.

- [24] Bukurako Yu.K. *Razrabotka ekspertnoy sistemy upravleniya realnogo vremeni vozdukhorazdelitelnoy ustanovkoy nizkogo davleniya*. Diss. cand. tekhn. nauk [Development of real-time expert control system for low pressure air separation unit. Cand. eng. sc. diss.]. Tambov, 2004, 156 p.
- [25] Evseenko I.V. *Razrabotka i primeneniye dinamicheskoy matematicheskoy modeli sistemy kislorodosnabzheniya na metallurgicheskom kombinatye*. Diss. cand. tekhn. nauk [Development and application of dynamic mathematical model of oxygen supply system at the metallurgical plant. Cand. eng. sc. diss.]. Moscow, 2004, 133 p.
- [26] Savelyev A.M., Popov S.A., Sergeev G.I., Sheremetyev V.K., Lomakin V.F. *Tekhnicheskie gazy — Industrial Gases*, 2001, no. 1–2, pp. 55–57.
- [27] Lyaposhchenko A.V., Skidanenko M.S., Marenok V.M. Opyt vnedreniya kompleksnykh integrirovannykh CAD/CAE i SCADA-sistem dlya modelirovaniya i optimizatsii khimiko-tekhnologicheskikh protsessov [Experience of introduction of complex integrated CAD / CAE and Skada systems for simulation and optimization of chemical-technological processes]. In: *Sbornik trudov XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Sovremennyye instrumentalnyye sistemy, informatsionnyye tekhnologii i innovatsii” v 4 tomakh*. [Proceedings of the XII International scientific and practical conference “Modern tooling systems, information technologies and innovations” in 4 volumes]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2015, pp. 379–384.
- [28] Belanger W.P. *Method for controlling the operation of a cryogenic rectification plant*. Patent US no. 6647745, filed on December 5, 2002, published on November 18, 2003, 10 p.
- [29] Mahapatra P., Bequette B.W. Process design and control studies of an elevated pressure air separations unit for IGCC power plants. *Proceedings of the American control conference, 30 June–2 July 2010*. Baltimore, Maryland, USA, Institute of Electrical and Electronics Engineers Publ., 2010, pp. 2003–2008.
- [30] Tong L., Wang L., Sun S., Zhang Y. Research and Development of Operation Simulation System for Cryogenic Air Separation Unit. *Proceedings of the Second WRI World Congress on Software Engineering, 19–20 December 2010*. Hubei, Wuhan, China, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Publ., 2010, pp. 256–258.

Navasardyan E.S., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Refrigeration, cryogenics. Conditioning and life support systems, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: cryogenic system for separation and purifying gases and gas mixtures. e-mail: navasard@mail.ru

Mokhov K.V., Postgraduate student, Department of Refrigeration, cryogenics. Conditioning and life support systems, Bauman Moscow State Technical University, design engineer, public joint-stock company “Cryogenmash”. Research interests: regulation of the technological process of air separation. e-mail: k.mokhov@omzglobal.com, konstantine-48@mail.ru