

УДК 621.59(075.8)

Ю.Г. Писарев, Е.Ю. Тарасова*, А.И. Ляпин

ОАО «Криогенмаш», пр-т Ленина, 67, г. Балашиха Московской области, РФ, 143907

*e-mail: elena_tarasova@cryogenmash.ru

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ, ВВЕДЁННОЙ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ В ЗАО «СЕВЕРОДОНЕЦКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ АЗОТ»

Сообщается о созданной эффективной воздуходелительной установке (ВРУ) КтА-16/18, которая является первой из серии нового поколения установок, предназначенных для предприятий химической промышленности и цветной металлургии. Специфика этих предприятий состоит в применении кислорода при повышенном относительно небольшом давлении (до 5 бар). В установках предыдущих поколений кислород производился с низким давлением. В связи с этим он дожимался до необходимого давления в кислородных компрессорах. В установках нового поколения кислород производится с требуемым давлением. При этом рабочее давление воздуха в цикле ВРУ остаётся прежним, что делает новые установки термодинамически более совершенными, т.е. энергосберегающими. К ним проявляют интерес ряд предприятий. В ближайшее время ожидается ввод в эксплуатацию ещё двух установок подобного типа. Приводится технологическая схема новой ВРУ, её технические характеристики. Отражены особенности её построения, в частности организации работы смеси колонны. Новая установка на 7 % менее энергоёмка в сравнении с современными ВРУ традиционного построения и на 11 % — с аналогичными ВРУ зарубежных производителей.

Ключевые слова: Воздуходелительная установка. Технологический кислород. Азот. Давление кислорода. Кубовая жидкость. Дросселирование. Смесевая колонна. Испаритель кубовой жидкости. Ректификация. Криогенный насос.

Yu.G. Pisarev, E.Yu. Tarasova, A.I. Lyapin

CHARACTERISTIC OF AIR SEPARATION PLANT OF NEW GENERATION ENTERED INTO OPERATION IN CLOSE JSC «SEVERODONETSK AZOT ASSOCIATION»

About created effective air separation plant (ASP) «KtA-16/18» which is the first from series of new generation of plants intended for the enterprises of the chemical industry and nonferrous metallurgy is informed. Specificity of these enterprises will consist in application of oxygen at increased rather small pressure (up to 5 bar). In plants of the previous generations oxygen was made under low pressure. In this connection it additional pressure up to necessary pressure in oxygen compressors. In plants of new generation oxygen is made under required pressure. Thus working pressure of air in a cycle of ASP remains former that makes new plants as thermodynamic more perfect, i.e. energy-efficient. To them show interest a number of enterprises. In the near future two plants of similar type will put into operation. The technological circuit of new ASP and its characteristics is resulted. Features of its construction, in particular the organizations of work of mixture columns are reflected. New plant on 7 % less power-consuming in comparison with modern ASP of traditional construction and on 11 % in comparison with similar ASP of foreign manufacturers.

Keywords: Air separation plant. Technological oxygen. Nitrogen. Pressure of oxygen. Still liquid. Throttling. Mixture column. Still liquids evaporator. Rectification. Cryogenic pump.

1. ВВЕДЕНИЕ

Традиционно для покрытия потребностей заказчиков в технологическом кислороде с чистотой 95-96

% и давлением до 5 бар использовались установки, построенные по циклам низкого давления, для производства такого кислорода с давлением, близким к атмосферному. Для сжатия кислорода до давления, не-

обходимого потребителю, например, до 5 бар, применялись кислородные компрессоры.

Такие установки, разработанные и поставленные нами в прошлые годы, до сих пор успешно работают на многих предприятиях химической промышленности и цветной металлургии [1,2].

В последние 10-15 лет усилия создателей воздуходелительных установок (ВРУ) были направлены на поиск эффективных решений, которые позволили бы исключить из технологического процесса кислородные компрессоры. Это обуславливалось их потенциально высокой пожароопасностью, низкой эффективностью, а также недостаточной надёжностью из-за чего приходилось их дублировать, расходуя на это значительные дополнительные средства. Сначала эта проблема была успешно решена при создании установок технического кислорода. Так, современные ВРУ с внутренним сжатием кислорода выдают его из блоков разделения под давлением до 30 бар и выше с помощью криогенных насосов. В них при этом часть воздуха сжимается до 55-60 бар и выше [3,4].

И вот теперь настала очередь установок технологического кислорода. Технические решения, используемые в установках нового поколения, позволяют производить выдачу кислорода под давлением до 5 бар без изменения параметров криогенного цикла, другими словами — за счёт имеющихся резервов в установках предыдущих поколений. Указанные резервы реализуются включением в технологическую схему дополнительной работающей под давлением колонны, названной «смесевой», в которой происходит обогащение кислородом продуваемого через неё газообразного воздуха [5] или паров кубовой жидкости в процессе массообмена с жидким кислородом, подаваемым на орошение криогенным насосом. Подробно об этом будет сказано ниже на примере установки КтА-16/18, созданной нами для ЗАО «Северодонецкое объединение Азот» (Луганская область, Украина).

Но пока остановимся на том, как 24.05.08 г. в г. Северодонецке была проведена презентация новой ВРУ [6,7].

Ввод в строй крупнотоннажной ВРУ — всегда приятное и, вместе с тем, волнующее событие и для её заказчика, и для её разработчика и изготовителя. Особенно, конечно, такой совершенной, как ВРУ КтА-16/18. Поэтому на объединении подготовились к презентации, как к празднику. Яркое убранство территории подчёркивало торжественность предстоящего события.

В митинге по случаю ввода в строй новой ВРУ приняли участие: председатель Луганской облгосадминистрации А.Н. Антипов, министр промышленной политики Украины В.С. Новицкий, народные депутаты Украины, руководство объединения, а также директор департамента по работе с нефтехимическими предприятиями ОАО «Криогенмаш» Н.Г. Шейн.

Церемонию официального пуска установки открыл председатель правления ЗАО «Северодонецкое объединение Азот» В.В. Казаков (фото 1). Он сооб-

щил, что новая установка должна существенно улучшить экономические показатели объединения. Так, только по самому цеху разделения воздуха годовой экономэффект составит более 23 млн. грн., а по цехам-потребителям продуктов разделения воздуха — около 6 млн. грн. ежемесячно [7]. Он имени трудового коллектива химиков он выразил особую благодарность председателю наблюдательного совета объединения А.С. Ровту (фото 2).



Фото 1. «Большое трудовое достижение, которое всех нас сегодня радует, — результат совместной слаженной работы ОАО «Криогенмаш», ОАО «Гипрокислород», а также строителей, монтажников и наладчиков», — отметил В.В. Казаков



Фото 2. Почётную миссию официального ввода в строй ВРУ КтА-16/18 под аплодисменты присутствующих выполнили А.С. Ровт (слева) и А.Н. Антипов (на заднем плане)

После этого гости побывали непосредственно в цехе, побеседовали с рабочими и специалистами.

За день до пуска, т.е. 23.05.08 г., сотрудники ОАО «Криогенмаш» провели техническую часть презентации новой ВРУ КтА-16/18 [6]. В ней приняли участие около 30-ти специалистов с нефтехимических и металлургических предприятий России, Украины, Белоруссии. Презентацию открыло выступление Н.Г. Шейна (фото 3). Особенности ВРУ КтА-16/18 были подробно освещены в выступлении руководителя схемно-технологического отдела ОАО «Криогенмаш» С.Н. Пуртова (фото 4). Он сообщил о том, что ВРУ, подготовленная к пуску, является первой из серии установок нового поколения, предназначенных для обеспечения продуктами разделения воздуха предприятий химической промышленности и цветной металлургии.



Фото 3. В докладе Н.Г. Шеина рассказывалось о широких возможностях, достижениях и планах дальнейшего развития ОАО «Криогенмаш» — отечественного лидера кислородного и криогенного машиностроения



Фото 4. В выступлении С.Н. Пуртова говорилось о новых схемно-конструкторских решениях, реализованных в ВРУ КтА-16/18. Рассматривались также её технические характеристики и обосновывался ожидаемый значительный экономический эффект

2. СТРУКТУРА ВРУ КТА-16/18 И РЕАЛИЗУЕМЫЕ В НЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Воздухоразделительная установка КтА-16/18, как отмечалось, была разработана нами для ЗАО «Северодонецкий Азот». Внешний вид её блока разделения показан на фото 5.

Выполнение непростых требований заказчика как по номенклатуре и качеству продуктов (кислород технологический под давлением, чистый газообразный азот под давлением и без давления, жидкие азот и технический кислород), так и по энергоёмкости потребовало поиска и использования в ходе её создания оригинальных схемных и конструкторских решений. Такие решения были найдены и обоснованы ещё на стадии предпроектных работ*. Они заключались в следующем. В смесевую колонну в качестве парового потока следует подавать не воздух после основного теплообменника (как в зарубежных аналогах), а пары кубовой жидкости из нижней колонны, которая дросселируется до промежуточного давления и затем испаряется за счёт теплоты конденсации части воздуха. В установках зарубежных производителей воздух, подаваемый в смесевую колонну после основного теплообменника, исключается таким образом из процесса

разделения в нижней и верхней колоннах, что приводит к снижению орошения верхней колонны и увеличению содержания кислорода в отбросном азоте.



Фото 5. Блок разделения установки КтА-16/18

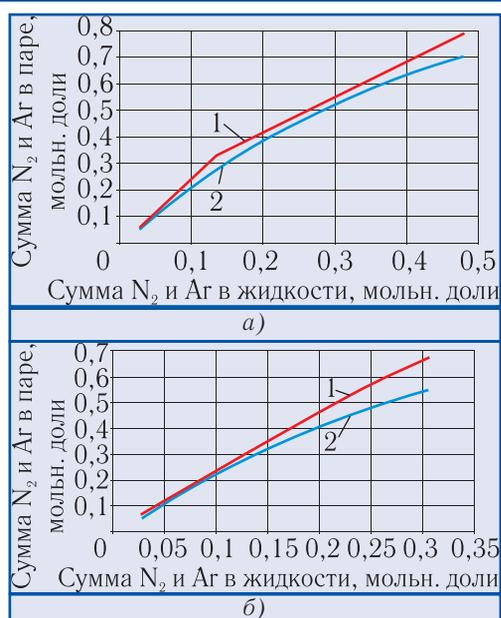


Рис. 6. Характер процессов «обратной ректификации» при продувке смесевой колонны воздухом (а) и парами кубовой жидкости (б): 1 и 2 — рабочая и равновесная линии, соответственно

Процесс, реализуемый в смесевой колонне, принципиально отличается от ректификационного процесса, при котором пар, поднимаясь вверх, обогащается низкокипящим компонентом, а стекающая

* Указанные решения были предложены А.И. Ляпиным — одним из авторов настоящей статьи.

вниз жидкость — высококипящим. Здесь всё наоборот! И поэтому процесс массообмена в x, y -диаграмме изображается рабочей линией, лежащей не внутри равновесной кривой, а вне её. Иногда такой процесс смешения называют «обратной ректификацией». Рис. 6 даёт представление о процессах такой «обратной ректификации» при продувке смесевой колонны воздухом и парами кубовой жидкости.

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ

Технические характеристики установки КтА-16/18 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики установки КтА-16/18

Наименование параметра	Значение
Перерабатываемый воздух:	
— объёмный расход, м ³ /ч	81000
— давление, бар	6,5
— температура, К	323
Кислород газообразный:	
— объёмная производительность, м ³ /ч	16000
— объёмная доля кислорода, %	96
— давление на выходе из установки, бар	3
Азот газообразный низкого давления:	
— объёмная производительность, м ³ /ч	12000
— объёмная доля кислорода, %	0,02
— давление на выходе из установки, бар	1,1
Азот газообразный среднего давления:	
— объёмная производительность, м ³ /ч	6000
— объёмная доля кислорода, %	0,02
— давление на выходе из установки, бар	5
Азот жидкий:	
— массовая производительность, кг/ч	200
— объёмная доля кислорода, %	0,01
— давление на выходе из установки, бар	3,5
Кислород жидкий:	
— массовая производительность, кг/ч	200
— объёмная доля кислорода, %	99,5
— давление на выходе из установки, бар	3,5

Важной особенностью установки, влияющей на принятие технических решений, в том числе и на построение схемы, является получение значительного количества чистого газообразного азота, по объёму превышающего количество получаемого кислорода. При этом из требуемых 18000 нм³/ч азота 6000 нм³/ч должно выдаваться под давлением 5 бар, а остальное количество при низком давлении. Кроме основных продуктов, в небольших количествах требуется получать жидкие азот и технический кислород.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 7.

Воздух, сжатый в турбокомпрессоре ВК, поступает в воздушный двухсекционный скруббер 1, где охлаждается сначала в нижней секции оборотной водой, а затем в

верхней секции — водой, последовательно охлажденной в азотном скруббере 2 и в холодильных машинах ХМ.

Охлажденный до температуры 10-12 °С сжатый воздух поступает в один из двух попеременно работающих адсорберов 3-1 (3-2) блока комплексной очистки (БКО), в которых происходит глубокая его очистка от влаги, диоксида углерода, тяжёлых углеводородов.

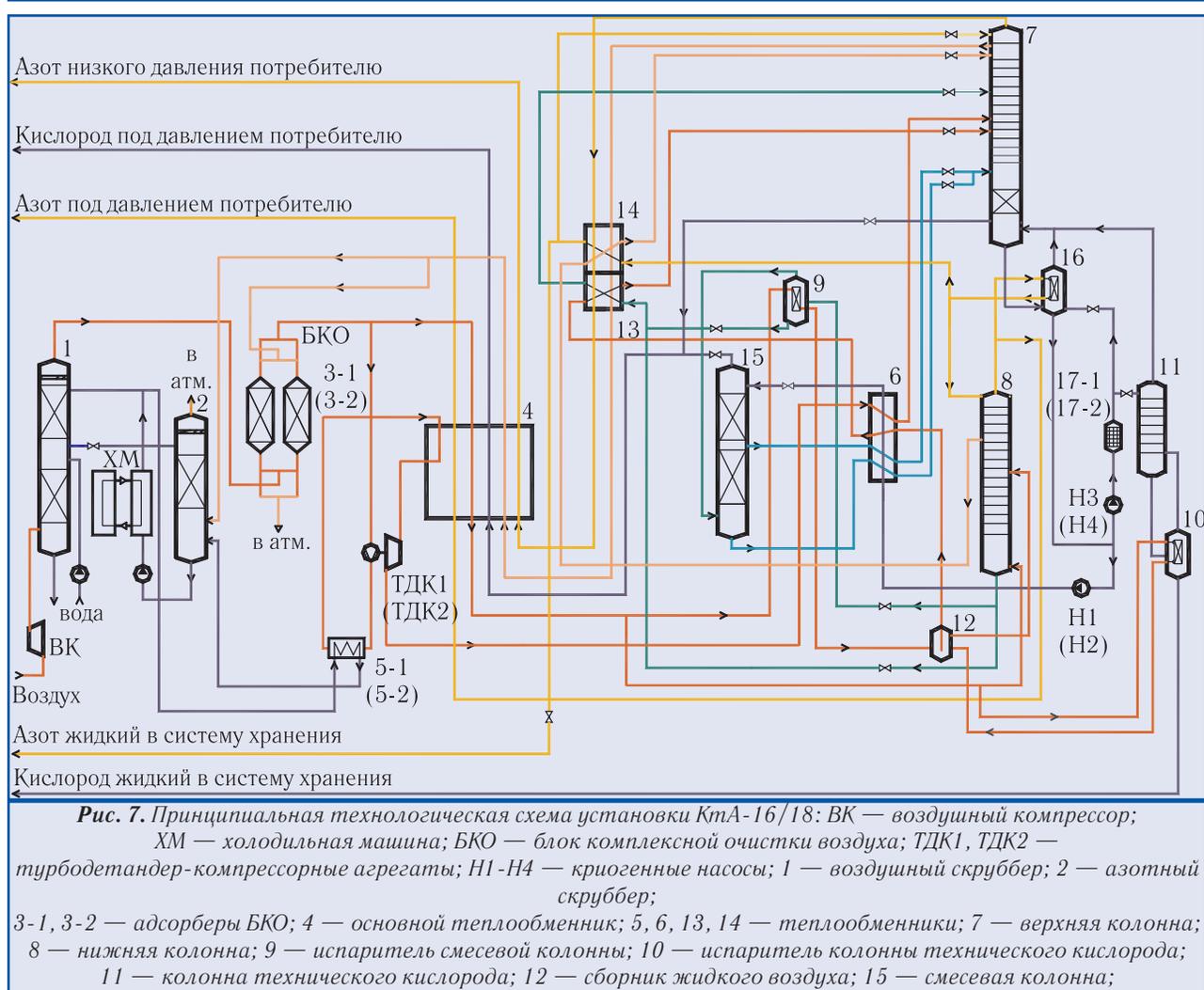
После очистки воздух разделяется на две части: большая — направляется на охлаждение в основной теплообменник 4, другая — предварительно дожимается в компрессорной ступени турбодетандер-компрессорного агрегата ТДК1 (ТДК2), охлаждается холодной водой в теплообменниках 5-1 (5-2) и также подаётся в основной теплообменник.

В основном теплообменнике весь воздух охлаждается в результате противоточного теплообмена с продуктами разделения: кислородом, азотом низкого давления, азотом под давлением и отбросным азотом. Воздух повышенного давления отбирается из средней части теплообменника 4 и направляется на расширение в детандерную ступень турбодетандер-компрессорного агрегата ТДК1 (ТДК2), после чего охлаждается переохлажденным жидким кислородом в теплообменнике 6 и вводится в среднюю часть верхней колонны 7. Основная часть воздуха после теплообменника 4 вводится в нижнюю колонну 8, другая — конденсируется в испарителе смесевой колонны 9 за счёт испарения части кубовой жидкости, а третья — конденсируется в испарителе 10 колонны технического кислорода 11. Сконденсированный воздух поступает в сборник 12, из которого частично подаётся на разделение в среднюю часть нижней колонны 8, а частично дросселируется в верхнюю колонну 7, предварительно охладившись последовательно в теплообменниках 6 и 13.

В нижней колонне 8 происходит предварительное разделение воздуха на азот (в верхней части) и кубовую жидкость. Кубовая жидкость дросселируется до давления ~3 бар в испаритель смесевой колонны 9. Пары кубовой жидкости из испарителя вводятся в куб смесевой колонны 15. Неиспарившаяся часть кубовой жидкости из испарителя 9 направляется в теплообменник 13, где переохлаждается потоками отбросного и чистого азота, поступающими из верхней колонны 7, и дросселируется затем в верхнюю колонну. Эта часть кубовой жидкости обеспечивает проточность испарителя 9 и безопасное ведение процесса.

Флегмовое орошение нижней и верхней колонн осуществляется за счёт части сконденсированного в основном конденсаторе 16 азота. Основным конденсатором является одновременно и испарителем жидкого кислорода для верхней колонны. Из основного конденсатора часть чистой азотной флегмы подаётся непосредственно на орошение нижней колонны, а другая — переохлаждается в теплообменнике 14 за счёт нагрева потоков чистого отбросного азота и дросселируется в верхнюю колонну. Часть переохлажденного жидкого азота после теплообменника АП315* выдаётся потребителю в виде продукта. Из нижней ко-

* На технологической схеме (см. рис. 7) не было возможности изобразить все её элементы и аппараты, как например, АП315.



лонны также отбирается грязная азотная флегма и чистый газообразный азот. Грязная азотная флегма охлаждается в теплообменнике 14 и дросселируется в верхнюю колонну, а чистый газообразный азот под давлением нижней колонны поступает в теплообменник 4, подогревается в нём за счёт теплообмена с воздухом и в качестве продукта выдается потребителю.

В верхней колонне 7 производится разделение воздуха на кислород и азот. Из неё выводятся жидкий технологический кислород (98-99 % O_2), чистый и отбросный азот. Чистый и отбросной азот предварительно подогреваются в теплообменниках 13 и 14 и поступают в основной теплообменник 4, где их подогрев ведётся до положительных температур. Чистый азот после основного теплообменника выдётся потребителю. Одна часть отбросного азота из теплообменника 4 направляется на регенерацию адсорбента в адсорберах БКО, а другая — поступает в азотный скруббер 2 на охлаждение воды и далее выбрасывается в атмосферу.

Жидкий технологический кислород из основного конденсатора 16 подаётся насосом Н1(Н2) на орошение смесевой колонны 15. Переохлаждение жидкого кислорода в результате повышения его давления частично используется в теплообменнике 6 для охлаждения детандерного потока, жидкого воздуха, а также жидкостных потоков, выводимых из смесевой колонны 15.

Жидкий кислород, стекая вниз в смесевой колонне, испаряется в процессе тепло- и массообмена с поднимающимся паром кубовой жидкости, в результате чего он обогащается кислородом. Газообразный технологический кислород (96 % O_2) отбирается из верхней части смесевой колонны 15, нагревается в основном теплообменнике 4 и выдётся потребителю под давлением.

Для предотвращения накапливания взрывоопасных примесей в жидком кислороде, кипящем в основном конденсаторе 16, организована циркуляция жидкого кислорода через адсорбер 17-1(17-2) с помощью насоса Н3(Н4). Часть жидкого технологического кислорода после адсорбера направляется на дальнейшее концентрирование в колонну технического кислорода 11. Из конденсатора колонны технического кислорода 10 жидкий технический кислород выдётся потребителю.

4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОМПЛЕКТАЦИИ УСТАНОВКИ КТА-16/18

Установка укомплектована оборудованием, преимущественно произведённым в ОАО «Криогенмаш». Другая его часть, а также некоторые материалы изготовлены специализированными российскими и зарубежными компаниями по нашим технологическим заданиям.

Так, в системе предварительного охлаждения применены двухсекционный воздушный и односекционный азотный скрубберы (на переднем плане фото 5) с контактными элементами, представляющими собой структурированную насадку из нержавеющей стали компании «Sulzer» (Швейцария). В этой же системе применены водяные насосы «Grundfos» (Дания) и холодильные машины компании «Остров индастри» (Россия), укомплектованные винтовыми компрессорами «Bitzer» (Германия), работающими на озоноразрушающем хладагенте (фото 8).

В адсорберах блока комплексной очистки (фото 9) применены высокоэффективные адсорбенты: активный оксид алюминия АО-К (АО-С) и синтетический цеолит (NaX).



Фото 8. Холодильная машина системы предварительного охлаждения перерабатываемого воздуха



Фото 9. Блок комплексной очистки воздуха

Основной теплообменник, переохладитель, подогреватель и пакеты конденсаторов-испарителей — все пластинчато-ребристого типа произведены фирмой «Chart Heat Exchangers» (США).

Для выработки холода, необходимого для компенсации его потерь и теплопритоков из окружающей среды, на предприятии разработаны высокоэффективные турбодетандер-компрессорные агрегаты с использованием энергии расширения воздуха в детандерных ступенях агрегатов для привода их компрессорных ступеней (фото 10). Изоэнтروпные КПД детандерных ступеней в этих агрегатах достигают 85 %.

В блоке разделения всё внутриблочное оборудование выполнено из нержавеющей стали и алюминии-

вых сплавов, что позволяет гарантировать его работоспособность без капитальных ремонтов и выгрузки изоляции в течение всего срока службы (20 лет).



Фото 10. Турбодетандер-компрессорные агрегаты

Высокой эффективности установки способствовало также использование в смесевой колонне и в нижней части верхней колонны структурированной насадки типа Mellapak-752Y компании «Sulzer». Такая насадка в сравнении с барботажными ситчатыми тарелками позволяет минимизировать гидравлические потери в потоках производственного кислорода и контуре циркуляции жидкого кислорода между верхней и смесевой колоннами.

В установке имеются также две пары криогенных центробежных насосов российской фирмы «Контех-Крио».

Установка оснащена автоматизированной системой контроля и управления, созданной на базе технических и программных средств фирмы Rockwell Automation /Allen Bradley (США) (фото 11).

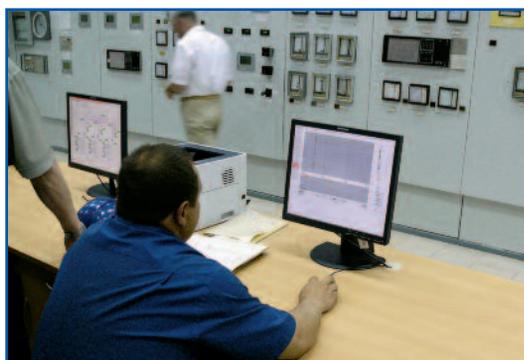


Фото 11. Новая операторская станция

5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СОПОСТАВЛЕНИЕ УСТАНОВОК РАЗНЫХ ТИПОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КИСЛОРОДА

Естественно, что эффективность современных установок разделения воздуха существенно выше тех, на смену которым они приходят. В сравнении с ранее работающими установками, новая современная, даже будучи построенной по тому же криогенному циклу с вы-

Таблица 2. Расчётные технико-экономические показатели различных типов установок технологического кислорода

Показатели	тип А	тип В	тип С
1. Перерабатываемых воздух (6 бар, абс.), $\text{нм}^3/\text{ч}$	77000	91000	81000
2. Производимые продукты, $\text{нм}^3/\text{ч}$:			
– кислород газ. (96 %, 3 бар)	16000	16000	16000
– кислород жидкий (99,5 %)	120	120	120
– азот газ. среднего давления (5 бар)	6000	6000	6000
– азот газ. низкого давления	12000	12000	12000
– азот жидкий	175	175	175
3. Потребляемая мощность, кВт	6860	7135	6370
4. Удельный расход энергии на производство кислорода, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3$ (%)	0,425 (100)	0,442 (104)	0,375 (93)

дачей кислорода низкого давления, будет потреблять энергии меньше на 20-25 %. При этом и кислород в ней будет производиться с лучшими параметрами (сухой, с содержанием его на уровне 96 % вместо 95 %).

Ещё более важно определить степень совершенства внедренной установки КтА-16/18 в сопоставлении её с возможными современными аналогами.

В качестве таких расчётных аналогов будет рассматриваться набор технико-экономических показателей трёх типов установок для получения технологического кислорода:

- тип А — традиционная установка низкого давления с кислородным компрессором;
- тип В — установка, реализующая схему с вводом воздуха в смесевую колонну;
- тип С — установка типа КтА-16/18, в которой используется схема с вводом в смесевую колонну паров кубовой жидкости.

Результаты расчётного технико-экономического сопоставления показывают, что при одной и той же производительности по продуктам разделения воздуха установки типа КтА-16/18 менее энергоёмки: на 7 % в сравнении с традиционными установками, в которых сжатие кислорода осуществляется в компрессорах, и на 11 % в сравнении с аналогами зарубежных фирм, приведёнными в табл. 2. В сравнении же с выведенными из эксплуатации установками экономия составляет 25-30 %. Следует учитывать, что подобное сопоставление с зарубежными аналогами корректно только в диапазоне давлений производственного кислорода до 4 бар.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введённая в эксплуатацию воздухоразделительная установка нового поколения КтА-16/18 производит в качестве основных продуктов кислород и азот под требуемыми давлениями без использования

компрессоров для их сжатия. В процессе пусконаладочных испытаний установка показала полное соответствие заявленным техническим характеристикам.

Установка КтА-16/18 создана ОАО «Криогенмаш» с использованием самых современных схемных и конструкторских решений, в том числе и ряда оригинальных собственных разработок.

Введённая в эксплуатацию установка исключительно надёжна, она рассчитана на срок службы 20 лет без проведения капитальных ремонтов и выгрузки изоляции из криогенного блока разделения воздуха.

Замена морально и физически изношенных установок предыдущих поколений на новую эффективную установку КтА-16/18 позволяет снизить на 25-30 % потребляемую электроэнергию, расходуемую на выработку кислорода и азота.

В ближайшее время ожидается ввод в эксплуатацию ещё двух ВРУ подобного типа: Ктд-24 на Среднеуральском медеплавильном заводе (г. Ревда, РФ) и Ктд-15 в АО «Казцинк» (г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан).

ЛИТЕРАТУРА

1. Криогенные системы. В 2-х т. Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем/ **А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др.** — М.: Машиностроение, 1999. — 720 с.
2. **Лавренченко Г.К.** Презентация новой криогенной воздухоразделительной установки на предприятии цветной металлургии// Технические газы. — 2006. — № 1 — С. 34-39.
3. **Скородумов Б.А., Карпов В.Н., Писарев Ю.Г.** Воздухоразделительные установки нового поколения// Технические газы. — 2002. — № 4. — С. 23-30.
4. Первая ВРУ с внутренним сжатием продуктов российского производства создана ОАО «Криогенмаш»/ www.cryogenmach.ru.
5. Patent 4022030 USA. Thermal cycle for the compression of a fluid by the expansion of another fluid.
6. ОАО «Криогенмаш» провёл презентацию ВРУ КтА-16/18/ www.cryogenmach.ru.
7. Торжественная сдача в эксплуатацию новой установки разделения воздуха/ www.azot.lg.ua.