

**А.А. Леонтьев, А.Д. Бровко**

ПКФ «Криопром», а/я 99, г. Одесса, Украина, 65026

e-mail: krionika@mail.css.od.ua

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖИДКОСТНЫХ ВРУ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИХ СОЗДАНИИ ИЛИ МОДЕРНИЗАЦИИ

*Воздухоразделительные установки (ВРУ), работающие по термодинамическому циклу среднего давления, широко используются на многочисленных предприятиях для производства кислорода или азота. Повышение их экономичности и надёжности представляет собой актуальную проблему. Сообщается о создании нового поколения ВРУ. Используемые в них новые схемы, конструкции и оборудование позволяют решать указанную проблему. В результате созданы высокоэффективные ВРУ для получения жидких криопродуктов. Опыт разработки таких ВРУ с успехом применяется также при модернизации существующих установок.*

**Ключевые слова:** *Воздухоразделительная установка. Жидкие кислород и азот. Экономичность. Надёжность. Модернизация.*

**А.А. Leontyev, A.D. Brovko**

## LIQUID AVERAGE PRESSURE ASP PROGRESS IN THEIR CREATION OR MODERNIZATION

*Air separation plants (ASP), working in thermodynamic cycle of average pressure, are widely used at numerous enterprises of oxygen and nitrogen production. The increase of their efficiency and safety is an actual problem. It is informed about the creation of new generation of ASP. The new schemes, constructions and equipment used in them make it possible to solve this problem. As the result, high-effective ASP for production of liquid cryoproducs have been created. The developing experience of such ASP is successfully used in the modernization of the exist plants.*

**Keywords:** *Air separation plant. Liquid oxygen and nitrogen. Efficiency. Safety. Modernization.*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Воздухоразделительные установки (ВРУ) средней производительности (с расходом перерабатываемого воздуха от 1000 до 10000 м<sup>3</sup>/ч) имеют широкую сферу применения в химической и нефтехимической промышленности, стекольном, целлюлозно-бумажном производствах, строительной и др. отраслях.

Традиционно ВРУ средней производительности строятся по циклам высокого и среднего давлений, особенно в случае создания установок, предназначенных для получения жидких продуктов разделения. Это обусловлено их высокой термодинамической эффективностью, которая обеспечивает возможность практически полного извлечения кислорода в жидком виде в установках высокого давления и 65 %-го его извлечения в установках среднего давления при относительно низких удельных затратах электроэнергии [1]. Такие установки характеризуются высокой компактностью (минимальными размерами необходимого производственного помещения), малыми сроками монтажных и пусконаладочных работ, быстрым вво-

дом их в рабочий режим, простотой технического обслуживания. Практически все установки среднего и высокого давлений могут производить газообразный кислород высокого давления при полном объёме его извлечения из воздуха с низкими показателями удельных затрат электроэнергии.

В связи с ростом потребления продуктов разделения воздуха (ПРВ) в жидком виде актуальными проблемами являются поиск и реализация путей совершенствования как вновь создаваемых ВРУ, так и реконструируемых действующих установок.

Остановимся на основных аспектах изготовления и эксплуатационных характеристиках жидкостных установок среднего давления.

### 2. АНАЛИЗ СИТУАЦИИ

При создании жидкостных установок среднего давления предприятие учитывает энергетическую эффективность производства жидких ПРВ и сложившуюся ситуацию на рынке спроса на ВРУ малой и средней производительности.

В настоящее время в эксплуатации или в состоянии консервации находятся несколько тысяч установок среднего давления, изготовленных в конце прошлого века. К ним можно отнести, прежде всего, такие ВРУ, как К-0,15, АК-0,6, К-0,25; КА-0,2, К-0,4, АК-1,5, К-0,5; КА-0,45. При создании этих ВРУ ориентировались на производство газообразных продуктов разделения с возможностью получения также и жидких кислорода и азота. Однако выработка в них жидких продуктов была небольшой и поэтому экономически невыгодной. Нами были изучены возможности повышения эффективности производства жидких продуктов за счёт внесения изменений в схемы установок и их комплектацию. Полученные результаты реализовали при проектировании и изготовлении новых ВРУ среднего давления: ККж-0,15; ККж-0,25; КжК-0,4; КжК-0,5 [2]. Для оценки экономической эффективности ВРУ среднего давления нового поколения и старых установок сравним их основные технические показатели при работе в жидкостных режимах, которые приведены в табл. 1.

Анализ данных табл. 1 показывает, что себестоимость жидких ПРВ при получении их в старых установках оказывается достаточно высокой, так как затраты на электроэнергию составляют обычно 60...70 % себестоимости.

Помимо этого, в последнее время происходит укрупнение многих промышленных предприятий и создание на их основе большого количества новых, более мелких производств — потребителей ПРВ. Использование установок типа К-0,1, К-0,15, АК-0,6, К-0,25, КА-0,2 в случаях малого и неравномерного или некруглосуточного потребления кислорода и азота становится экономически нецелесообразным и не выдерживает конкуренции по сравнению с создаваемыми газификационными станциями, работающими на привозных жидких кислороде и азоте. Станции такого типа обычно работают в одну или две смены и характеризуются относительно малыми капитальными вложениями при их создании, незначительными эксплуатационными затратами (небольшое потребление электроэнергии; минимальная численность обслуживающего персонала и занимаемая производственная площадь, отсутствие постоянной потребности в охлаждающей воде). Станции формируются воз-

ле многих мелких потребителей газообразного кислорода и способны с высоким экономическим эффектом обеспечивать этих заказчиков. В связи с общим растущим спросом на кислород, азот возникли коммерческие структуры, которые приобретают эти компоненты в жидком виде для снабжения газом конечных потребителей посредством газораскачивающих пунктов.

Для крупных организаций, занимающихся такой деятельностью, а также для предприятий, которые могут обеспечивать не только собственное производство кислородом и азотом, но и успешно заниматься коммерческой деятельностью по продаже жидких ПРВ, предназначены новые жидкостные ВРУ среднего давления, изготавливаемые нашим предприятием.

Рассмотрим особенности ВРУ нового поколения КжК-0,5, работающей по термодинамическому циклу среднего давления.

### 3. УСТАНОВКА СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ КжК-0,5

При проектировании и производстве жидкостных установок среднего давления нами основное внимание уделяется:

- созданию безопасных и удобных условий эксплуатации;
- удовлетворению индивидуальных потребностей заказчика в ПРВ;
- достижению минимально возможных энергетических затрат при получении ПРВ;
- созданию комплексной системы автоматизации и управления технологическими процессами;
- комплектации установок современными необходимыми покупными изделиями и оборудованием;
- блочному принципу изготовления оборудования.

Установкой среднего давления, которая наиболее полно отвечает вышеуказанным требованиям, является ВРУ типа КжК-0,5.

За период 2005-2008 гг. были изготовлены и введены в эксплуатацию установки типа КжК-0,5 на следующих предприятиях:

- ОАО «Монди Бизнес Пейпа Сыктывкарский ЛПК» (Россия) — 2 шт. [3];
- ООО «Гамма» (г. Стерлитамак, Россия);
- ПО «Краян» (г. Одесса Украина);

Таблица 1. Сравнение показателей ВРУ среднего давления

Типы ВРУ среднего давления	Производительность установки			Требуемая мощность для производства жидких криопродуктов, кВт	Удельный расход электроэнергии на производство LO <sub>2</sub> , кВт·ч/кг
	LO <sub>2</sub> , кг/ч	LN <sub>2</sub> , кг/ч	GO <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /ч		
К-0,15	70	60	160	215	3,10
ККж-0,15	115	110	160	230	2,00
К-0,25	110	100	250	320	2,90
ККж-0,25	180	165	270	350	1,94
К-0,4	200	180	450	600	3,00
КжК-0,4	370	350	450	650	1,76
К-0,5	300	280	530	640	2,13
КжК-0,5	550	600	570	670	1,22

Примечание: LO<sub>2</sub>, LN<sub>2</sub> — жидкие кислород и азот; GO<sub>2</sub> — газообразный кислород.

- ОАО «Полтавский завод медицинского стекла» (Украина);
- ФКП «НИЦ РКП» (ФГУП «НИИХИММАШ») (г. Пересвет Московской обл., РФ);
- IM «SPICA VZI» SRL (г. Кишинев Молдова).

В 2009 г. производилась поставка оборудования таких установок на ОАО «Кременчугский сталелитейный завод» (г. Кременчуг Украина) и ФКП «НИЦ РКП».

Воздухоразделительная установка КжК-0,5 предназначена для производства жидкого и газообразного технического кислорода, а также жидкого азота. Работа установки возможна в шести режимах:

1. Производство жидкого технического кислорода I-го сорта.
2. Производство газообразного технического кислорода I-го сорта под давлением до 200 кгс/см<sup>2</sup>.
3. Производство жидкого кислорода с подачей его в холодный газификатор.
4. Производство жидкого азота.
5. Одновременное производство кислорода в газообразном и жидком состояниях.
6. Одновременное производство газообразного кислорода под давлением и жидкого азота

При наличии шести режимов можно гибко получать кислород в различных агрегатных состояниях с производством также и жидкого азота. Необходимая чистота жидкого азота согласовывается с заказчиком, так как она определяет количество тарелок в нижней колонне и высоту блока разделения.

Технические характеристики установки приведены в табл. 2 и подтверждаются данными, полученными при постоянных замерах параметров на кислородной станции предприятия.

Указанная производительность ВРУ КжК-0,5 при получении жидких ПРВ достигнута в результате:

- применения в технологической схеме низко-

температурного холодильного агрегата для дополнительного охлаждения воздуха на температурном уровне –33...–35 °С;

- максимального увеличения доли детандерного воздуха на достаточно высоком температурном уровне (для ВРУ среднего давления — 188...190 К);

- использования турбодетандера с изэнтропным КПД 0,73...0,76 при числе оборотов 90...95 тыс. мин<sup>-1</sup>;

- эффективной работы основного теплообменника с развитой поверхностью теплообмена (среднее значение недорекуперации на тёплом конце основного теплообменника в жидкостных режимах составляет 3 град.).

В установке КжК-0,5 нам удалось максимально приблизиться к эффективности производства жидких ПРВ, которая характерна для установок высокого давления: расход на производство 1 кг жидкого кислорода составляет 1,22 кВт·ч, производство 1 кг жидкого азота — 1,12 кВт·ч.

Для сравнения укажем, что в ВРУ высокого давления удаётся достичь затрат на 1 кг жидкого кислорода: в установке КжКАж-0,25 — 1,32 кВт·ч/кг; КжК-2,0 — 0,96 кВт·ч/кг.

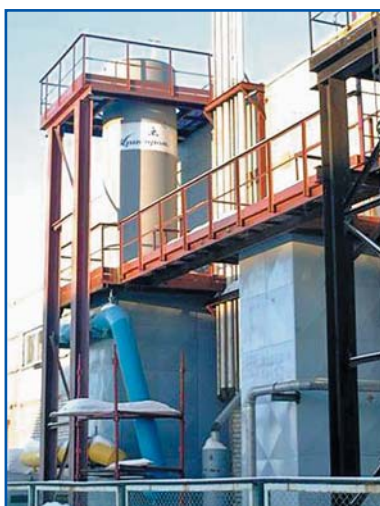
ВРУ КжК-0,5 комплектуется воздушным поршневым компрессором нового поколения 4ВМ10-55/71Н производства ОАО «Сумское машиностроительное НПО им. Фрунзе» (Украина). Используемые холодильные машины выполнены на базе импортных комплектующих и компрессоров фирм «Bitzer» и «Воск» (Германия).

Блок разделения и блок очистки (фото 1), а также станция смазки турбодетандерного агрегата имеют полную заводскую готовность, что позволяет существенно сократить сроки монтажных и пусконаладочных работ. Поставка оборудования установки производит-

**Таблица 2. Технические характеристики установки КжК-0,5**

Наименование параметра	Значения параметров в соответствующих режимах					
	1-ый режим	2-ой режим	3-ий режим	4-ый режим	5-ый режим	6-ой режим
1. Количество перерабатываемого воздуха, м <sup>3</sup> /ч	3360					
2. Массовая (объёмная) производительность:						
– кислород жидкий, кг/ч	550	—	—	—	300	—
– кислород газообразный, м <sup>3</sup> /ч	—	570	—	—	300	350
– кислород жидкий в газификатор, кг/ч	—	—	500	—	—	—
– азот жидкий, кг/ч	—	—	—	570	—	250
3. Чистота продуктов разделения, % об. О <sub>2</sub> :						
– кислород жидкий и газообразный I-го сорта	99,7	99,7	99,7		99,7	99,7
– азот жидкий	—	—	—	1...0,0001	—	1...0,0001
4. Давления продуктов разделения, кгс/см <sup>2</sup> :						
– кислород жидкий, не менее	0,4	—	25	—	—	—
– кислород газообразный, не более	—	200	—	—	200	200
– азот жидкий, не менее	—	—	—	4	—	—
5. Потребляемая мощность, кВт	670	560	685	670	630	630
6. Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч	125					
7. Выход на рабочий режим, ч:						
– при пуске из теплого состояния				6		
– при пуске из холодного состояния				1		

ся в течение 7-8 мес., срок ввода установки в эксплуатацию обычно составляет 12-14 мес. от начала действия контракта.



**Фото 1.** Расположение блоков разделения и очистки воздуха установки на ОАО «Монди Бизнес Пейпа Сыктывкарский ЛПК»



**Фото 2.** Передняя панель блока разделения с арматурой и пневмоцилиндрами

Система автоматизации и управления установкой выполнена на базе программируемого контроллера Simatic S7-314C в комплекте с модулями ввода-вывода производства фирмы «Siemens», персонального компьютера под управлением операционной системы Windows XP и платы коммуникационного процессора CP5611, установленного в компьютере. Коммуникационный процессор обеспечивает обмен данными между контроллером и компьютером. Программа для контроллера разработана на основе лицензионной версии программы Step7 («Siemens»).

Программа для компьютера создана на базе оригинальной версии SCAD с использованием библиотеки Prosave MPI 6.0 («Siemens»).

Система автоматизации обеспечивает следующие

возможности:

- сбор информации о работе оборудования;
- визуализацию параметров работы установки в виде значений и графиков;
- ведение архивов параметров работы установки;
- отслеживание аварийных ситуаций работы установки;
- автоматическое и дистанционное управление узлами установки;
- выдачу информации о работе установки на экран либо печать.

В качестве приводов управляемой запорной и регулирующей арматуры используются пневмоцилиндры фирмы «Camozzi S.P.A.» (Италия), показанные на фото 2.

#### 4. МОДЕРНИЗАЦИЯ ВРУ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ

Находящиеся в эксплуатации многие ВРУ среднего давления характеризуются не только моральным и физическим износом, но и низкой эффективностью, что требует замены их новыми современными установками.

Однако решать возникшую проблему только за счёт вывода из эксплуатации старых установок и последующей их замены на новые невозможно, так как это требует значительных инвестиций. Кроме этого такие действия могут привести к нарушению производственных процессов, в которых применяются продукты разделения воздуха. В данной ситуации наиболее рациональный вариант — это совмещение двух направлений: внедрение в эксплуатацию новых ВРУ; проведение реконструкции с одновременной модернизацией существующих установок, имеющих ещё запас надёжности и удовлетворительное состояние.

В связи с этим важным аспектом при организации производства установок среднего давления является унификация их схемных и конструкторских решений. Такой подход позволит создавать эффективные производства жидких ПРВ на основе новых установок и одновременно осуществлять модернизацию существующих производств, которые будут совместимы с вновь создаваемыми.

Большое значение при проведении модернизации существующих установок имеет решение проблемы приведения в соответствие номенклатуры получаемых ПРВ с технологическими потребностями действующего производства.

Примером реализации таких технических решений модернизации ВРУ являются проведённые за последний год работы на ООО «Техгазсервис» (г. Пенза, Россия) и ОАО «Краситель» (г. Рубежное, Украина).

Кислородная станция ООО «Техгазсервис» была укомплектована четырьмя установками К-0,4. Сложившаяся на сегодняшнее время производственная ситуация позволяет удовлетворить постоянную потребность технологических процессов в газообразном кислороде работой одной установки. Остальные уста-

**Таблица 3.** Технические характеристики установки АК-1,5 до и после модернизации

Технические показатели	ВРУ АК-1,5	ВРУ АК-1,5М
Количество перерабатываемого воздуха, м <sup>3</sup> /ч	2600	2600
Производительность по газообразному азоту низкого давления, м <sup>3</sup> /ч	1650	350
Производительность по газообразному кислороду высокого давления, м <sup>3</sup> /ч	240	—
Производительность по газообразному азоту высокого давления, м <sup>3</sup> /ч	—	150
Производительность по жидкому кислороду, кг/ч	180	350
Производительность по жидкому азоту, кг/ч	110	330
Давление газообразного азота (избыт.), кгс/см <sup>2</sup>	0,1	5,0
Давление газообразного азота после насоса, кгс/см <sup>2</sup>	—	150
Потребляемая электроэнергия (при производстве жидких ПРВ), кВт	600	640
Затраты на производство 1 кг жидкого О <sub>2</sub>	3,33	1,83
Затраты на производство 1 кг жидкого N <sub>2</sub>	5,45	1,94

новки, находящиеся в рабочем состоянии либо использовались в коммерческих целях, либо простаивали. Для осуществления более успешной коммерческой деятельности была проведена модернизация одной из установок К-0,4, которая заключалась в переводе её на эффективное производство жидкого кислорода и получение жидкого азота особой чистоты. С этой целью было применено схемное и техническое решение, реализованное в установке КжК-0,5, а также проведена полная замена блока разделения с увеличением числа тарелок в нижней колонне, добавлено необходимое холодильное оборудование. Существенное изменение технических показателей после модернизации можно установить из данных табл. 1, проводя сравнение К-0,4 с ВРУ КжК-0,4.

Модернизация с приведением в соответствие номенклатуры получаемых ПРВ к технологическим потребностям основного производства с одновременным увеличением выработки жидкого кислорода и азота была реализована в текущем году на ОАО «Краситель». На предприятии за последнее время значительно уменьшилось потребление газообразного азота в связи с сокращением номенклатуры выпускаемой продукции. Но промышленный регион, в котором расположен ОАО «Краситель», имеет ёмкий рынок для сбыта жидкого кислорода. Модернизация была осуществлена на одной из четырёх имеющихся установок. В ВРУ АК-1,5 были внесены схемные изменения с заменой основных теплообменников и комплектацией установки дополнительным холодильным и теплообменным внеблочным оборудованием. В результате модернизации увеличилась выдача жидкого кислорода с одновременным производством газообразного азота под давлением 5 кгс/см<sup>2</sup> или 150 кгс/см<sup>2</sup>. Производство необходимого количества газообразного азота с указанными давлениями было оговорено в техническом задании заказчика.

Технические характеристики установки АК-1,5 до модернизации и после её завершения приведены в табл. 3. Модернизированная установка стала обозначаться как АК-1,5М.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вновь создаваемые ВРУ, работающие по циклу

среднего давления, имеют высокую термодинамическую эффективность при производстве жидкого кислорода или азота. По своим характеристикам они вполне могут заменять действующие устаревшие установки аналогичной производительности. При размещении оборудования установки не требуется увеличения производственных площадей. Установки имеют высокую степень заводской готовности. В сложившейся ситуации с потреблением ПРВ целесообразно их применение в коммерческих целях, так как им характерен небольшой срок окупаемости (3-4 года).

Недостаток ВРУ среднего давления — использование в них воздушных поршневых многоступенчатых компрессоров, имеющих меньшую надёжность по сравнению с винтовыми или центробежными машинами.

Однако в значительной степени эти недостатки стали компенсироваться за счёт перехода на комплектацию установок среднего давления поршневыми компрессорами нового поколения производства ОАО «Сумское машиностроительное НПО им. Фрунзе». Такие воздушные компрессорные установки как 4ВМ10-55/71 и 2ВМ10-27/71 позволяют полностью заменить компрессорную базу старых модификаций при создании установок средней производительности [4].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. Технология и оборудование. В 2-ух томах. Под ред. **В.И. Епифановой и Л.С. Аксельрода**. Т.1. Термодинамические основы разделения воздуха, схемы и аппараты воздуходелительных установок. — М.: Машиностроение, 1973. — 468 с.
2. **Горенштейн И.В., Лавренченко Г.К.** Анализ способов увеличения выхода жидких продуктов в воздуходелительных установках среднего давления// Технические газы. — 2003. — № 3. — С. 33-37.
3. **Сандаков М.Г., Момотов В.Г.** Автоматизированная воздуходелительная установка КжК-0,45 нового поколения// Технические газы. — 2006. — № 1. — С. 67-72.
4. **Гринь Н.П., Наталуха Ю.Б., Смирнов А.В.** Поршневые воздушные компрессорные машины нового поколения для ВРУ, реализующие циклы среднего и высокого давлений// Технические газы. — 2009. — № 6. — С. 26-30.