

УДК 621.59.031

А.В. Кортиков

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

e-mail: kortikov@cryogenmash.ru

ПУСКОВОЙ РЕЖИМ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК С УЗЛОМ ПОЛУЧЕНИЯ АРГОНА

Рассмотрен пусковой режим колонны технического аргона в составе воздухоразделительной установки (ВРУ). Представлены результаты расчета ректификации аргона в широком диапазоне параметров. Проведен анализ режима накопления аргона в жидкости, находящейся в колонне технического аргона. Для типичных параметров узлов ректификации аргона представлена зависимость длительности пускового периода от содержания аргона в газообразной аргонной фракции, проведено сравнение с фактическими показателями действующих ВРУ. Рекомендован диапазон состава газообразной фракции для пускового режима колонны технического аргона, при котором возможно получение технического кислорода проектной чистоты.

Ключевые слова: Аргон. Колонна технического аргона. Пусковой режим. Накопление. Газообразная аргонная фракция.

A.V. Kortikov

STARTING CONDITIONS OF AIR SEPARATION PLANTS PROVIDED WITH ARGON PRODUCTION UNIT

The starting conditions of the technical argon column included in the air separation plant (ASP) is described. The results of calculation of argon rectification over a wide range of parameters are presented. The conditions of argon accumulation in the liquid inside the technical argon column have been analyzed. Starting period duration — gaseous argon fraction argon content relationship for standard parameters of argon rectification units is shown, the comparison with actual data of operational ASPs is made. Recommended is the range of gaseous fraction composition for the technical argon column starting period, wherein the technical oxygen of the designed purity can be produced.

Keywords: Argon. Technical argon column. Starting conditions. Accumulation. Gaseous argon fraction.

1. ВВЕДЕНИЕ

Весь аргон, производимый в мире в промышленных масштабах за исключением единичных установок разделения продувочных газов агрегатов синтеза аммиака, получают методом низкотемпературной ректификации воздуха [1]. ОАО «Криогенмаш» разработал и поставил заказчикам первые крупные воздухоразделительные установки с получением аргона типа КАр-30 в семидесятых годах прошлого века.

До 90-х годов схема получения аргона на ВРУ была следующей: из верхней колонны отбиралась газообразная аргонная фракция, которая направлялась в колонну сырого аргона. В ней получали сырой аргон с содержанием кислорода в диапазоне 2..4 % и азота около 1 %, который для удаления кислорода выводили из ВРУ в блок каталитической очистки с предварительным добавлением водорода и после осушки воз-

вращали в ВРУ в колонну чистого аргона, в которой производили удаление азота и остатков водорода.

Развитие техники разделения воздуха, разработка эффективной структурированной насадки с низким гидравлическим сопротивлением позволили исключить водородную технологию очистки сырого аргона от кислорода и производить чистый аргон полностью способом низкотемпературной ректификации.

Для получения аргона с содержанием кислорода 2 ppm колонна технического аргона (КТА) должна обеспечивать эффективность разделения, соответствующую не менее 160 теоретическим тарелам. Необходимость столь большого числа тарелок заключается в том, что коэффициент относительной летучести аргона в смеси аргон-кислород близок к единице, особенно в смесях с низким содержанием кислорода. Например, для смесей с содержанием кислорода менее 2 % коэффициент относительной летучести арго-

на меньше 1,12. Поэтому фактическая высота насадки в аргоновых колоннах современных ВРУ может превышать 40 м, а суммарная высота аргоновых колонн — составлять 50 м и более. Колонна очистки технического аргона от азота при этом сохраняется и имеет гораздо меньшие габариты.

2. ПУСКОВОЙ РЕЖИМ ВРУ

При наличии узла ректификации аргона в современной ВРУ значительно возрастают массогабаритные параметры холодного блока, а также увеличивается длительность пускового периода.

Пуск ВРУ из теплого состояния — ответственный и довольно продолжительный период работы установки, в течение которого происходит охлаждение оборудования холодного блока, накопление жидкости в аппаратах и достижение стационарного поля концентраций на массообменных устройствах ректификационных колонн — тарелках или насадке. Пусковой период заканчивается после выхода на стабильный режим получения продуктов разделения воздуха с параметрами чистоты, расхода и давления, соответствующими проектным значениям.

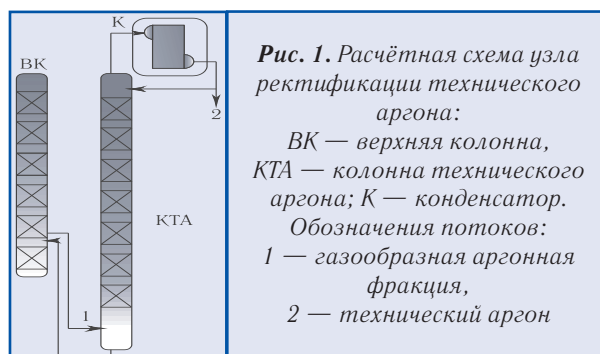
С экономической точки зрения продолжительность пускового периода необходимо минимизировать, однако наличие в ВРУ узла ректификации аргона приводит к удлинению пускового периода. Во-первых, увеличивается время на охлаждение дополнительного оборудования, так как масса аппаратов узла ректификации аргона составляет в среднем 40 % от общей массы узла ректификации. Во-вторых, — и это гораздо существенней, — наличие огромной поверхности насадки, вместе с дополнительными коллекторными и распределительными устройствами, приводит к значительному объёму жидкости, находящейся в колонне технического аргона.

В стационарном режиме получения технического аргона с содержанием кислорода на уровне 2 ppm аргон занимает примерно 89 % объема жидкости, находящейся в колонне технического аргона. С учётом малого содержания аргона в воздухе для его накопления и концентрирования в жидкости, необходимой для нормальной работы КТА, требуется дополнительное время, иногда превышающее время пускового периода установок без получения аргона.

3. РЕКТИФИКАЦИЯ АРГОНА

Перед тем как приступить к анализу собственно пускового режима узла получения аргона, следует рассмотреть особенности стационарного процесса ректификации в колонне технического аргона. По своей сути она является обычной укрепляющей колонной, к которой применимы общие выводы, в частности, касающиеся минимального флегмового числа и области граничных или постоянных концентраций [2]. Для численного анализа параметров работы КТА была использована стандартная схема установки двукратной ректификации воздуха с узлом ректификации

аргона. Переменными параметрами служили содержание аргона в газообразной аргонной фракции и величина отбора верхнего продукта колонны технического аргона. На рис. 1 представлена схема, использованная для расчётного анализа.



Результаты расчёта, представленные в форме зависимости содержания кислорода в техническом аргоне от величины его отбора (рис. 2), показывают схожий характер кривых для различных составов газообразной аргонной фракции. При отборе технического аргона, обеспечивающем флегмовое число не ниже минимального, содержание кислорода в техническом аргоне меняется незначительно в диапазоне нескольких ppm (нижние пологие ветви кривых). При увеличении отбора выше предельного значения, соответствующего минимальному флегмовому числу, которое зависит от состава газообразной аргонной фракции, происходит резкое, в сотни раз, увеличение содержания кислорода в техническом аргоне. На рис. 2 этот переходный режим соответствует круто восходящим частям кривых. Дальнейшее увеличение отбора приводит к росту содержания кислорода в верхнем продукте колонны технического аргона с гораздо меньшей скоростью (верхние пологие участки кривых), а содержание кислорода в верхнем продукте достигает нескольких десятков процентов.

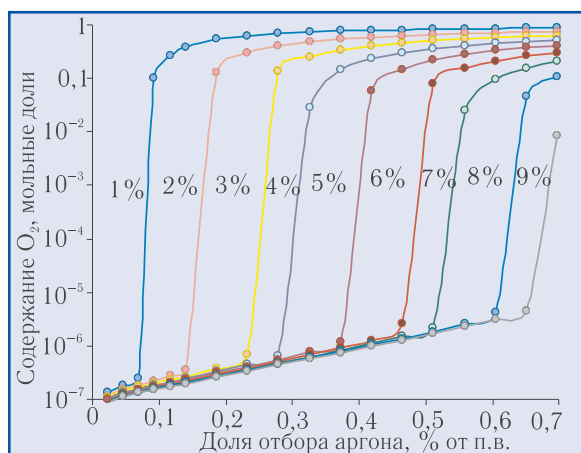


Рис. 2. Зависимость содержания кислорода в верхнем продукте КТА от величины его отбора в процентах от перерабатываемого воздуха (п.в.). Цифры на кривых соответствуют содержанию аргона в газообразной аргонной фракции

Переход с нижних пологих участков кривых (см. рис. 2) на верхние означает кардинальную перестройку поля концентраций в колонне технического аргона. В режимах, соответствующих нижним частям кривых, работает вся колонна, при этом концентрации пара и жидкости меняются от нижней до верхней тарелки. Верхние части кривых соответствуют совершенно другой картине — нижняя часть колонны находится в зоне постоянных концентраций, когда составы жидкости и пара при переходе от тарелки к тарелке не меняются и близки к составу газообразной аргоновой фракции на входе в колонну, а все изменение концентраций сосредоточено в верхней части колонны.

Режим стационарной работы КТА в проектом режиме соответствует нижней пологой части кривых на рис. 2. Обычно расчетное содержание аргона в газообразной аргоновой фракции лежит в диапазоне 8...11 %, а число тарелок рассчитывается исходя из требуемой чистоты аргона. Отбор верхнего продукта из КТА целесообразно устанавливать около предельно возможного значения, вблизи перехода на восходящие ветви кривых (см. рис. 2). Это позволяет достичь максимального коэффициента извлечения аргона. Вместе с тем, необходимо иметь определенный запас по величине отбора технического аргона, чтобы случайные колебания расхода воздуха, уровней жидкости в колоннах или нагрузки конденсатора колонны технического аргона не привели к существенному ухудшению его чистоты.

4. НАКОПЛЕНИЕ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ АРГОНА В КОЛОННЕ ТЕХНИЧЕСКОГО АРГОНА ВО ВРЕМЯ ПУСКА ВРУ

При пуске ВРУ из тёплого состояния КТА заполнена воздухом и, начиная с момента приёма воздуха в блок, проводится продувка колонны — сначала для её охлаждения, а после накопления жидкости в кубе верхней колонны — для замещения воздуха на газообразную аргоновую фракцию.

Включение конденсатора колонны технического аргона в работу после накопления жидкости на стороне кипения происходит за счет постоянного роста концентрации кислорода на стороне конденсации. Поскольку температура конденсации газообразной аргоновой фракции примерно на 3 град. выше температуры конденсации технического аргона, включение конденсатора может происходить в режиме колебаний, с резким ростом сопротивления колонны из-за нерасчетных высоких нагрузок по пару и жидкости и последующим снижением нагрузки колонны из-за снижения давления конденсации в конденсаторе и соответствующим уменьшением температурного напора. Колебания сопротивления КТА во время пуска ВРУ являются однозначно вредным явлением и приводят, в частности, к увеличению времени переходного режима КТА. Такие колебания можно исключить или значительно уменьшить их амплитуду за счёт регулирования расхода кислорода, отдува паров из конденсатора и давления в конденсаторе КТА на стороне кипения; после накопления жидкости на насадке и распределителях колонны технического аргона гидравлический режим колонны стабилизируется.

В режимах, соответствующих нижним частям кривых, работает вся колонна, при этом концентрации пара и жидкости меняются от нижней до верхней тарелки. Верхние части кривых соответствуют совершенно другой картине — нижняя часть колонны находится в зоне постоянных концентраций, когда составы жидкости и пара при переходе от тарелки к тарелке не меняются и близки к составу газообразной аргоновой фракции на входе в колонну, а все изменение концентраций сосредоточено в верхней части колонны.

Накопление аргона в жидкости и паре КТА происходит за счёт постоянного отпаривания его из стекающей жидкости, переноса в верхние секции колонны и конденсатор и перемещения обогащенной аргоном флегмы в нижние секции. Во время этого переходного режима чистота верхнего продукта не достигает проектной величины даже при минимальном отдуве из конденсатора, необходимом для удаления накапливающегося азота. Связано это с тем, что накопление аргона в жидкости, находящейся в элементах колонны, является фактически отбором аргона как продукта. Этот «внутренний» отбор влияет на процесс ректификации аналогично внешнему, рассмотренному в предыдущем разделе, с той лишь разницей, что он распределен в постоянно движущейся области, начиная с верхней секции, и прекращается только после достижения рабочего поля концентраций в жидкости и паре КТА.

Поэтому в переходном режиме динамическая картина поля концентраций аргона в КТА будет следующей. После включения конденсатора, начиная с верхней секции, вниз по колонне будет распространяться зона, где концентрация аргона плавно меняется от максимального значения до величины, равной его содержанию в газообразной аргоновой фракции. В этой зоне реализуется «внутренний» отбор аргона, а ниже нее находится область постоянных концентраций. В свою очередь, в верхней зоне, начиная с определенного момента времени, можно выделить область, в которой «внутренний» отбор уже практически отсутствует, и формируется перенос аргона из нижнего слоя области в верхний, прилегающий к конденсатору. Такую область можно выделить по границе с концентрацией аргона выше 99 %.

На рис. 3 схематично представлена последовательность состояния поля концентраций в КТА от начального момента τ_0 , когда колонна заполнена газообразной аргоновой фракцией, и кончая достижением рабочего поля концентраций аргона по высоте колонны (τ_3). В течение длительного времени, которое будет оценено ниже, нижние секции колонны как будто не работают; в действительности они находятся в области постоянных концентраций в связи с особенностями ректификации аргона. Эта область по мере накопления аргона в жидкости движется вниз, и в момент достижения рабочего поля концентраций колонны она исчезает.

О достижении рабочего поля концентраций в колонне можно судить по чистоте верхнего продукта, т. е. содержанию кислорода в техническом аргоне. Достижение этой величиной проектного значения означает прекращение «внутреннего отбора», после которого можно направлять технический аргон в колонну чистого аргона для удаления азота и получения кондиционного продукта. Если по каким-то причинам этого не сделать, накопление аргона будет продолжаться и выйдет за пределы колонны технического аргона, а именно — в верхнюю колонну. Такой режим крайне нежелателен, поскольку связан с ухудшением чистоты

ты производящего кислорода.

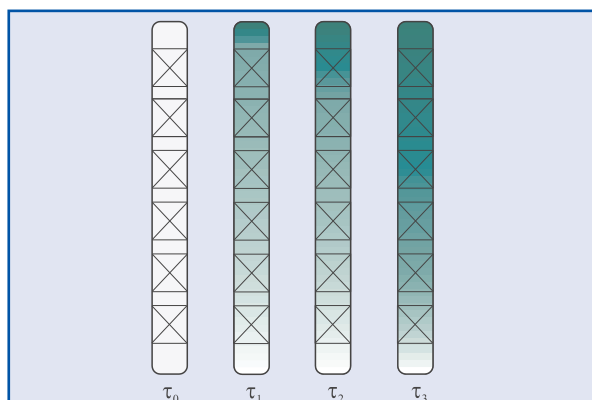


Рис. 3. Поле концентраций аргона в КТА во время пускового режима: τ_0 — исходное состояние, когда колонна заполнена газообразной аргоновой фракцией; $\tau_1... \tau_3$ — накопление аргона в жидкости КТА (тёмным цветом выделена зона с содержанием аргона более 99 %); τ_3 — проектное состояние поля концентраций КТА

5. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПУСКОВОГО РЕЖИМА КОЛОННЫ ТЕХНИЧЕСКОГО АРГОНА: СРАВНЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ И ФАКТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ

Хотя для расчёта времени выхода КТА на проектный режим нужны данные по характеристикам конкретной ВРУ, можно оценить это время для целого класса установок, параметры которых не выходят из следующего диапазона значений: коэффициент извлечения аргона 0,65...0,7, содержание кислорода в техническом аргоне 2...3 ppm. Колонны технического аргона проектируются таким образом, что рабочие скорости пара примерно одинаковы для установок различной производительности, а это в свою очередь приводит к тому, что объём насадки в колонне прямо пропорционален расходу воздуха. В итоге временные характеристики переходного режима колонн технического аргона для установок разной производительности могут быть достаточно близки.

В реальных воздуходелительных установках накопление аргона в колонне технического аргона происходит, как правило, при переменном составе газа, поступающего на ее вход. На рис. 4 представлен график продолжительности пускового периода колонны технического аргона в зависимости от содержания аргона в газообразной аргоновой фракции. Расчёт выполнен для насадки с удельной поверхностью $750 \text{ м}^2/\text{м}^3$, задержки жидкости на насадке 5 % от её объёма и объёма жидкости в коллекторах и распределительных устройствах, равного 40 % объёма жидкости на поверхности насадки. Высота насадки в колонне эквивалентна 160 теоретическим тарелкам. Указанные выше параметры соответствуют большинству современных установок ОАО «Криогенмаш» с узлом ректификации технического аргона. Для определения времени переходного периода были использованы также результаты расчета процесса

ректификации, представленные на рис. 2. Расход аргона, идущего на концентрирование в жидкости КТА, рассчитывался по флегмовому числу, при котором содержание аргона в верхнем продукте колонны равно 99 %; отдув из конденсатора не учитывался.

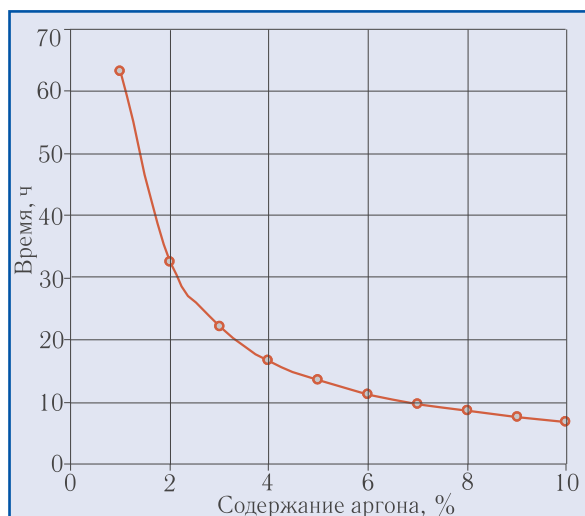


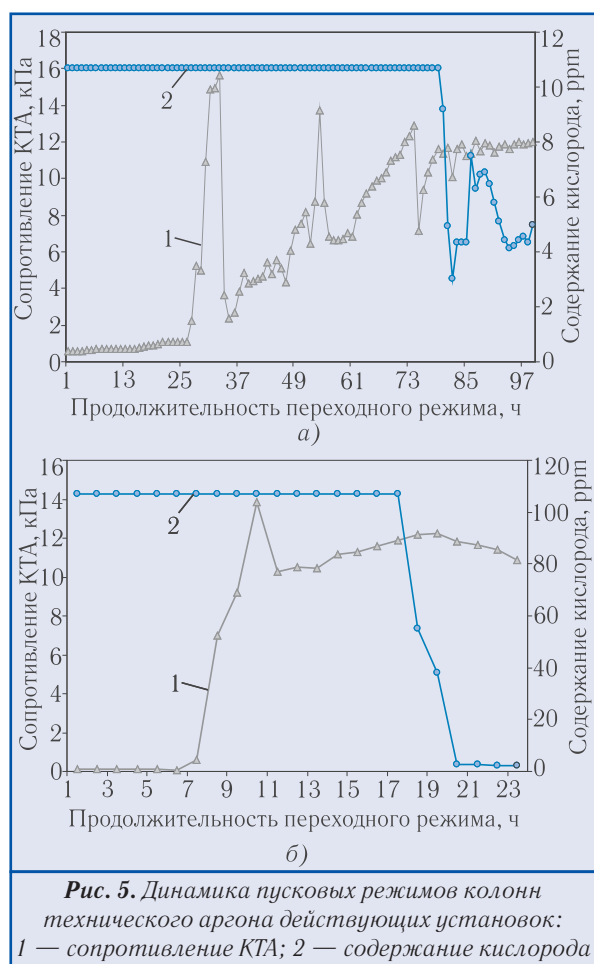
Рис. 4. Длительность пускового периода КТА в зависимости от содержания аргона в газообразной аргоновой фракции

Результаты расчёта показывают, что приемлемое время установления рабочего поля концентраций в колонне (примерно 10 ч или ниже) возможно при содержании аргона в газообразной аргоновой фракции более 6 %. Однако увеличение содержания аргона в поступающем в КТА газе неизбежно приводит к появлению и росту концентрации в нем азота. Поскольку в пусковом режиме КТА работает фактически в режиме полного орошения, даже небольшая примесь азота в аргоновой фракции может привести к такому его концентрированию в конденсаторе КТА, при котором конденсатор отключится. Чтобы этого не произошло, необходимо постоянно отдувать из конденсатора часть верхнего продукта, теряя при этом часть аргона. Непропорциональный рост содержания азота при увеличении содержания аргона в газообразной фракции и опасность отключения конденсатора КТА, с одной стороны, и стремление минимизировать время пускового режима КТА, с другой, заставляют искать оптимальный состав газообразной аргоновой фракции в диапазоне концентраций, соответствующем пологой правой части графика, изображённого на рис. 4.

На продолжительность переходного периода КТА на действующих блоках очень сильное влияние оказывают условия работы верхней колонны.

Если во время пускового режима ВРУ приоритетом является минимально возможное время для получения кислорода с чистотой не ниже проектной, то это достигается за счет уменьшения его расхода, в ряде случаев — значительного. При этом содержание аргона в газообразной аргоновой фракции может снизиться в несколько раз по сравнению с проектным значением, вплоть до 1...2 %, что в свою очередь значительно уве-

личит длительность пускового режима колонны технического аргона. На рис. 5, а приведён пример выхода на рабочий режим КТА именно для такого случая. На графике представлены данные журнала оператора ВРУ по изменению гидравлического сопротивления колонны технического аргона и содержания кислорода в техническом аргоне во время пуска установки. КТА нагружалась постепенно с целью гарантированного получения кислорода продукционной чистоты, из-за чего во время переходного режима отбор кислорода не превышал 88% от проектного расхода. Это привело к длительному выходу КТА на рабочий режим, который составил более двух суток из-за низкого содержания аргона в газообразной аргонной фракции. Во время переходного периода наблюдались сильные колебания сопротивления КТА, которые также сыграли отрицательную роль, увеличив продолжительность пуска.



Совершенно другую динамику пускового режима КТА можно видеть на рис. 5, б. В соответствии с журналом оператора ВРУ от момента включения конденсатора КТА до получения кондиционного технического аргона прошло 12 ч. В течение этого времени также была обеспечена чистота продукционного кислорода, его отбор был на уровне 95% от проектного значения, что позволило поддержать среднее содержание аргона в газообразной аргонной фракции на уровне 6%. Длительность пускового режима КТА для этих усло-

вий достаточно хорошо соответствует результатам расчета, приведенным на рис. 4.

Анализ результатов расчета пускового режима КТА и фактических параметров действующих установок позволяет заключить, что ориентиром для длительности пускового периода КТА является время в диапазоне 10...12 ч. Уменьшение этого времени теоретически возможно, но связано с необходимостью приближения к границе устойчивой работы конденсатора КТА из-за азота, содержащегося в газообразной аргонной фракции. Высокая вероятность срыва стабильной работы колонны технического аргона с последующим многочасовым восстановлением режима ректификации в верхней колонне и КТА является слишком высокой ценой за возможность сокращения времени получения технического аргона на 2-3 ч.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время пуска ВРУ с узлом ректификации аргона для концентрирования его в жидкости, находящейся на насадке и других элементах колонны технического аргона, требуется длительное время, зависящее от режима работы верхней колонны и конденсатора КТА. За счёт правильного выбора параметров пускового режима, таких как величина отбора кислорода, отдув из конденсатора КТА, давление в конденсаторе, можно минимизировать время переходного режима и ускорить получение продукционного аргона.

В результате расчётного анализа определено, что пусковой режим колонн технического аргона может составлять 10...12 ч, считая от момента включения конденсатора КТА, при условии проектного расхода воздуха в блок. Для обеспечения этого времени содержание аргона в газообразной аргонной фракции должно находиться в диапазоне 5...7%. В течение пускового режима обеспечивается проектная чистота продукционного кислорода с расходом, близким к проектному значению.

Минимизация пускового периода аргонового узла ВРУ естественным образом имеет экономическую составляющую. С учётом того, что современные установки имеют производительность по аргону, исчисляемую сотнями м³/ч, несколько лишних часов, потраченных на пусковой режим КТА, с учётом рыночной цены аргона означают потерю сотен тысяч рублей. При сокращении времени пуска аргонового узла эти потери превращаются в дополнительную прибыль, улучшающую общие экономические показатели ВРУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Криогенные системы. В 2 т. Т2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем/ А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др.; Под общ. ред. А. М. Архарова и А.И. Смородина. — М.: Машиностроение, 1999. — 720 с.
2. Багатуров С.А. Теория и расчет перегонки и ректификации. — М.: Гостоптехиздат, 1961. — 435 с.