

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИЧИН НЕСТАБИЛЬНОЙ РАБОТЫ КРИОГЕННОЙ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ТКДС-100В

А.А. Воробьев
А.В. Козлов
А.М. Кокарев
И.В. Желтоухов

777aleksandr777@bk.ru
z662@rambler.ru
kokarev36@bk.ru
zh_i_v@mail.ru

ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж, Российская Федерация

Аннотация

Приведены основные результаты экспериментального исследования работы азотной ректификационной колонны воздуходелительной установки высокого давления ТКДС-100В, разработанной специалистами ОАО «НПО «Гелиймаш» в качестве альтернативы установкам предыдущего поколения АКДС-70М. Заявленная производительность таких установок по сравнению с производительностью установок предыдущего поколения значительно выше, концентрация получаемых продуктов соответствует требованиям и обеспечивается применением эффективных теплообменников собственного производства. Опыт эксплуатации воздуходелительной установки ТКДС-100В выявил ряд существенных недостатков. К эксплуатационным недостаткам приводит нестабильная работа блока разделения воздуха установки, вызванная как конструктивными просчетами, так и ошибками в эксплуатационной документации. Проведена оценка массовой производительности установки ТКДС-100В на режиме производства жидкого азота. На основе детального анализа эмпирических данных установлена причина колебательного характера протекающих в колонне процессов, которые существенно осложняют работу оператора, исключают возможность поддержания рационального режима и зачастую приводят к возникновению нештатных ситуаций, связанных с выходом параметров за границы допустимых значений. Выявлены недостатки в конструкции

Ключевые слова

Воздухоразделительная установка, ректификационная колонна, конденсатор, ректификация, флегма

ректификационной колонны, приводящие к пульсационной подаче флегмы из карманов конденсатора на верхнюю ректификационную тарелку, и предложены пути их устранения

Поступила 06.03.2022

Принята 22.03.2022

© Автор(ы), 2022

Введение. Воздухоразделительные установки (ВРУ) являются достаточно сложными (в определенном смысле уникальными) объектами управления с непрерывным технологическим процессом. Как правило, эти установки обслуживают металлургические и химические предприятия, технологические процессы которых требуют постоянной круглосуточной подачи продуктов разделения.

Эффективность работы ВРУ в значительной степени определяется стабильностью работы узла ректификации при различных возмущающих факторах (изменении расхода материального потока, давления и т. д.). Сложность технологического процесса разделения воздуха обусловлена взаимной зависимостью регулируемых параметров, а также большой инерционностью, присущей ректификационным колоннам как объектам управления.

Для производства жидкого и газообразного медицинского кислорода и жидкого и газообразного азота в количестве до 100 кг/ч в настоящее время широко используются установки ТКДС-100В и СТАД-100 (производство ОАО «НПО «Гелиймаш») и АЖКЖ-0,06, АЖКЖ-0,07 (производство Уральского компрессорного завода). Разделение воздуха в данных установках происходит методом низкотемпературной ректификации с использованием комбинированного детандерного холодильного цикла высокого давления.

Несмотря на небольшую степень автоматизации и сравнительно высокие удельные затраты на производство продуктов разделения воздуха, данные установки имеют ряд преимуществ, которые определяют приоритет их использования перед установками адсорбционного и мембранного типов [1]. Это дает возможность получать как медицинский кислород, так и азот в жидком и газообразном виде, чистоту продуктов, производимых низкотемпературной ректификацией и высокую степень очистки и осушки.

Оборудование установки ТКДС-100В смонтировано в двух контейнерах, которые в варианте исполнения СТАД-100 устанавливаются на шасси повышенной проходимости. Производство установок ТКДС-100В и СТАД-100 осуществляется более 15 лет. При их разработке за основу взята автомобильная кислородоазотодобывающая станция АКДС-70М. Повышение производственных возможностей обеспечено благодаря использованию в составе узла сжатия модернизированных компрессорных агрегатов АВШ-3,7/200М увеличенной производительности, применению высокоэф-

фективной тепло- и массообменной аппаратуры собственного производства.

Опыт эксплуатации установок ТКДС-100В показал, что они имеют несколько существенных недостатков.

1. Нестабильная работа установки, связанная с переключением адсорберов блока комплексной очистки и осушки (БКО) перерабатываемого атмосферного воздуха на параллельный режим работы после регенерации адсорбента [2] и с изменением производительности детандера [3].

2. Реальная производительность станции не соответствует значениям, указанным в технической документации, по целевому продукту (100 кг/ч) [4–6].

3. Поддержание основных параметров (давления, температуры, уровня жидкости) в диапазонах нормальной работы станции при выполнении технологических операций, согласно руководству по эксплуатации, является сложной задачей вследствие высокоамплитудного разноинтервального колебательного характера изменения параметров процессов.

Цель настоящей работы — идентификация причин нестабильной работы установки ТКДС-100В при производстве жидкого азота.

Результаты. Работа ВРУ в режиме получения жидкого азота (рис. 1) осуществляется следующим образом.

Сжатый до 15...20 МПа в компрессоре воздух поступает в адсорбер БКО воздуха, где очищается от паров влаги, углекислого газа и органических соединений, после чего делится на два потока. Первый поток (дрессельный) сначала охлаждается в основном теплообменнике, а затем в змеевике испарителя, после чего через дроссельный вентиль высокого давления поступает в виде парожидкостной смеси в куб ректификационной колонны высокого давления (РК-1). Второй поток (детандерный), проходя через детандер и детандерный теплообменник, понижает свою температуру и также поступает в паровое пространство куба, находящееся под нижней тарелкой ректификационной колонны. В указанном пространстве происходит смешение поступивших потоков жидкости и пара с кубовой жидкостью и с ее выкипевшей частью. Далее перемешанные пары последовательно проходят через контактные устройства (тарелки), где в результате взаимодействия с флегмой, стекающей из встроенного в колонну конденсатора, разделяются на компоненты. Часть жидкости, попадающей из трубного пространства конденсатора в карманы, отбирается в виде жидкого продукционного азота. Из нижней части колонны обогащенная кислородом кубовая жидкость через дроссельное устройство направляется в конденсатор в качестве охлаждающего агента.

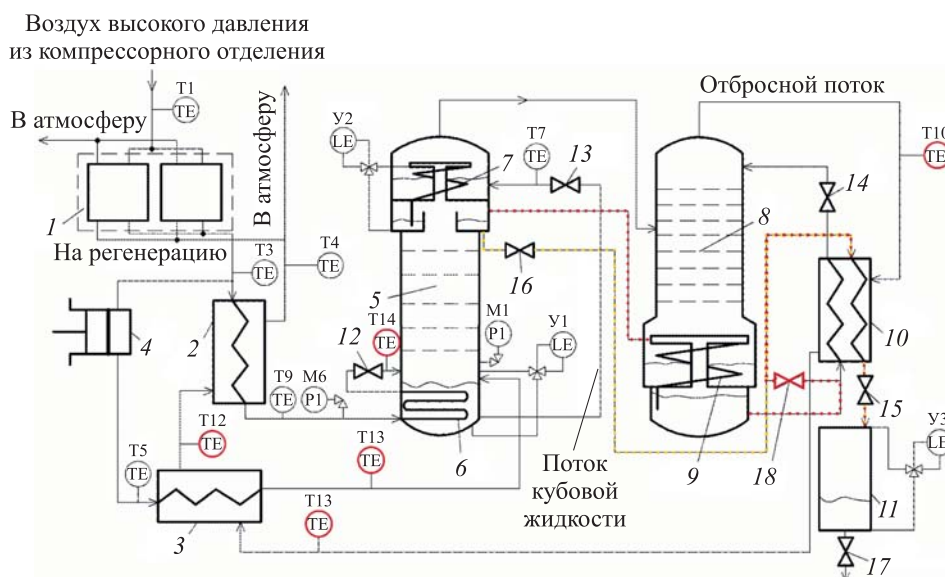


Рис. 1. Принципиальная схема получения жидкого азота и установки датчиков на установке ТКДС-100В:

1 — БКО воздуха; 2, 3 — основной и детандерный теплообменники; 4 — детандер; 5, 8 — ректификационные колонны высокого (РК-1) и низкого (РК-2) давления; 6 — испаритель; 7 — конденсатор; 9 — конденсатор-испаритель; 10 — переохладитель; 11 — емкость продукта; 12–15 — регулировочные дроссельные вентили Р-1, Р-2, Р-4, Р-6 соответственно; 16, 17 — запорные вентили 3-9, 3-6; 18 — вариант размещения запорного вентиля для модернизации установки; У1, У2, У3 — датчики уровня; Т1, Т3, Т4, Т5, Т7, Т9 — штатные датчики температуры; Т10, Т11, Т12, Т13, Т14 — дополнительные датчики температуры; М1, М6 — манометры; $\cdots\rightarrow$ — путь жидкого продукционного азота; $\cdots\rightarrow$ — предлагаемый путь отбора продукционного азота

Работа ВРУ по добыче жидкого азота осуществляется непрерывным способом в течение длительного времени (до 20 сут) и должна происходить при следующих значениях параметров процесса [7].

Значения параметров процесса при нормальном режиме работы блока разделения воздуха

Объемная производительность, кг/ч:	
жидкий азот	100±5
Давление, МПа (кгс/см ²):	
воздуха высокого давления (М6)	15...20 (150...200)
в колонне высокого давления I (М1)	0,4...0,6 (4...6)
Температура воздуха, °С:	
на входе в ожижитель (Т1)	20...60
после блока очистки (Т3)	(5...15)*
после детандера (Т5)	-130... -110
после теплообменника (Т9)	-130...-110

Температура жидкого воздуха, °С:	
в рубашке насоса (Т7) (не более)	-185
Показатели уровней в аппаратах, мм:	
в испарителе колонны I (У1)	200...260
в кармане колонны I (жидкий азот) (У2)	120...160
Объемная доля, %:	
жидкости в испарителе колонны I по кислороду	25...30
азота в продукте	99,6
азота в отбросном газе	73...74

* В период параллельной работы адсорберов температура сжатого воздуха на 10...15 °С выше указанной.

Для более детального изучения характера и закономерностей протекающих тепломассообменных процессов в ректификационных колоннах при регулировании их оператором ВРУ необходимо исследовать совокупность прямых и обратных связей между параметрами технологических потоков. Для этого кроме штатных контрольно-измерительных приборов (Т1, Т3, Т4, Т5, Т7, Т9, У1, У2, У3) в установке ТКДС-100В смонтированы дополнительные датчики температур (Т10, Т11, Т12, Т13, Т14) и преобразователи сигналов. Для непрерывной регистрации измерительной информации в режиме реального времени все датчики интегрированы в дополнительно установленную информационно-измерительную систему, которая обеспечивала оператора информацией в графическом виде о параметрах протекания технологического процесса и ее архивирование с заданной периодичностью. Места установки дополнительных датчиков температуры на рис. 1 выделены красным цветом.

Регистрация параметров в режиме производства жидкого азота осуществлялась после проведения пускового периода и установки основных показателей работы станции в соответствии со значениями показателей, приведенными ранее. Производительность установки по жидкому азоту определяли по методике [7]. Анализу подвергнута полученная измерительная информация более чем за четырехчасовой период работы станции, включающий в себя три последовательных этапа наполнения емкости блока разделения воздуха. Временные зависимости изменения основных параметров работы в графическом виде приведены на рис. 2, а остальные параметры, усредненные по интервалам этапов, сведены в таблицу.

Продолжительность наполнения емкости блока разделения воздуха при первом замере в соответствии с верхним графиком на рис. 2 составила 85 мин 16 с. Изменение уровня по показаниям прибора «Корунд-ДД» составило $\Delta U_{31} = 765$ мм, что соответствует производительности станции

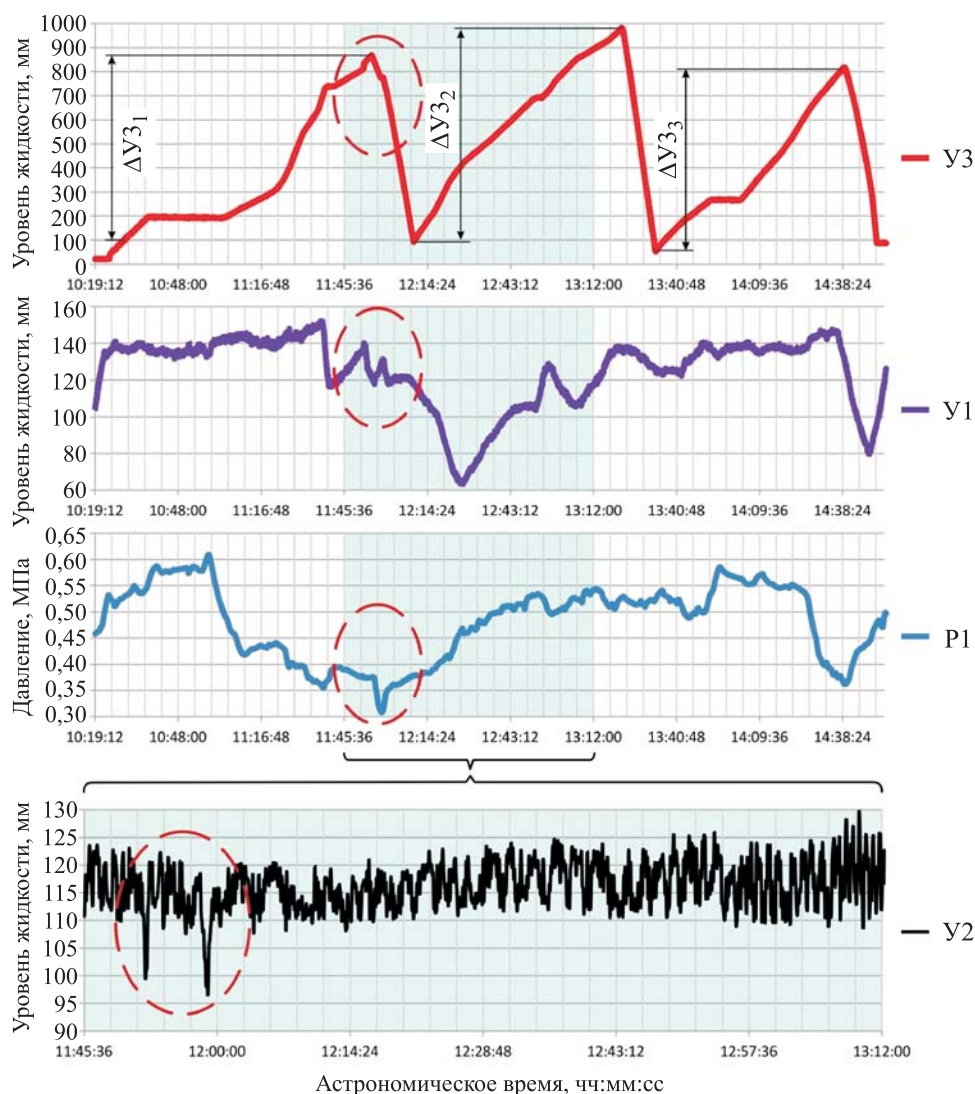


Рис. 2. Динамика уровней жидкости и давления в аппаратах блока разделения воздуха:

U1, U2, U3 — уровень жидкости в РК-1, в карманах РК-1, в емкости соответственно; P1 — давление в РК-1

по жидкому азоту 51,9 кг/ч. Отметим, что данный этап совпал с завершением периода параллельной работы БКО воздуха, в ходе которого температура компримированного воздуха в точке ТЗ понизилась с 18 до 5,2 °С (рис. 3). Указанный период работы характеризуется существенными колебаниями давления в азотной ректификационной колонне (зависимость P1, см. рис. 2) и понижением его значения ниже допустимого на завершающем временном отрезке первого этапа наполнения емкости.

**Усредненные значения параметров работы станции
при экспериментальном исследовании**

Параметр	Этап наполнения емкости		
	1	2	3
Уровень продукционного азота в кармане РК-1 (У2), мм	117	117	117
Рабочее давление в РК-1 (М1), МПа	0,41	0,49	0,51
Давление компримированного воздуха (М6), МПа	18,1	18,2	17,4
Температура компримированного воздуха (Т1), °С	25,7	26,2	28,3

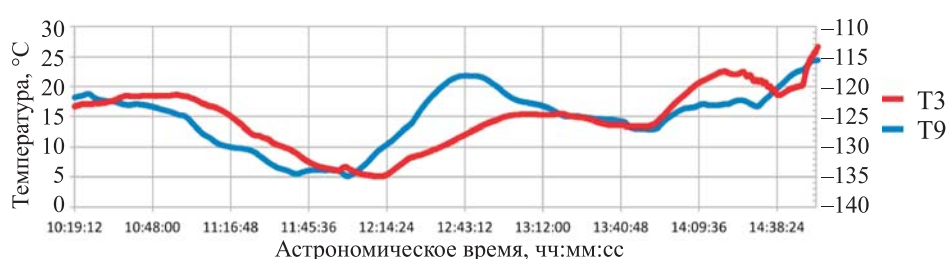


Рис. 3. Динамика температуры воздуха на входе (Т3) и выходе (Т9) основного теплообменника

Минимальное значение (0,3 МПа) давления зафиксировано уже после начала слива жидкого азота из емкости блока разделения воздуха (на рис. 2 этот участок выделен красной штриховой линией). В это же время наблюдаются резкие изменения уровня жидкости в кубе колонны (У1, см. рис. 2) в диапазоне 120...150 мм и изменение уровня жидкости в карманах конденсатора (У2, см. рис. 2) в диапазоне 95...125 мм. Для наглядности зависимость изменения уровня азота в карманах конденсатора приведена в увеличенном масштабе временной шкалы в сравнении с остальными графиками. Этот интервал времени включает в себя диапазон 11:45:36–13:12:00 и специально выделен голубым цветом. Здесь следует обратить внимание и на тот факт, что уровень жидкости в карманах конденсатора на протяжении всего времени работы не превышает отметку 130 мм и имеет колебательный характер.

Второе заполнение емкости блока разделения воздуха (см. рис. 2) продолжалось 72 мин 12 с. Изменение уровня составило $\Delta U_{32} = 882$ мм, производительность станции 71,5 кг/ч. Такой интервал работы характеризуется постепенным ростом давления в ректификационной колонне и критическим понижением вплоть до отметки 60 мм уровня в ее кубе.

Уровень азота в карманах, как и при первом замере, изменяется в пределах 110...125 мм.

Время наполнения емкости на третьем этапе (см. рис. 2) составило 65 мин 14 с, уровень в емкости при этом повысился от 52 до 819 мм, $\Delta U_{Z_3} = 767$ мм; производительность станции — 87,7 кг/ч. Этот этап характеризуется относительно стабильными значениями уровня жидкости в кубе колонны и давления, которые в конце наполнения понизились до 80 мм и 0,35 МПа.

На протяжении всего эксперимента температуры в точках Т3 и Т9 оставались в пределах допустимых значений. Плавные изменения температуры Т9 на рис. 3 объясняются колебаниями температуры воздуха на входе в основной теплообменный аппарат и детандер (точка Т3). На первом этапе повышение температуры Т3 объясняется окончанием режима параллельной работы БКО воздуха, а на третьем этапе температура в этой точке была искусственно завышена для имитации того же процесса параллельной работы адсорберов. В результате на последнем этапе исследования зафиксировано значительное изменение давления в колонне и последующее снижение уровня кубовой жидкости в пределах временной отметки 14:38:24 (см. рис. 2).

Проанализированные эмпирические данные свидетельствуют о нестабильной работе блока разделения воздуха и колебательном характере протекающих процессов. Для установления причин возникновения такого неблагоприятного режима работы более детально рассмотрим схему отбора азота из карманов ректификационной колонны и проанализируем выделенные красной штриховой линией временные участки на рис. 2, которые наиболее ярко отражают взаимосвязь между параметрами процесса и регулирующими воздействиями оператора.

Желтой штриховой линией на рис. 1 обозначен путь жидкого продукционного азота, отбираемого из карманов РК-1 и подаваемого через открытый запорный вентиль З-9, переохладитель и регулировочный вентиль Р-6 в емкость блока разделения воздуха. Количество жидкого продукта, отбираемого из карманов конденсатора, регулируется оператором вручную путем изменения положения маховика регулировочного вентиля Р-6. В соответствии с руководством по эксплуатации количество отбираемого продукционного азота должно быть таким, чтобы уровень в карманах конденсатора оставался в пределах допустимых значений (120...160 мм в соответствии с показателями, приведенными ранее).

Зависимости изменения уровней жидкости в испарителе (У1), кармане (У2) РК-1, емкости (У3) и зависимость изменения температуры отброс-

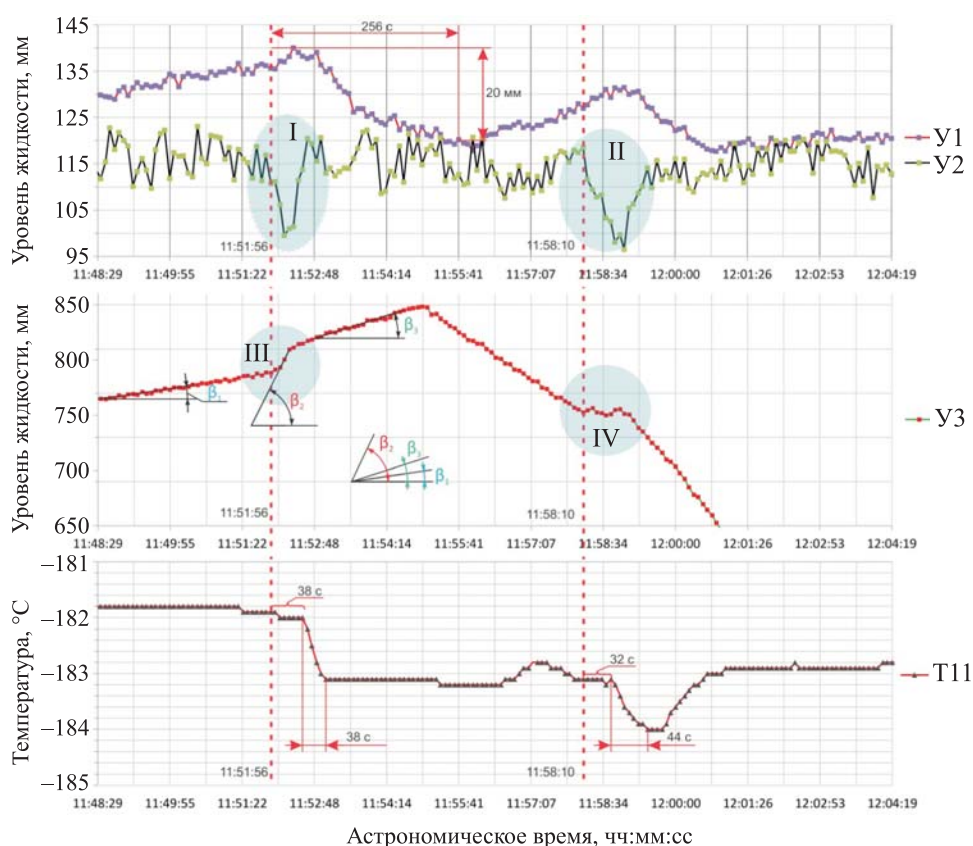


Рис. 4. Динамика уровней жидкости и температуры в аппаратах блока разделения воздуха:

Y1, Y2, Y3 — уровень жидкости в РК-1, в карманах РК-1, в емкости соответственно;
T11 — температура отбросного газа на выходе из переохладителя

ного газа на выходе из переохладителя (T11) приведены на рис. 4. Штриховыми линиями обозначены моменты времени, в которые оператор станции кратковременно увеличил отбор продукционного азота путем изменения положения маховика регулировочного вентиля Р-6.

В 11:51:56 оператором увеличена степень открытия вентиля Р-6. Это подтверждается, во-первых, изменением угла наклона кривой уровня жидкого азота в емкости (У3) к оси абсцисс $\beta_2 > \beta_1$ (зона III, см. рис. 4) в результате увеличения поступления жидкости из карманов РК-1 в емкость и, во-вторых, наблюдаемым спустя 38 с понижением температуры отбросного газа на выходе из переохладителя (T11). В результате выполненных оператором действий отбор азота из карманов РК-1 в емкость увеличился почти в 2,2 раза. Это привело к быстрому понижению от 115 до 100 мм уровня жидкого азота в карманах РК-1 (Y2) (зона I, см. рис. 4). Ввиду по-

нижения уровня в кармане РК-1 спустя 38 с оператор прикрыл вентиль Р-6 и уменьшил величину отбора азота из карманов до значения, незначительно превышающего значение первоначального отбора, что регистрируется уменьшением угла наклона кривой уровня жидкого азота в емкости (УЗ) к оси абсцисс $\beta_2 > \beta_3 > \beta_1$, а также выравниванием температуры отбросного газа (Т11) на выходе из переохладителя. В результате выполненных манипуляций оператором во временном интервале длительностью 38 с понизился уровень азота в кармане РК-1, а на верхнюю тарелку перестала поступать питающая жидкость (флегма). Следствием этого стало понижение на 20 мм уровня жидкости в кубе РК-1, которое достигло своего минимума через 255 с после открытия вентиля Р-6.

В 11:58:10 ситуация с понижением уровня в кармане РК-1 повторилась. Это хорошо прослеживается на зависимостях, приведенных на рис. 4, в выделенных участках II и IV. Основное отличие во втором случае — это слив жидкости из емкости. Поэтому происходит непродолжительная стабилизация уровня жидкости в области отметки 750 мм (участок IV, см. рис. 4), что свидетельствует о выравнивании значений потока продукционного азота, поступающего в емкость и покидающего ее вследствие увеличения отбора жидкого азота из кармана. Отметим, что уровень жидкости в кармане конденсатора, регистрируемый по уровню У2, ни в первоначальный момент, когда величина отбора была минимальной, ни далее, после закрытия вентиля, не превысил 125 мм. Размах колебаний уровня в кармане, регистрируемый датчиком разности давлений «Корунд-ДД», в среднем составляет 10...15 мм, при этом отклонение уровня, которое стало причиной уменьшения кубовой жидкости в РК-1, составило всего 25...30 мм. В этих условиях оператору обеспечить заданную регулировку отбора по величине изменения уровня крайне сложно.

Схема конденсатора с обозначенным направлением движения потоков и его упрощенная 3D-модель приведены на рис. 5. В азотной колонне, в отличие от классических конденсаторов с вертикальными трубами, используется более эффективный конденсатор из оребренных витых трубок с разреженной навивкой [8–15]. Поднимающиеся по колонне пары азота поступают в центральный коллектор, далее — в распределительный коллектор и, двигаясь в обратном направлении по внутритрубному пространству навитых труб, конденсируются, отдавая теплоту находящейся в межтрубном пространстве кубовой жидкости. Нижние участки труб (поз. 1, см. рис. 5), выведенные за пределы конденсатора, размещаются равномерно по сечению кармана ректификационной колонны, обеспечивая тем самым равномерное его заполнение и создание гидравлического затвора. Исполь-

зование описанной схемы движения потоков пара и жидкости в трубах конденсатора позволяет увеличить площадь контакта пара со стенкой, интенсифицировать процесс теплообмена за счет однонаправленного движения потоков пара и конденсирующейся в трубах жидкости, что не характерно для конденсаторов с вертикальным расположением труб.

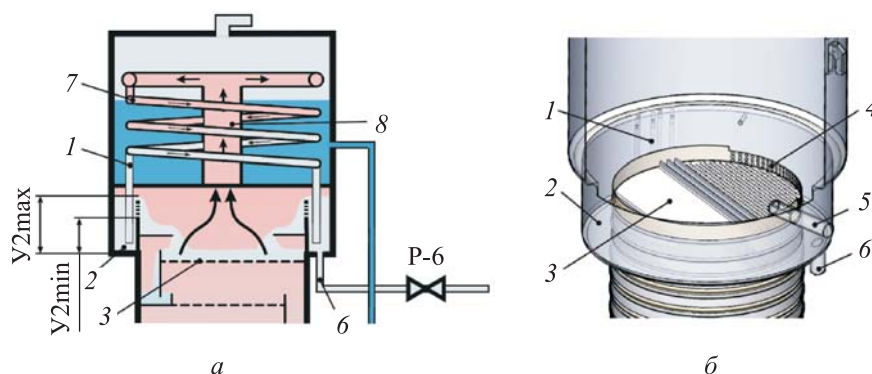


Рис. 5. Конденсатор ректификационной колонны высокого давления:

a — схема РК-1; *б* — общий вид конструкции РК-1; 1 — трубки слива сконденсированного азота из навитой части конденсатора в карман; 2 — карман РК-1; 3 — верхняя ректификационная тарелка; 4 — переливное устройство; 5 — отвод для отбора паров азота при работе станции на кислородном режиме; 6 — отвод для отбора жидкого продукционного азота; 7 — витая часть конденсатора; 8 — центральный коллектор

Однако рассмотренная конструкция конденсатора и кармана азотной ректификационной колонны не лишена недостатков. Жидкий азот, заполнив карман ректификационной колонны, разделяется на два потока. Первый поток при увеличении уровня жидкости в кармане более U_{2min} через переливное устройство 4 поступает на верхнюю тарелку и орошает колонну. Второй поток по отводу 6, минуя регулировочный вентиль P-6, отводится из колонны в качестве продукта. Необходимое к отбору количество продукционного азота определяется разделительной способностью ректификационной колонны и холодопроизводительностью цикла. В данном же случае величина отбора жидкого азота из кармана регулируется оператором на основе объективной информации об уровне жидкости в нем (U_2). Возможный вертикальный диапазон регулирования при этом определяется разностью уровней жидкости $U_{2max} - U_{2min}$ и, основываясь на полученных эмпирических данных, составляет от 110 до 125 мм (график U_2 , см. рис. 2) без учета погрешности средств измерения. Столь узкий диапазон регулирования в условиях малого объема кармана ректификационной колонны и имеющейся погрешности средств измерения делает невозможным обеспечение равномерного отбора продукционного

азота. Кроме того, даже поддержание уровня жидкости в указанном диапазоне не гарантирует, что отбор жидкого продукта соответствует определяемому холодопроизводительностью цикла значению.

Рассмотренные особенности конструкции конденсатора и кармана ректификационной колонны определяют требование к постоянному обеспечению максимального уровня жидкости в кармане конденсатора РК-1 для поступления флегмы на верхнюю тарелку и поддержания стабильной работы разделительной части колонны. В этих условиях регулирование отбора азота в емкость для оператора представляет непростую задачу, поскольку, с одной стороны, необходимо обеспечить максимальный отбор продукта, определяемый установленной холодопроизводительностью цикла и его концентрацией по азоту, а с другой, исключить возможность периодической подачи флегмы. Задача усложняется из-за наличия переменного расхода пара в колонне, определяющего поступление жидкости из конденсатора в карман РК-1 и зависящего не только от внешних возмущающих воздействий (изменения давления и температуры атмосферного воздуха), но и от выполняемых оператором в соответствии с технологическим процессом эксплуатационных операций (продувка влагоотделителей, наполнение и опорожнение адсорберов, проведение режимов регенерации и доохлаждение БКО и др.).

Высокой динамике процессов в данной системе способствуют малые объемы кармана и куба испарителя РК-1, из-за которых даже непродолжительное воздействие на изменение потока флегмы, поступающей из кармана на верхнюю тарелку ректификационной колонны, оказывает заметное влияние на изменение уровня жидкости в испарителе.

Отметим, что существующая конструкция РК-1 по части исполнения конденсатора и кармана имеет ряд существенных недостатков, которые влияют на стабильность работы станции на азотном жидкостном режиме, способствуют возникновению колебательных процессов, требуют непрерывного контроля со стороны оператора и могут приводить к нештатным ситуациям, обусловленным ростом давления в аппаратах блока разделения воздуха более допустимых значений. В таких условиях исключается возможность рационального управления станцией и обеспечения максимальной производительности.

Одним из предлагаемых способов модернизации конструкции кармана РК-1 является изменение конструкции карманов ректификационной колонны так, как показано на рис. 6. Предлагается установить перегородки в кармане конденсатора РК-1 высотой не менее $U_{2\max}$ так, чтобы одна перегородка была в секторе перфорированной части верхней ректификацион-

ной тарелки. Данное решение позволит поделить карман на две части: питающую и отборную. Оператор, открывая регулировочный дроссельный вентиль Р-6, изменяет величину отбора продукционного жидкого азота из отборной части кармана РК-1. При закрытом вентиле весь сконденсировавшийся азот идет на орошение РК-1 в качестве флегмы. Данные параметры реализуются на пусковом режиме при накоплении необходимых уровней жидкости в аппаратах ВРУ. При полностью открытом вентиле Р-6 не произойдет прекращение поступления флегмы на орошение РК-1 в связи с тем, что даже при полном отсутствии жидкости в отборной части кармана РК-1 из питающей части будет гарантированно подаваться жидкий азот на орошение.

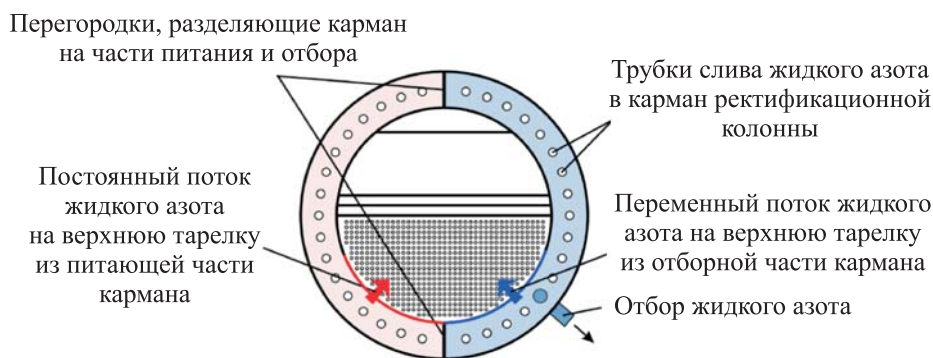


Рис. 6. Схема модернизации конструкции кармана РК-1

В качестве другого способа модернизации предлагается реализовать схему отбора продукционного азота в парообразном состоянии из верхней части РК-1 с последующей конденсацией в конденсаторе-испарителе ректификационной колонны низкого давления (РК-2) (данная схема реализована на станции АКДС-70М).

Продукционный азот, отбираемый из верхней части ректификационной колонны высокого давления, представляет собой поток пара со взвешенными частичками жидкости. Расход этого потока определяется массовой скоростью конденсации паров азота в трубном пространстве конденсатора-испарителя РК-2 (рис. 7), которая зависит от его тепловой нагрузки и площади поверхности теплообмена. Тепловая нагрузка конденсатора-испарителя определяется составами потоков, находящихся в трубном и межтрубном пространстве, и давлениями в ректификационных колоннах. Площадь поверхности теплообмена зависит от уровня жидкости в трубном пространстве конденсатора-испарителя, который определяется материальным балансом

$$D_{к-и}^{вх} - D_{к-и}^{вых} = 0,$$

где $D_{к-и}^{вх}$ — массовый расход пара, поступающего в трубное пространство конденсатора-испарителя РК-2 из верхней части РК-1; $D_{к-и}^{вых}$ — массовый расход продукционного азота, отбираемого из трубного пространства конденсатора-испарителя РК-2 и подаваемого через регулировочный дроссельный вентиль Р-6 в емкость.

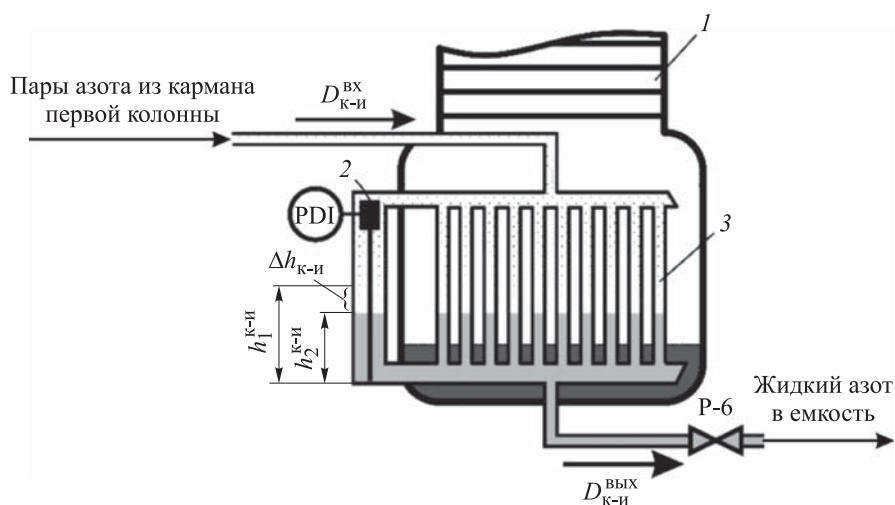


Рис. 7. Упрощенная схема отбора продукционного азота из верхней части РК-1:

- 1 — ректификационная колонна низкого давления; 2 — датчики уровня;
3 — конденсатор-испаритель РК-2; P-6 — регулировочный вентиль

Смещение баланса в одну либо другую сторону приводит к накоплению или исчерпыванию жидкости в трубном пространстве и, соответственно, к изменению площади теплообмена. В случае нарушения условия равновесия, определяемого приведенным ранее соотношением, изменяется массовая скорость конденсации паров в сторону, противоположную направлению смещения материального баланса, и наблюдается явление самовыравнивания уровня жидкости. Таким образом обеспечивается равномерный отбор продукционного азота из верхней части ректификационной колонны, определяемый не степенью открытия P-6, а тепловым балансом и установленной холодопроизводительностью цикла.

Практическое апробирование предлагаемого технического решения возможно без существенного изменения имеющейся конструкции, так как технологической схемой предусмотрен отбор пара азота из верхней части РК-1 и подача его в трубное пространство конденсатора-испарителя РК-2 на кислородном режиме работы станции. Для этого достаточно установки

соединительного трубопровода и вывода запорного вентиля (поз. 18, см. рис. 1) на пульт управления технологическим отделением, путь продукционного азота при реализации данного способа обозначен на рис. 1 красной штриховой линией.

Заключение. Проведенный детальный анализ полученной на серийном образце ВРУ ТКДС-100В совокупности экспериментальных данных позволил идентифицировать конструктивные недостатки, на первый взгляд, кажущиеся незначительными, но которые выступили дестабилизирующим фактором, повлиявшим на эффективность функционирования установки на азотном режиме. Для повышения производительности и исключения колебательного характера протекания процесса ректификации предложены два технических решения, второе из которых, по мнению авторов, является более эффективным и рациональным.

Отметим, что допущенные конструктивные просчеты при внедрении более эффективного витого конденсатора привели к большим финансовым затратам на проведение экспериментальных исследований. В связи с этим возникает необходимость решения задач подобного рода с использованием методов математического моделирования, которые при заданной степени адекватности позволят снизить (или вообще исключить) возникновение подобных ситуаций.

Математическая модель позволит скорректировать конструкцию составных частей ректификационной колонны, схемные решения (обвязку) блока разделения воздуха по линии производства жидкого азота, подобрать рациональный режим функционирования азотной колонны, заключающийся в максимальном отборе целевого продукта.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ануров С.А. Криогенные технологии разделения газов. М., АР-Консалт, 2017.
- [2] Желтоухов И.В., Козлов А.В., Демчук В.О. Анализ массовой производительности установки ТКДС-100В по жидкому криопродукту. *Международ. науч.-техн. конф. «Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе»*. Воронеж, ВГАУ, 2020, с. 271–277.
- [3] Кокарев А.М., Слюсарев М.И., Гунин А.Л. Влияние изменения производительности детандера на работоспособность кислородоазотодобывающей станции на жидкостных режимах. *III Всерос. науч.-техн. конф. «Приоритетные направления и актуальные проблемы развития средств технического обслуживания летательных аппаратов»*. Воронеж, ВУНЦ ВВС ВВА, 2018, с. 112–115.
- [4] Воробьев А.А., Казьмин И.А., Иванов А.В. Оценка влияния температуры окружающего воздуха на производительность мобильной газодобывающей станции. *Воздушно-космические силы. Теория и практика*, 2018, № 8, с. 119–126.

- [5] Хвостов А.А., Иванов А.В., Журавлев А.А. и др. Оптимизация режимов работы ректификационной колонны воздухоразделительной установки. *Математические методы в технологиях и технике*, 2021, № 2, с. 16–19.
DOI: https://doi.org/10.52348/2712-8873_ММТТ_2021_2_16
- [6] Кокарев А.М., Гунин А.Л., Слюсарев М.И. Анализ работы воздухоразделительной установки ТКДС-100В в режиме получения жидкого азота. *АКТ-2017. Тр. XVIII Междунар. науч.-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов*. Воронеж, Элист, 2017, с. 38–40.
- [7] Станция кислородоазотодобывающая транспортабельная ТКДС-100В. Руководство по эксплуатации КВ 0016.00.00.000-02 РЭ. М., НПО «Гелиймаш», 2007.
- [8] Айнштейн В.Г. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. М., Логос, 2002.
- [9] Файнштейн В.И. Кислород, азот, аргон — безопасность при производстве и применении. М., Интернет инжиниринг, 2008.
- [10] Gogonin I.I. Heat transfer in condensation of vapor moving inside vertical tubes. *J. Eng. Phys. Thermophy.*, 2004, vol. 77, no. 2, pp. 454–470.
DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JOEP.0000028528.91696.12>
- [11] Бондаренко В.Л., Дьяченко Т.В., Дьяченко О.В. Методика проектного расчета противоточных дефлегматоров, используемых в технологии обогащения неонгелиевой смеси. *Холодильная техника и технология*, 2014, № 1, с. 44–52.
- [12] Green D.W., Perry R.H. Perry's chemical engineers' handbook. New York, McGrawHill, 2007.
- [13] Gorak A., Sorensen E. Distillation. Fundamentals and principles. Sandiego, Elsevier Science, Academic Press, 2014.
- [14] Petlyuk F.B. Distillation theory and its application to optimal design of separation units. Cambridge, Cambridge University Press, 2004.
- [15] Towler G., Sinnott R. Chemical engineering design. Boston, Butterworth-Heinemann, 2009.

Воробьев Александр Александрович — канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского отдела НИЦ ВУНЦ ВВС «ВВА» (Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а).

Козлов Александр Валерьевич — канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры ВУНЦ ВВС «ВВА» (Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а).

Кокарев Александр Михайлович — канд. техн. наук, научный сотрудник НИЦ ВУНЦ ВВС «ВВА» (Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а).

Желтоухов Иван Владимирович — канд. техн. наук, преподаватель кафедры ВУНЦ ВВС «ВВА» (Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Воробьев А.А., Козлов А.В., Кокарев А.М. и др. Результаты исследований по идентификации причин нестабильной работы криогенной воздухоразделительной установки ТКДС-100В. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 4 (143), с. 89–107. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-4-89-107>

THE RESULTS OF RESEARCH TO IDENTIFY THE CAUSES OF UNSTABLE OPERATION OF THE CRYOGENIC AIR SEPARATION UNIT TKDS-100V

A.A. Vorobyev

777aleksandr777@bk.ru

A.V. Kozlov

z662@rambler.ru

A.M. Kokarev

kokarev36@bk.ru

I.V. Zheltoukhov

zh_i_v@mail.ru

MERC AF “AFA”, Voronezh, Russian Federation

Abstract

The article presents the main results of an experimental study of the operation of a nitrogen rectification column of a high-pressure air separation unit TKDS-100V developed by JSC “NPO “Geliymash” as an alternative to the installations of the previous generation AKDS-70M. The declared productivity of these units is much higher in comparison with the predecessor, the concentration of the products obtained meets the requirements and is ensured by the use of efficient heat and mass transfer devices of its own production. However, the experience of operating the TKDS-100V air separation unit has revealed a number of significant disadvantages. The unstable operation of the air separation unit of the TKDS-100V unit, caused by both constructive miscalculations and errors in the operational documentation, leads to operational disadvantages. The evaluation of the mass productivity of the TKDS-100V unit in the mode of liquid nitrogen production has been carried out. Based on a detailed analysis of empirical data, the reason for the oscillatory nature of the processes occurring in the column has been established, which significantly complicate the operator’s work, exclude the possibility of maintaining a rational

Keywords

Air separation unit, rectification column, condenser, rectification, reflux

mode and often lead to emergency situations associated with the parameters going beyond the limits of acceptable values. Deficiencies in the design of the rectification column leading to a pulsating supply of reflux from the pockets of the condenser to the upper rectification plate are identified and solutions are proposed

Received 06.03.2022

Accepted 22.03.2022

© Author(s), 2022

REFERENCES

- [1] Anurov S.A. Kriogennye tekhnologii razdeleniya gazov [Cryogenic technologies for gas separation]. Moscow, AR-Konsalt Publ., 2017.
- [2] Zheltoukhov I.V., Kozlov A.V., Demchuk V.O. [Mass productivity analysis of TKDS-100V plant for liquid cryoproduct]. *Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. "Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve"* [Int. Sc.-Tech. Conf. Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society]. Voronezh, VSAU Publ., 2020, pp. 271–277 (in Russ.).
- [3] Kokarev A.M., Slyusarev M.I., Gunin A.L. [Effect of changes in expander performance on efficiency of oxygen and gas extraction station in liquid modes]. *III Vseros. nauch.-tekh. konf. "Prioritetnye napravleniya i aktualnye problemy razvitiya sredstv tekhnicheskogo obsluzhivaniya letatelnykh apparatov"* [III Russ. Sc. Tech. Conf. Priority Directions and Actual Development Problems of Aircraft Maintenance Facilities]. Voronezh, VUNTs VVS VVA Publ., 2018, pp. 112–115 (in Russ.).
- [4] Vorobyev A.A., Kazmin I.A., Ivanov A.V. The air environment temperature effect estimation on the mobile gas-driving station productivity. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika* [Aerospace Forces. Theory and Practice], 2018, no. 8, pp. 119–126 (in Russ.).
- [5] Khvostov A.A., Ivanov A.V., Zhuravlev A.A., et al. Optimization of the operating modes of the rectification column of the air separation unit. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical Methods in Technologies and Technics], 2021, no. 2, pp. 16–19 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.52348/2712-8873_MMTT_2021_2_16
- [6] Kokarev A.M., Gunin A.L., Slyusarev M.I. [Analysis of the air separation unit TKDS-100V operation in the mode of producing liquid nitrogen]. *AKT-2017. Tr. XVIII Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. i shkoly molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [AKT-2017. Proc. XVIII Int. Sc.-Tech. Conf. and School of Young Scientists, Post-Graduates and Students]. Voronezh, Elist Publ., 2017, pp. 38–40 (in Russ.).
- [7] Stantsiya kislorodoazotodobyvayushchaya transportabelnaya TKDS-100V. Rukovodstvo po ekspluatatsii KV 0016.00.00.000-02 RE [TKDS-100V oxygen-and-gas-producing transportable station. Operating manual KV 0016.00.00.000-02 RE]. Moscow, NPO "Geliymash" Publ., 2007.
- [8] Aynshteyn V.G. Obshchiy kurs protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii [General course on processes and devices of chemical technology]. Moscow, Logos Publ., 2002.

- [9] Faynshteyn V.I. Kislorod, azot, argon — bezopasnost pri proizvodstve i primeneni [Oxygen, nitrogen, argon — safety at production and use]. Moscow, Internet inzhiniring Publ., 2008.
- [10] Gogonin I.I. Heat transfer in condensation of vapor moving inside vertical tubes. *J. Eng. Phys. Thermophy.*, 2004, vol. 77, no. 2, pp. 454–470.
DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JOEP.0000028528.91696.12>
- [11] Bondarenko V.L., Dyachenko T.V., Dyachenko O.V. Method for design calculation of countercurrent dephlegmators used in technology of neonogelium mixture enrichment. *Kholodilnaya tekhnika i tekhnologiya*, 2014, no. 1, pp. 44–52 (in Russ.).
- [12] Green D.W., Perry R.H. Perry's chemical engineers' handbook. New York, McGrawHill, 2007.
- [13] Gorak A., Sorensen E. Distillation. Fundamentals and principles. Sandiego, Elsevier Science, Academic Press, 2014.
- [14] Petlyuk F.B. Distillation theory and its application to optimal design of separation units. Cambridge, Cambridge University Press, 2004.
- [15] Towler G., Sinnott R. Chemical engineering design. Boston, Butterworth-Heinemann, 2009.

Vorobyev A.A. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Research Department, Research Center, MERC AF “AFA” (Saryh Bol'shevikov ul. 54a, Voronezh, 394064 Russian Federation).

Kozlov A.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of the Department, MERC AF “AFA” (Saryh Bol'shevikov ul. 54a, Voronezh, 394064 Russian Federation).

Kokarev A.M. — Cand. Sc. (Eng.), Researcher, Research Department, Research Center, MERC AF “AFA” (Saryh Bol'shevikov ul. 54a, Voronezh, 394064 Russian Federation).

Zheloukhov I.V. — Cand. Sc. (Eng.), Lecturer, Department, MERC AF “AFA” (Saryh Bol'shevikov ul. 54a, Voronezh, 394064 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Vorobyev A.A., Kozlov A.A., Kokarev A.M., et al. The results of research to identify the causes of unstable operation of the cryogenic air separation unit TKDS-100V. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 4 (143), pp. 89–107 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-4-89-107>