

СТАБИЛИЗАЦИЯ ДАВЛЕНИЯ В РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ ТРАНСПОРТАБЕЛЬНОЙ ГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ СТАНЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ АЗОТА

В.И. Рязских¹, А.М. Кокарев², М.И. Слюсарев²

¹ Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия,

² Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия», г. Воронеж, Россия

Использование в энергоиспользующих установках непрерывного действия процессов и аппаратов с аperiodичностью приводит к возмущению термодинамических параметров материальных потоков. Применительно к транспортабельной газодобывающей станции рассмотрена задача стабилизации давления в ректификационной колонне получения жидкого азота с целью повышения эффективности функционирования воздуходелительной установки при внесении в дроссельный поток питания теплового возмущения, обусловленного переходом адсорберов блока очистки воздуха на параллельный режим работы. На основании производственных испытаний газодобывающей станции ТКДС-100В и имитационного моделирования с использованием разработанного математического описания, реализованного в среде MATLAB/Simulink, установлены закономерности динамики давления в ректификационной колонне получения азота. Обоснован метод стабилизации давления, основанный на временном прекращении отбора дистиллята.

Ключевые слова: энергоиспользующие установки, тепловые возмущения, стабилизация давления, ректификация воздуха, получение азота, имитационное моделирование.

Введение

Повышение эффективности функционирования энергоиспользующих установок по регенеративному принципу является перспективным [1–3], так как это позволяет существенно улучшить технико-экономические и эксплуатационные характеристики теплопередающих систем и комплексов. Ряд таких систем, например воздуходелительные установки (ВРУ) с холодильным циклом высокого давления, по способу организации технологии разделения являются установками квазинепрерывного действия. Однако внешние [4–6] и внутренние [7, 8] возмущения термодинамических параметров материальных потоков, такие как переключение адсорбционных колонн для очистки воздуха от углекислоты и влаги, откачка из трубного пространства конденсатора с целью уменьшения концентрации благородных газов и т. д., вносят аperiodичность.

В связи с этим необходимо идентифицировать закономерности изменения термодинамических параметров потоков при аperiodичности, которые позволят осуществить стабилизацию давления в ректификационной колонне получения жидкого азота транспортабельной газодобывающей станции и тем самым повысить эффективность функционирования ВРУ.

Эксперимент и постановка задачи

Для подтверждения и фиксации аperiodичности были проведены натурные эксперименты на газодобывающей станции ТКДС-100В, работающей на азотном жидкостном режиме с использованием штатных средств измерения.

Результаты производственного эксперимента показали [9], что при малых уровнях кубовой жидкости в блоке разделения воздуха возникает устойчивый колебательный режим функционирования, связанный с постоянной необходимостью регулирования рабочих параметров для достижения значений, рекомендованных руководством по эксплуатации (рис. 1).

Из рис. 1 следует, что давление в ректификационной колонне в целом изменяется симбатно с давлением сжатого воздуха и его температурой после блока комплексной очистки (БКО), а снижение уровня кубовой жидкости обычно приводит к росту давления в колонне. Принимая во внимание трудности прогнозирования поведения технологических параметров при их совместном взаимодействии, для анализа и выявления закономерностей ректификации воздуха при получении жидкого азота была разработана математическая модель с учетом законов сохранения массы и энергии и динамики давления [11–14].

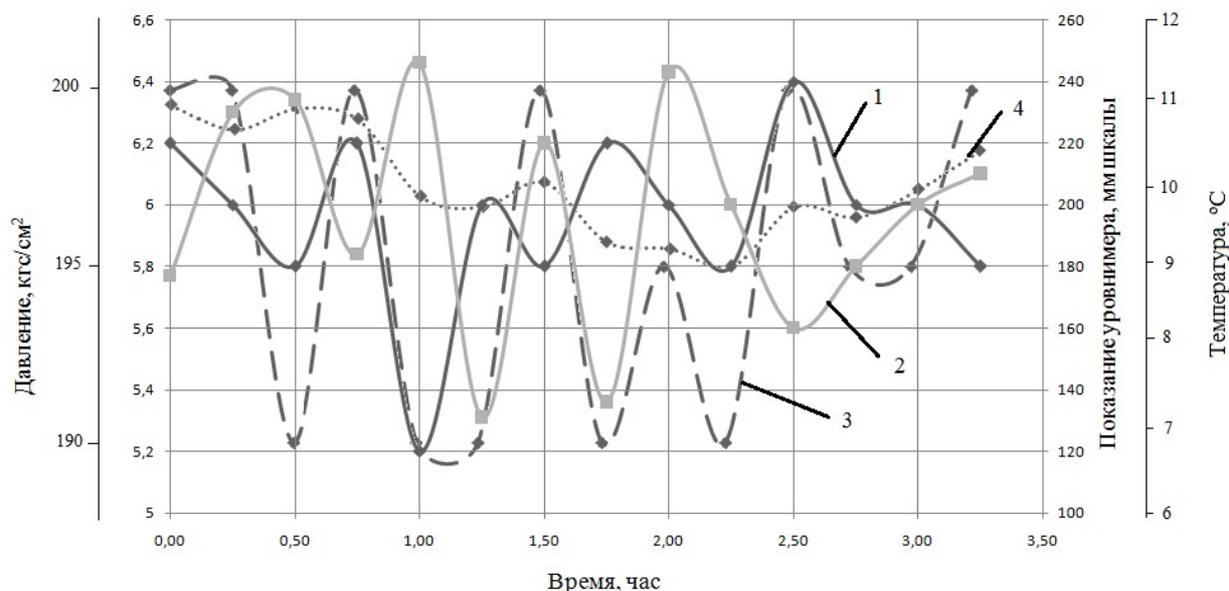


Рис. 1. Зависимость технологических параметров блока разделения воздуха от времени при уровне кубовой жидкости $H = 130 \dots 240$ мм по шкале прибора: 1 – давление в колонне получения азота; 2 – уровень кубовой жидкости; 3 – давление воздуха из компрессорного отделения; 4 – температура воздуха после блока комплексной очистки и осушки

Для колонны высокого давления двухмодульного ректификационного аппарата синтез математической модели, классифицируемой по типу как комплекс сопряженных уравнений с сосредоточенными параметрами, проведен при следующих общепринятых допущениях [10]: паровая фаза – идеальный газ; задержка по пару существенна только в зоне смешения; рассматривается адиабатная колонна; теплоемкостью материала колонны пренебрегаем; жидкая фаза несжимаема и идеально перемешана; унос и проваливание жидкости отсутствуют; конденсатор колонны – полный, испаритель – парциальный; динамикой конденсатора и испарителя пренебрегаем; флегма является насыщенной жидкостью; пар и жидкость находятся в состоянии термического равновесия; воздух рассматривается как бинарная смесь азота и кислорода.

Для куба ректификационной колонны уравнения общего и покомпонентного материального и теплового балансов имеют вид:

$$\frac{dM_w^L}{dt} = B_{th}^L + L_1 + G_w - W; \quad (1)$$

$$\frac{dx_w}{dt} = \frac{1}{M_w^L} \left\{ B_{th}^L (x_{th} - x_w) + L_1 (x_1 - x_w) - G_w [y_w^*(x_w) - x_w] \right\}; \quad (2)$$

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{c_p M_w^L} \left[B_{th}^L (h_{th}^L - h_w^L) + L_1 (h_1^L - h_w^L) - G_w (h_w^G - h_w^L) + Q_{evap} \right]; \quad (3)$$

$$Q_{evap} = B(1-z) \left[h_{air}^{in}(P_{air}, T_{in}) - h_{air}^{out}(P_{air}, T_{out}) \right]; \quad (4)$$

$$G_w = \frac{Q_{evap}}{r_{evap}(P_0, x_w)}; \quad (5)$$

$$\Delta G_w = \frac{M_w^L \left[h_w^L(P_0, T_w) - h_w^L(P_0, T_{sat}) \right]}{r_{evap}(P_0, x_w)}; \quad (6)$$

$$M_w^L(0) = M_{w0}^L, \quad x_w(0) = x_{w0}, \quad T_w(0) = T_{w0}, \quad (7)$$

где M_w^L – удерживающая способность куба по жидкости, кмоль; L_1 – расход жидкости, стекающей с первой тарелки в испаритель, кмоль/с; W, G_w – отбор и количество испарившейся кубовой жидкости соответственно, кмоль/с; $B_{th}^L = B(1-z)(1-q)$ – расход жидкости в потоке питания после дросселя, кмоль/с; B – расход воздуха высокого давления, кмоль/с; z – доля воздуха, поступающего на детандер; q – доля пара в парожидкостной смеси после дросселя; $x_w, x_{th}, x_1, h_w^L, h_{th}^L, h_1^L$ – концентрация и энтальпия жидкости

куба, после дросселя и на первой тарелке соответственно, кмоль/кмоль и кДж/кмоль; $y_w^*(x_w), h_w^G$ – концентрация и энтальпия пара, равновесного кубовой жидкости соответственно, кмоль/кмоль и кДж/кмоль; c_p – средняя в интервале изменения температур кубовой жидкости T_w теплоемкость смеси, кДж/(кмоль·К); Q_{evap} – тепловая нагрузка змеевика испарителя, кВт; P_{air} – давление сжатого воздуха, МПа; $h_{air}^{in}(P_{air}, T_{in}), h_{air}^{out}(P_{air}, T_{out}), T_{in}, T_{out}$ – энтальпии и температуры воздуха высокого давления на входе и выходе из змеевика испарителя куба ректификационной колонны соответственно, кДж/кмоль и К, причем $T_{out} = T_w + \Delta T_w$, где ΔT_w – принятая разность температур между воздухом высокого давления и кубовой жидкостью; $r_{evap}(P_0, x_w), T_{sat}(P_0, x_w)$ – удельная теплота испарения и температура насыщения кубовой жидкости соответственно, кДж/кмоль и К, при давлении в паровом пространстве куба P_0 , МПа; ΔG_w – дополнительный поток пара на первую тарелку, кмоль/с; M_{w0}^L, x_{w0}, T_{w0} – количество, концентрация и температура кубовой жидкости в начальный момент времени соответственно, кмоль, кмоль/кмоль и К.

Уравнения динамики для общего и покомпонентного баланса массы и давления зоны смешения:

$$\frac{dM_0^G}{dt} = B_{th}^G + B_{det}^G + G_w + \Delta G_w - G_0; \quad (8)$$

$$\frac{dy_0}{dt} = \frac{\left\{ B_{th}^G [y_{th}^*(x_{th}) - y_0] + B_{det}^G (y_{air} - y_0) + (G_w + \Delta G_w) [y_w^*(x_w) - y_0] \right\}}{M_0^G}; \quad (9)$$

$$\frac{dP_0}{dt} = \frac{R}{V_{bot}(1-H)} \left[M_0^G \frac{dT_w}{dt} + T_{sat} \frac{dM_0^G}{dt} \right]; \quad (10)$$

$$M_0^G(0) = M_{00}^G, \quad y_0(0) = y_{00}, \quad P_0(0) = P_{00}, \quad (11)$$

где M_0^G – масса пара в зоне смешения, кмоль; $B_{det}^G = B \cdot z$ – поток пара после детандера, кмоль/с; G_0, y_0 – расход и средняя концентрация пара на первую тарелку соответственно, кмоль/с и кмоль/кмоль; $y_{th}^*(x_{th})$ – концентрация азота в паровой фазе дроссельного потока, равновесная с его жидкой фазой, кмоль/кмоль; y_{air} – концентрация азота в исходном воздухе, кмоль/кмоль; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К); H – доля куба, занятая жидкостью; V_{bot} – объем куба колонны, м³; M_{00}^G, y_{00}, P_{00} – масса, концентрация и давление пара в зоне смешения в начальный момент времени соответственно, кмоль, кмоль/кмоль и МПа.

Уравнение теплового баланса для зоны смешения отсутствует, так как принято, что температура пара T_0 равна температуре насыщения кубовой жидкости, а $dT_0/dt \approx dT_w/dt$.

Уравнения общего и покомпонентного материального и теплового балансов для произвольной i -й тарелки ректификационной колонны:

$$\frac{dM_i^L}{dt} = L_{i+1} - L_i + G_{i-1} - G_i; \quad (12)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{1}{M_i^L} [L_{i+1}(x_{i+1} - x_i) + G_{i-1}(y_{i-1} - x_i) - G_i(y_i - x_i)]; \quad (13)$$

$$\frac{d(M_i^L h_i^L)}{dt} = L_{i+1} h_{i+1}^L - L_i h_i^L + G_{i-1} h_{i-1}^G - G_i h_i^G; \quad (14)$$

$$G_i = \frac{L_{i+1}(h_{i+1}^L - h_i^L) + G_{i-1}(h_{i-1}^G - h_i^L)}{h_i^G - h_i^L}; \quad (15)$$

$$M_i^L(0) = M_{i0}^L, \quad x_i(0) = x_{i0}, \quad (16)$$

где M_i^L – удерживающая способность тарелки по жидкой фазе, кмоль; L_i, G_i – расходы жидкой и паровой фазы для тарелок с соответствующим номером, кмоль/с; x, y, h_i^L, h_i^G – концентрации и энтальпии жидкости и пара на тарелке с номером i соответственно, кмоль/кмоль и кДж/кмоль; M_{i0}^L, x_{i0} – масса и концентрация жидкости на i -й тарелке в начальный момент времени.

Уравнение (15) получено из (14) и (12) с учетом того, что при ректификации воздуха согласно [10] можно считать $dh_i^L/dt \approx 0$.

С учетом сделанных допущений уравнения общего и покомпонентного материального и теплового балансов для конденсатора таковы:

$$G_n = L_{n+1} + D; \quad (17)$$

$$y_n = x_{n+1} = x_D; \quad (18)$$

$$G_n h_n^G = L_{n+1} h_{n+1}^L + D h_D^L + Q_c, \quad (19)$$

где G_n, h_n^G – расход и энтальпия пара с верхней тарелки соответственно, кмоль/с и кДж/кмоль; L_{n+1}, h_{n+1}^L – расход и энтальпия флегмы, поступающей из конденсатора соответственно, кмоль/с и кДж/кмоль; D, h_D^L – расход и энтальпия дистиллята (продукта) соответственно, кмоль/с и кДж/кмоль; Q_c – тепловая нагрузка конденсатора, кВт.

Парожидкостное равновесие рассчитывали через относительную летучесть α по [15]. Содержание низкокипящего компонента (НКК) в паровой фазе определяли с учетом эффективности тарелки по Мэрфи [16]. Физические свойства компонентов и их смесей валидизированы из [17–20].

Вычислительный эксперимент и его анализ

В силу нелинейности уравнений модели ее интегрирование осуществлено в вычислительной среде MATLAB/Simulink (решатель ode 15s). Исходные данные для проведения вычислительного эксперимента приведены в таблице.

Давление, масса и концентрация жидкости на тарелках, температура и концентрация кубовой жидкости уточнялись итерационно с учетом результатов расчета параметров функционирования колонны в стационарном состоянии.

При проведении вычислительного эксперимента увеличение температуры дроссельного потока на входе в испаритель ректификационной колонны получения азота принимали равным 10 и 15 К, что соответствовало данным обследования работы воздухоразделительной установки в режиме перехода на параллельную работу адсорберов БКО воздуха.

Имитационное моделирование процесса ректификации в колонне получения азота с 22 ситчатыми тарелками газодобывающей станции ТКДС-100В показало (рис. 2), что конечное давление в колонне тем ниже, чем меньше величина вносимого в поток питания теплового возмущения и чем

Входные переменные модели колонны

Переменная	Значение	Переменная	Значение
Расход воздуха, B , кмоль/с	0,005684	Масса жидкости на тарелке, M_i^L , кмоль	0,02
Отбор дистиллята, D , кмоль/с	0,001137	Доля детандерного потока, z	0,5
Температура воздуха после основного теплообменника, T_{in} , К	143	Высота сливной перегородки, z_1 , м	0,015
Давление воздуха, P_{air} , МПа	20	Число ситчатых тарелок, n	22
Концентрация азота в воздухе, y_{air} , кмоль/кмоль	0,79	Диаметр колонны, D_c , м	0,35

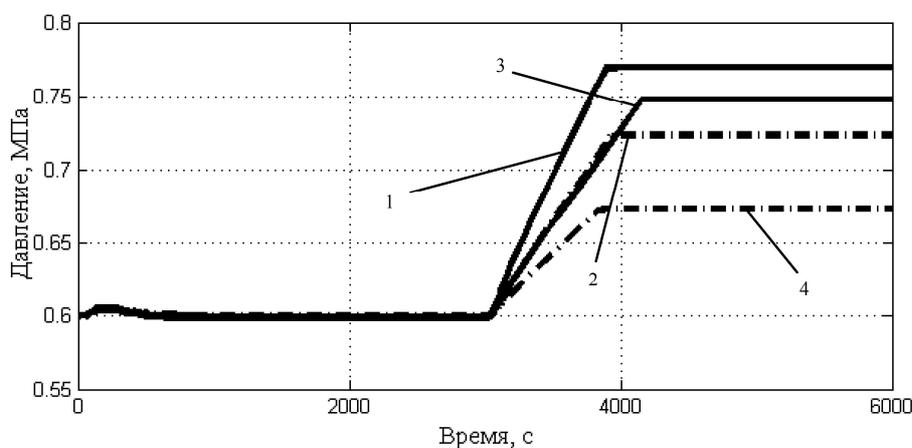


Рис. 2. Динамика давления в колонне при ступенчатом увеличении температуры потока питания: на 15 К – линии 1 и 2; на 10 К – линии 3 и 4; масса кубовой жидкости 0,2 кмоль – линии 1 и 3; 0,3 кмоль – 2 и 4. Начальная температура потока питания 143 К

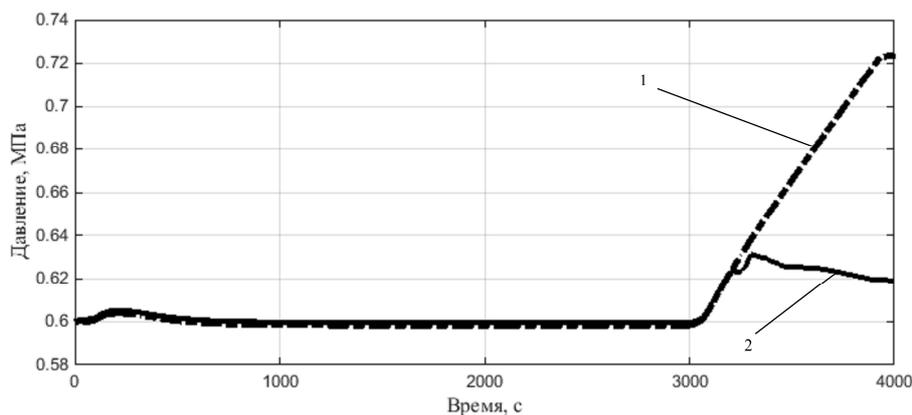


Рис. 3. Динамика давления в колонне при ступенчатом увеличении температуры потока питания на 15 К в момент времени 3000 с: 1 – без прекращения отбора дистиллята; 2 – с прекращением отбора дистиллята в момент времени 3200 с. Начальная температура потока питания – 143 К, масса кубовой жидкости – 0,3 кмоль

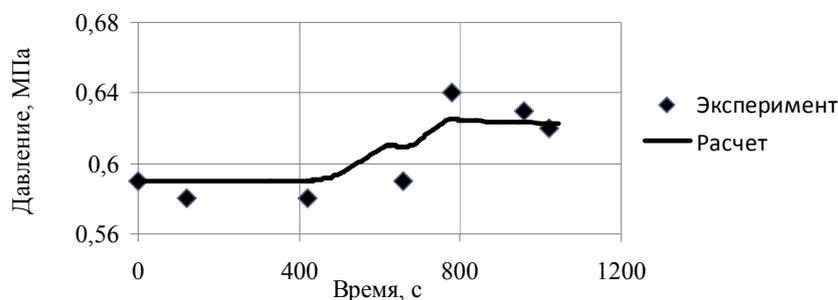


Рис. 4. Динамика давления в колонне при ступенчатом увеличении температуры потока питания в момент времени 420 с. Момент времени прекращения отбора дистиллята – 620 с

больше масса жидкости в кубе колонны, что согласуется с данными производственного эксперимента (см. рис. 1).

При эксплуатации мобильных ВРУ излишний рост давления в колонне обычно компенсируют повышенным отбором кубовой жидкости на конденсатор, в результате чего количество флегмы возрастает. Ее взаимодействие с перегретым паром приводит к конденсации последнего и, следовательно, к снижению давления. Однако при этом происходит уменьшение уровня кубовой жидкости, что в отдельных случаях вызывает обратный эффект – дальнейшее увеличение давления, в том числе до создания аварийной ситуации.

С учетом данного обстоятельства было сделано предположение о том, что существенный рост давления в ректификационном аппарате получения азота в момент перехода БКО на параллельную работу адсорберов можно нивелировать увеличением подачи флегмы в колонну за счет временного прекращения отбора дистиллята, что обосновано вычислительным экспериментом (рис. 3).

Для проверки адекватности результатов расчета реальным процессам в блоке разделения воздуха газодобывающей станции ТКДС-100В был проведен производственный эксперимент с прекращением отбора дистиллята через 200 с после

перехода БКО на параллельную работу адсорберов (рис. 4) для средней массы кубовой жидкости 0,3 кмоль и величины теплового возмущения 11 К, соответствующей повышению температуры сжатого воздуха от 143 до 154 К.

Сравнительный анализ результатов эксперимента и расчетных данных показал, по крайней мере, качественную адекватность предложенной математической модели и корректность сделанных допущений.

Выводы

1. Математическая модель процесса ректификации позволяет прогнозировать работу колонн получения азота с вводом питания в подтарелочное пространство.

2. Временное прекращение отбора дистиллята после перехода ВРУ на параллельный режим работы адсорберов дает возможность стабилизировать параметры блока разделения воздуха и улучшить его эксплуатационные характеристики.

Литература

1. Perry, R.H. *Perry's Chemical Engineers' Handbook* / R.H. Perry, D.W. Green. – N.-Y.: McGraw-Hill, 2008. – 2728 p.

2. Хаузен, X. *Теплопередача при противотоке,*

прямотоке и перекрестном токе / X. Хаузен. – М.: Энергоиздат, 1981. – 384 с. DOI: 10.1007/978-3-642-88686-7_3

3. Кирсанов, Ю.А. Циклические тепловые процессы и теория теплопроводности в регенеративных воздухоподогревателях / Ю.А. Кирсанов. – М.: Физматлит, 2007. – 240 с.

4. Improvement of Integrated Gasification Combined Cycle Performance Using Nitrogen from the Air Separation Unit as Turbine Coolant / S.Y. Yoon, B.S. Choi, J.H. Ahn, T.S. Kim // *Applied Thermal Engineering*, – 2019. – Vol. 151. – P. 163–175. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.110

5. Thermodynamic Evaluation of the Novel Distillation Column of the Air Separation Unit with Integration of Liquefied Natural Gas (LNG) Regasification / S. Chen, X. Dong, J. Xu et al. // *Energy*. – 2019. – Vol. 171. – P. 341–359.

6. Захаров, М.К. Многоколонная ректификация как способ энергосбережения при разделении зеотропных бинарных систем / М.К. Захаров, В.Д. Моисеева // *Химическая промышленность*. – 2003. – № 9. – С. 35–42.

7. Криогенные системы. Т. 2: Основы проектирования аппаратов, установок и систем / А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др. – М.: Машиностроение, 1999. – 719 с.

8. Наринский, Г.Б. Ректификация воздуха / Г.Б. Наринский. – М.: Машиностроение, 1978. – 248 с.

9. Кокарев, А.М. Анализ работы воздухоразделительной установки ТКДС-100В в режиме получения жидкого азота / А.М. Кокарев, А.Л. Гунин, М.И. Слюсарев // *Авиакосмические технологии (АКТ-2017): тр. VIII междунар. науч.-техн. конф. и шк. молодых ученых, аспирантов и студентов*. – Воронеж: ООО Фирма «Элист», 2017. – С. 167–172.

10. Skogestad, S. Dynamics and control of distillation columns – a critical survey / S. Skogestad // *Modeling, Identification and Control*. – 1997. – Vol. 18, no. 3. – P. 177–217.

11. Choe, Y.-S. Rigorous Dynamic Models of Dis-

tillation Columns / Y.-S. Choe // *MSE Thesis*. – Bethlehem, Lehigh University. – 1985. – P. 73.

12. Roffel, B. First principles dynamic modeling and multivariable control of a cryogenic distillation process / B. Roffel, B.H.L. Betlem, J.A.F. de Ruijter // *Computers and Chemical Engineering*. – 2000. – Vol. 24. – P. 111–123. DOI: 10.1016/S0098-1354(00)00313-6

13. Luyben, W.L. Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers / W.L. Luyben. – McGraw-Hill, 1999. – 741 p.

14. Zhu, G.Y. Low-order dynamic modeling of cryogenic distillation columns based on nonlinear wave phenomenon / G.Y. Zhu, M.A. Henson, L. Megan // *Separation and Purification Technology*. – 2001. – Vol. 24. – P. 467–487. DOI: 10.1016/S1383-5866(01)00147-2

15. Расчет коэффициента относительной летучести смеси азот-кислород по экспериментальным данным / А.А. Хвостов, А.А. Журавлев, М.И. Слюсарев, А.А. Воробьев // *Новое в технологии и технике функциональных продуктов питания на основе медико-биологических воззрений: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф.* / Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж: ВГУИТ, 2017. – С. 987–991.

16. Рамм, В.М. Абсорбция газов / В.М. Рамм. – М.: Химия, 1976. – 656 с.

17. Борзенко, Е.И. Установки и системы низкотемпературной техники. Автоматизированный расчет и моделирование процессов криогенных установок и систем / Е.И. Борзенко, А.В. Зайцев. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. – 232 с.

18. Теплофизические свойства криопродуктов / Л.А. Акулов, Е.И. Борзенко, В.Н. Новотельнов, А.В. Зайцев. – СПб.: Политехника, 2012. – 243 с.

19. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. – СПб.: Химиздат. – 2009. – 544 с.

20. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. – Л.: Химия, 1982. – 592 с. DOI: 10.1002/aic.690240634

Ряжских Виктор Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика и механика», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; ryazhskih_vi@mail.ru.

Кокарев Александр Михайлович, адъюнкт, кафедра «Криогенные машины, установки и электрогазовая техника», Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия», г. Воронеж; kokarev36@bk.ru.

Слюсарев Михаил Иванович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Криогенные машины, установки и электрогазовая техника», Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия», г. Воронеж; mslyusarev52@yandex.ru.

Поступила в редакцию 27 июля 2019 г.

PRESSURE STABILIZATION IN THE DISTILLATION COLUMN OF A TRANSPORTABLE GAS STATION FOR NITROGEN PRODUCTION

V.I. Ryazhskikh¹, ryazhskih_vi@mail.ru,
A.M. Kokarev², Kokarev36@bk.ru,
M.I. Slyusarev², mslyusarev52@yandex.ru

¹ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,

² Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy",
Voronezh, Russian Federation

When energy-saturated continuously running units run aperiodic processes and equipment, thermodynamic parameters of material flows may be disturbed. This paper considers transportable gas stations and dwells upon stabilizing distillation columns for making liquefied nitrogen; pressure stabilization is necessary to optimize the air-separation unit when the throttle feed flow is exposed to a thermal disturbance caused the air cleaning absorbers switching to parallel operation. The research team tested a TKDS-100V gas production station and ran simulations in MATLAB/Simulink to identify the patterns in the pressure in the nitrogen-producing distillation column. The paper thus substantiates a method for pressure stabilization, which is based on temporary cessation of distillate outtake.

Keywords: energy-saturated units, thermal disturbances, pressure stabilization, air rectification, nitrogen production, simulation modeling.

References

1. Perry R.H, Green D.W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill, N.-Y., 2008. 2728 p.
2. Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom. Dr.-Ing. E.h. Helmuth Hausen em. Professor der Technischen Universität Hannover. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1976. DOI: 10.1007/978-3-642-88686-7_3
3. Kirsanov Ju.A. *Ciklicheskie teplovye processy i teoriya teploprovodnosti v regenerativnykh vozduhopodogrevatelyakh* [Cyclic Thermal Processes and the Theory of Heat Conductivity in Regenerative Airheaters]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 240 p.
4. Yoon S.Y., Choi B.S., Ahn J.H., Kim T.S. Improvement of Integrated Gasification Combined Cycle Performance Using Nitrogen from the Air Separation Unit as Turbine Coolant. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 151, pp. 163–175. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.110
5. Chen S., Dong X., Xu J., Zhang H., Gao Q., Tan C. Thermodynamic Evaluation of the Novel Distillation Column of the Air Separation unit with Integration of Liquefied Natural Gas (LNG) Regasification. *Energy*, 2019, vol. 171, pp. 341–359. DOI: 10.1016/j.energy.2018.12.220
6. Zaharov M.K., Moiseeva V.D. [Multicolumn Rectification as a Way of Energy Saving at Division the Zeotropic of Binary Systems]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical Industry], 2003, no. 9, pp. 35–42. (in Russ.)
7. Arharov A.M., Beljakov V.P. *Kriogennye sistemy. T.2. Osnovy proektirovaniya apparatov, ustanovok i system* [Cryogenic Systems. Vol. 2. Bases of Design of Devices, Installations and Systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999. 719 p.
8. Narinskiy G.B. *Rektifikaciya vozdukha* [Air Rectification]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 248p.
9. Kokarev A.M., Gunin A.L., Slyusarev M.I. [Analysis of Work of the Airdividing TKDS-100 B Installation in the Mode of Receiving Liquid Nitrogen] *Aviakosmicheskie tehnologii: trudy VIII mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. i shkoly molodykh uchennykh, aspirantov i studentov* [Aerospace Technologies. Works VIII International Scientific and Technical Conference and Schools of Young Scientists, Graduate Students and Students]. Voronezh, 2017, pp. 167–172. (in Russ.)
10. Skogestad S. Dynamics and Control of Distillation columns – a Critical Survey. *Modeling, Identification and Control*, 1997, vol. 18, no. 3, pp. 177–217. DOI: 10.4173/mic.1997.3.1
11. Choe Y.-S. Rigorous Dynamic Models of Distillation Columns. *MSE Thesis*, Bethlehem, Lehigh University, 1985, p. 73.
12. Roffel B., Betlem B.H.L., de Ruijter J.A.F. First Principles Dynamic Modeling and Multivariable Control of a Cryogenic Distillation Process. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, vol. 24, pp. 111–123. DOI: 10.1016/S0098-1354(00)00313-6

13. Luyben W.L. *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*. McGraw-Hill, 1999, 741 p.
14. Zhu G.Y., Henson M.A., Megan L. Low-Order Dynamic Modeling of Cryogenic Distillation Columns Based on Nonlinear Wave Phenomenon. *Separation and Purification Technology*, 2001, vol. 24, pp. 467–487. DOI: 10.1016/S1383-5866(01)00147-2
15. Khvostov A.A., Zhuravlev A.A., Slyusarev M.I., Vorobyov A.A. [Calculating the Coefficient of Relative Volatility for Nitrogen-Oxygen Mix from Experimental Data]. *Novoe v tekhnologii i tekhnike funkcional'nykh produktov pitaniya n osnov emediko-biologicheskikh vozzreniy: mater. VI Mezhdunar. nauch.-tekh. konf.* [Novelties in Technology and the Equipment of Functional Food on the Basis of Medicobiological Views: Mater. the VI Mezhdunar. Scientific and Technical Conference]. Voronezh, 2017, pp. 987–991. (in Russ.)
16. Ramm V.M. *Absorbciya gazov* [Absorption of Gases]. 2nd ed. Moscow, Himija Publ, 1976. 656p.
17. Borzenko E.I., Zaytsev A.V. *Ustanovki i sistemy nizkotemperaturnoy tekhniki. Avtomatizirovannyi raschet i modelirovanie processov kriogennykh ustanovok i sistem* [Installations and Systems of the Low-Temperature Equipment. Computer-Aided Design and Modeling of Processes of Cryogenic Installations and Systems], St. Petersburg, SPbGUNIPT Publ, 2006. 232 p.
18. Akulov L.A., Borzenko E.I., Novotel'nov V.N., Zaytsev A.V. *Teplofizicheskie svoystva krioproduktov* [Thermophysical Properties of Cryoproducs]. St. Petersburg, Polyequipment Publ, 2012. 243 p.
19. Romankov P.G., Frolov V.F., Flisyuk O.M. *Metody rascheta processov i apparatov himicheskoy tekhnologii* [Methods for Design of Processes and Devices in Chemical Industry]. St. Petersburg, Himizdat Publ, 2009. 544 p.
20. Robert C. Reid, John M. Prausnitz and Thomas K. Sherwood. *The Properties of Gases and Liquids*. Third Edition. McGraw-Hill, 1977. 688 p. DOI: 10.1002/aic.690240634

Received 27 July 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ряжских, В.И. Стабилизация давления в ректификационной колонне транспортабельной газодобывающей станции при получении азота / В.И. Ряжских, А.М. Кокарев, М.И. Слюсарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 5–12. DOI: 10.14529/power190301

FOR CITATION

Ryazhskikh V.I., Kokarev A.M., Slyusarev M.I. Pressure Stabilization in the Distillation Column of a Transportable Gas Station for Nitrogen Production. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 5–12. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190301
