

## ДЕСТАБИЛИЗАЦИОННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОДСИСТЕМЫ РЕКТИФИКАЦИИ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОГО ПОЛУЧЕНИЯ АЗОТА, КИСЛОРОДА И АРГОНА

Д.Ю. Муромцев<sup>1</sup>

А.Н. Грибков<sup>1</sup>

И.А. Зауголков<sup>2</sup>

И.В. Тюрин<sup>1</sup>

В.Н. Шамкин<sup>1</sup>

mdjur@mail.ru

gribkovalexey@yandex.ru

intep64@gmail.com

tyrinilja@yandex.ru

shamkin-v@mail.ru

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», г. Тамбов, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрена задача энергосберегающего управления крупной установкой разделения воздуха низкого давления с турбодетандером, предназначенной для одновременного получения азота, кислорода и аргона, работающей при переменной производительности на интервале времени, когда потребность в продуктах разделения воздуха неоднократно меняется. Цель исследования — повышение эффективности функционирования воздуходелительной установки с точки зрения минимизации энергетических затрат по разделению воздуха с помощью алгоритмов дестабилизационной оптимизации режимов работы ее подсистемы ректификации, являющейся ключевой в установке. Приведена авторская «концепция дестабилизации», заключающаяся в расширении области допустимых решений задачи путем замены в ее постановке некоторых ограничений типа равенств ограничениями неравенств, что в технологическом отношении эквивалентно целенаправленному изменению некоторых параметров в допустимых пределах вместо их стабилизации, благодаря чему возможно получение дополнительного эффекта. Применены разработанные авторами методы и алгоритмы управления объектом, предусматривающие всевозможный характер изменения производительности различных целевых продуктов раз-

### Ключевые слова

*Дестабилизационная оптимизация, интервал времени функционирования, подсистема ректификации воздуходелительной установки, переменная производительность, управляющее воздействие*

деления воздуха при линейной зависимости критерия оптимальности от дополнительных управляющих воздействий, появляющихся в результате дестабилизации. На конкретном примере продемонстрировано применение алгоритмов дестабилизационного управления для решения задачи оптимизации режимов подсистемы ректификации установки разделения воздуха на некотором интервале времени с оценкой полученного эффекта. Используя предлагаемый подход и внося конструктивные изменения в существующее оборудование подсистемы ректификации воздухоразделительной установки можно заметно увеличить получаемый эффект. В полной мере дестабилизация может быть применена к другим сложным технологическим объектам, в которых присутствуют емкости жидкости и в определенных пределах допустимо изменение их уровней

Поступила 12.07.2019

© Автор(ы), 2019

---

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-08-00457*

**Введение.** Самым экономичным и наиболее распространенным промышленным способом получения газообразных продуктов является низкотемпературная ректификация воздуха, осуществляемая в воздухоразделительных установках (ВРУ).

Решению различных вопросов, связанных с исследованием ВРУ, в последние годы посвящен ряд публикаций, среди которых отметим работы [1–16]. Эти публикации условно можно объединить по нескольким тематическим группам.

Состояние и перспективы развития кислородного и криогенного машиностроения анализируются в [1]; характеристика продуктов разделения воздуха, их производство и применение дается в [2]; ключевая роль кислородных ВРУ в реализации новых технологий производства энергии с полным улавливанием  $\text{CO}_2$  отмечается в [3]; увеличение производства жидкого кислорода в ВРУ среднего давления демонстрируется в [4]; эффективные жидкостные ВРУ средней производительности на основе детандер-компрессорных агрегатов с двухступенчатым расширением воздуха описываются в [5]. Наконец, в [6] обсуждаются принципы накопительной ректификации и возможности ее использования в технологии низкотемпературного разделения воздуха [7–10]; энергетические затраты в установках разделения воздуха сопоставляются в [7]; автоматическое

обеспечение энергосберегающих режимов работы блоков комплексной очистки воздуха ВРУ предлагается в [8]; резервы повышения эффективности производства неонгелиевой смеси в ВРУ низкого давления выявляются в [9], а в [10] проводится анализ способов регулирования производительности ВРУ. Математическая модель ректификационной колонны ВРУ малой производительности и моделирование ВРУ низкого давления как объекта управления приведены в [11, 12]. Из краткого обзора можно сделать следующий вывод: лишь отдельные публикации имеют некоторое отношение к заявленной теме, например [7, 8, 11, 12].

Следует отметить, что до 90 % используемых продуктов разделения воздуха получается на установках большой производительности, среди которых особое место принадлежит установкам для совместного производства азота, кислорода и аргона, организуемым по схеме, в которой применен цикл низкого давления с турбодетандером. В качестве технологического объекта исследования выбрана ВРУ АКАр-9 — установка низкого давления для получения газообразных чистого азота (с концентрацией  $\leq 0,0005$  %  $O_2$ ), технического кислорода (с концентрацией  $\geq 99,5$  %  $O_2$ ) и чистого аргона (с концентрацией  $\geq 99,992$  %  $Ar$ ), позволяющая получать упомянутые продукты и в жидком виде. Установка работает в условиях переменной производительности, когда потребность в целевых продуктах разделения воздуха меняется.

Далее используются результаты исследований, которые приведены в следующих публикациях:

- в [13] введены основные понятия и сформулирована задача дестабилизационной оптимизации, поставлена, теоретически обоснована и решена линейная двухуровневая многомерная задача оптимизации технологического объекта, функционирующего с переменной производительностью выпускаемой продукции, его производительность меняется дважды;

- в [14] приведена формализованная постановка линейной многоуровневой задачи управления такими объектами при неоднократном изменении заданий по их производительности, показано, что задача может быть декомпозирована на совокупность линейных  $n$ -уровневых одномерных задач, сформулирована одна из них, которая сведена к более приемлемой, с точки зрения ее последующего решения, тождественной задаче;

- в [15] проведено теоретическое обоснование решения линейной  $n$ -уровневой одномерной задачи;

- в [16] описан алгоритм дестабилизационного управления многомерными технологическими объектами при неоднократном изменении

их производительности на длительном интервале времени и дана геометрическая иллюстрация алгоритма.

**Анализ подсистемы ректификации как объекта оптимизации.** Процесс разделения воздуха очень энергозатратен, причем в установках низкого давления для получения газообразных продуктов большая часть затрат электрической энергии связана не с покрытием холодопотерь в блоке охлаждения-очистки, а с обеспечением процесса разделения воздуха (85...90 % затрат энергии), осуществляемого в подсистеме ректификации. Поскольку основная экономия электрической энергии может быть достигнута именно здесь, то естественно рассмотреть в качестве объекта оптимизации именно эту подсистему (рис. 1).

Принята следующая система обозначений. Аппараты обозначаются аббревиатурами: НК — нижняя колонна; ВК — верхняя колонна; КС — колонна сырого аргона; КЧ — колонна чистого аргона; П (П1, П2) — подогреватель-переохладитель (первый, второй); К — конденсатор-испаритель; КВ — конденсатор-испаритель верхний; КН — конденсатор-испаритель нижний; ОК — основные конденсаторы-испарители; Т — теплообменник аргонный; С — сепаратор; УТ — установка технического аргона.

Потоки (расходы потоков) газов (паров) и жидкостей обозначаются соответственно латинскими буквами  $V$  и  $G$  с подстрочными и надстрочными индексами, в которых используются буквы русского алфавита и арабские цифры. При этом следует различать потоки: входящие в подсистему ректификации, выходящие из нее и внутренние потоки подсистемы. Обозначения входных и выходных потоков на схеме взяты в кружок, они могут не иметь надстрочных индексов. Нижний индекс обозначает название потока: ар — аргонный; д — детандерный; фл — флегмы и т. д. Верхний индекс — название аппарата, из которого этот поток выходит: вк — из верхней колонны; кс — из колонны сырого аргона и т. д. Если какое-либо вещество из аппарата направляется в несколько аппаратов, то к буквенному надстрочному обозначению потоков через запятую добавляется цифра: ки, 2 — второй поток из конденсатора-испарителя; ок, 1 — первый поток из основных конденсаторов и т. д.

Особенностями подсистемы являются сложность и взаимосвязанность процессов, протекающих в ней, вследствие значительного числа технологических аппаратов и наличия обратных потоков между ними. К тому же подсистема характеризуется большим числом переменных состояния, многие из которых не измеряются, что делает объект не вполне наблюдаемым. Особенность состоит и в возможности получения на установке нескольких целевых продуктов определенного качества в газовом и

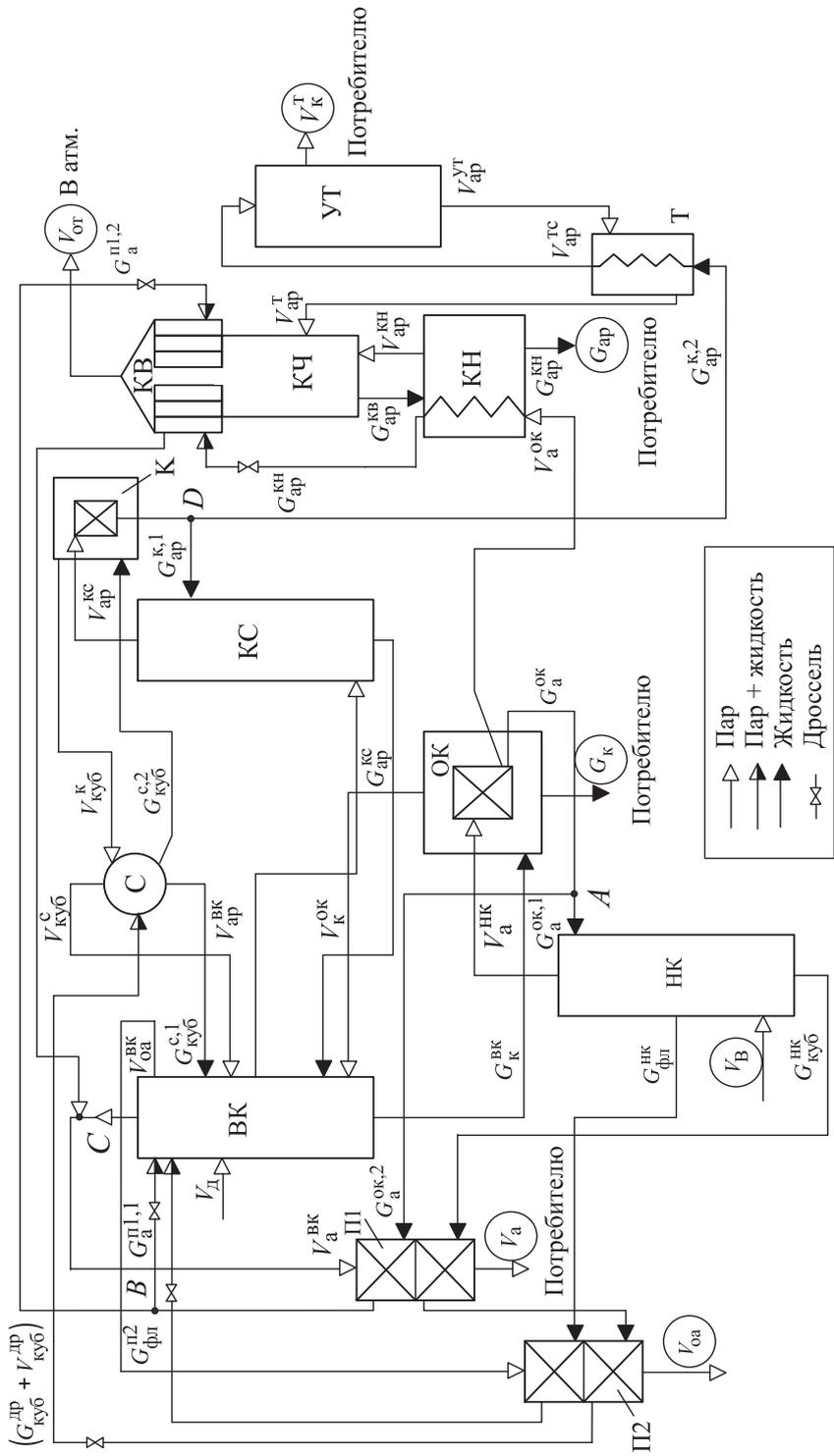


Рис. 1. Принципиальная схема подсистемы ректификации ВРУ АКАр-9

газожидкостном режиме: 1 — газообразные азот и кислород, жидкий аргон; 2 — газообразные азот, кислород и аргон; 3 — жидкий азот, газообразные кислород и аргон. Но главной особенностью функционирования подсистемы является изменяющаяся потребность заказчика в продуктах разделения воздуха. И поскольку более общим для подсистемы ректификации является режим 1, из которого можно получить режим 2, а из него, в свою очередь, и режим 3, то в дальнейшем рассматривается именно режим 1.

В качестве возмущающих переменных в подсистеме выступают расходы целевых продуктов разделения:  $V_a$  — чистого азота,  $V_k$  — технического кислорода,  $G_{ар}$  — жидкого чистого аргона, характеризующие изменяющуюся производительность установки по продуктам разделения, обусловленную заявками потребителей. Таким образом, вектор возмущений  $F$  записывается в виде

$$F = (V_a, V_k, G_{ар}). \quad (1)$$

Выходными переменными подсистемы являются концентрации целевых продуктов разделения, характеризуемые процентным содержанием кислорода:  $y_{a,1}$  — в чистом азоте и  $y_{k,1}$  — в техническом кислороде, а также процентным содержанием аргона в чистом жидком аргоне  $x_{ар,2}$ . Соответственно вектор выходных переменных имеет вид

$$Y = (y_{a,1}, y_{k,1}, x_{ар,2}). \quad (2)$$

В качестве варьируемых переменных, изменение которых влияет на технологический процесс, используются расходы:  $V_v$  — воздуха в НК;  $V_d$  — детандерного воздуха в ВК;  $G_{куб}^{п2}$  — кубовой жидкости;  $G_a^{п2}$  — чистой азотной флегмы в ВК;  $G_{фл}^{п2}$  — грязной азотной флегмы;  $G_{ар}^{кв}$  — сырого аргона;  $V_{ар}^t$  — технического аргона;  $V_{оа}$  — отбросного азота,  $V_{от}$  — отдувочных паров. Однако не все переменные можно независимо изменять, поскольку в установившемся режиме работы установки должны выполняться в аппаратах балансовые соотношения по массе и теплу, соответственно, из которых значения ряда переменных и определяются. Например, значения расходов находятся следующим образом:  $G_{куб}^{п1} = G_{куб}^{нк}$  — из уравнения материального баланса НК;  $V_{оа}$  — из уравнения материального баланса комплекса НК, ВК и КС;  $V_d$  — из уравнения теплового баланса ВРУ в целом;  $V_{ар}^t$  — из уравнения материального покомпонентного баланса УТ;  $V_{от}$  — из уравнения материального баланса КЧ.

Все упомянутые переменные зависят от других переменных, а именно от расходов  $V_B$ ,  $G_{\text{фл}}^{\text{п1}}$ ,  $G_a^{\text{п2}}$ ,  $G_{\text{ар}}^{\text{кв}}$ , значения которых можно менять в некоторых пределах по своему усмотрению, и которые влияют на изменение выходных переменных (2). Именно эти расходы являются управляющими воздействиями, а значит, вектор управлений имеет вид

$$U = (V_B, G_{\text{фл}}^{\text{п1}}, G_a^{\text{п2}}, G_{\text{ар}}^{\text{кв}}). \quad (3)$$

Эффективность ведения технологического процесса разделения воздуха характеризуется целевой функцией  $\Theta(U)$ , определяющей переменную составляющую в затратах электроэнергии на разделение воздуха, значение которой минимизируется в процессе решения задачи оптимизации режимов, соответствующих заданиям по производимым продуктам.

Следует отметить, что при традиционном подходе к решению такой задачи на интервале времени, когда заданной производительности по продуктам разделения соответствует свой оптимальный технологический режим, выполняются материальные балансы как в отдельных аппаратах, так и подсистеме в целом. А признаком балансов является постоянство уровней жидкости в отдельных аппаратах, где она имеется.

**Постановка задачи статической оптимизации режимов работы подсистемы ректификации.** Рассматривается задача оптимизации подсистемы ректификации в условиях, когда потребность в продуктах разделения воздуха на некотором достаточно большом интервале времени  $[0, T]$  может неоднократно изменяться. Предполагается работа установки по схеме компрессор–ВРУ, которая позволяет обеспечить изменение производительности по получаемым продуктам в достаточно широком диапазоне. Считается, что время перехода установки разделения с одного технологического режима на другой пренебрежимо мало по сравнению с временем ее работы в установившихся условиях, соответствующих заданным режимам потребления.

В качестве критерия оптимизации используются затраты энергии на сжатие воздуха в компрессоре, вычисляемые по формуле

$$\Theta = k V_B^y \lg \frac{P_B^y}{P_0}, \quad (5)$$

где  $k$  — некоторый коэффициент пропорциональности;  $V_B^y$  — расход воздуха, поступающего в установку;  $P_0, P_B^y$  — давление воздуха на входе в компрессор и установку.

Поскольку установка работает по схеме компрессор–ВРУ, то давление  $P_B^Y$  не является независимой переменной, его величина определяется расходом  $V_B^Y$  и гидравлическим сопротивлением  $\Delta P^Y$  установки. Кроме того, предполагается, что  $V_B^Y = V_B + V_D$  и потери давления воздуха в блоке охлаждения-очистки известны.

При решении задачи статической оптимизации используется математическая модель подсистемы ректификации, характеризующая зависимость вектора  $Y$  выходных переменных от векторов  $F$  возмущающих и  $U$  управляющих воздействий, представленная в виде

$$Y = M(F, U), \quad (6)$$

где  $M$  — оператор математической модели.

Технологические ограничения на компоненты векторов  $Y$ ,  $F$  и  $U$  отражаются системой неравенств

$$\underline{Y} \leq Y \leq \bar{Y}_l, \quad l = \overline{1, 3}; \quad \underline{F}_m \leq F \leq \bar{F}_m, \quad m = \overline{1, 3}; \quad \underline{U}_n \leq U \leq \bar{U}_n, \quad n = \overline{1, 3}, \quad (7)$$

где  $l$ ,  $m$ ,  $n$  — индексы компонентов векторов  $Y$ ,  $Z$ ,  $U$ ; знак «—» над буквой означает наибольшее значение соответствующей переменной, а под буквой — ее наименьшее значение.

Режим работы установки, обеспечивающей производство продуктов разделения воздуха в нужном количестве и качестве, определяется соотношениями

$$V_a \geq V_a^3; \quad V_k \geq V_k^3; \quad G_{ap} \geq G_{ap}^3; \quad y_{a,1} \leq y_{a,1}^3; \quad y_{k,1} \geq y_{k,1}^3; \quad x_{ap,2} \geq x_{ap,2}^3, \quad (8)$$

где  $V_a^3$ ,  $V_k^3$ ,  $G_{ap}^3$  — заданные расходы газообразных чистого азота  $V_a$  и технического кислорода  $V_k$ , жидкого чистого аргона  $G_{ap}$ ;  $y_{a,1}^3$ ,  $y_{k,1}^3$ ,  $x_{ap,2}^3$  — заданные концентрации кислорода в газообразном чистом азоте и кислорода в газообразном техническом кислороде, аргона в жидком чистом аргоны соответственно.

Задача статической оптимизации режимов работы подсистемы ректификации формулируется следующим образом.

Для каждого требуемого режима потребления, характеризуемого отборами  $V_a^3$ ,  $V_k^3$ ,  $G_{ap}^3$  целевых продуктов и их концентрациями  $y_{a,1}^3$ ,  $y_{k,1}^3$ ,  $x_{ap,2}^3$ , необходимо найти такие управления

$$\dot{U} = (\dot{V}_B, \dot{G}_a^{п1,1}, \dot{G}_{фл}^{п2}, \dot{G}_{ap}^{к2}), \quad (9)$$

называемые оптимальными, которые минимизируют критерий (5) при соблюдении уравнений связи в виде модели (6), технологических ограничений (7) и ограничений на количество и качество (8) получаемых продуктов.

Другими словами, при каждом новом режиме потребления, задаваемом расходами и концентрациями продуктов разделения, следует найти вектор  $\bar{U}^*$ , такой, чтобы затраты энергии  $\mathcal{E}$  на сжатие воздуха в компрессоре были минимальными, т. е.

$$\bar{U}^* = \arg \min_{U \in U} \mathcal{E}(U), \quad (10)$$

где  $U$  — область допустимых управлений (ОДУ), определяемая как множество

$$U = \left\{ U : \underline{V}_v \leq V_v \leq \bar{V}_v, \underline{G}_a^{п1} \leq G_a^{п1} \leq \bar{G}_a^{п1}, \underline{G}_{фл}^{п2} \leq G_{фл}^{п2} \leq \bar{G}_{фл}^{п2}, \underline{G}_{ар}^{к2} \leq G_{ар}^{к2} \leq \bar{G}_{ар}^{к2} / \right. \\ \left. V_a \geq V_a^3, V_k \geq V_k^3, G_{ар} \geq G_{ар}^3; 0 \leq y_{a,1} \leq y_{a,1}^3, y_{k,1}^3 \leq y_{k,1} \leq 1, x_{ар,2}^3 \leq x_{ар,2} \leq 1 \right\}. \quad (11)$$

Технологические ограничения (7) типа неравенств формально можно дополнить ограничениями типа равенств

$$L_{куб}^{НК} = \text{const}, L_K^{БК} = \text{const}, L_{ар}^{КЧ} = \text{const}, L_{куб}^K = \text{const}, L_a^{КВ} = \text{const}, \quad (12)$$

где  $L_{куб}^{НК}$ ,  $L_K^{БК}$ ,  $L_{ар}^{КЧ}$ ,  $L_{куб}^K$ ,  $L_a^{КВ}$  — уровни кубовой жидкости в НК, жидкого кислорода в ВК, жидкого аргона в КЧ, кубовой жидкости в К, жидкого азота в КВ, характеризующими их постоянство в соответствующих технологических аппаратах.

По формальным соображениям ограничения (12) можно учесть в (11) для ОДУ, однако традиционная постановка задачи статической оптимизации не использует подобные условия, поскольку за ними стоит очевидный факт выполнения материальных балансов в этих аппаратах.

**Постановка задачи дестабилизационной оптимизации режимов работы подсистемы ректификации.** При решении задач дестабилизационной оптимизации на интервале времени не обязательно выполнение материальных балансов [13]. Там, где возможно (по условиям технологии и техники безопасности), снимают требования на постоянство уровней в аппаратах при безусловном обеспечении их изменения в допустимых пределах. Поскольку уровни жидкости перестают быть постоянными,

следует рассматривать их как выходные переменные, характеризующие определенным образом технологический процесс в подсистеме (с точки зрения его стабильности).

В принципе, в подсистеме допустимо снятие трех ограничений на постоянство уровней кубовой жидкости в НК, жидкого аргона в КЧ и жидкого азота в ВК. Следовательно, для  $\forall t \in [0, T]$  должны выполняться следующие неравенства:

$$\underline{L}_{\text{куб}}^{\text{НК}} \leq L_{\text{куб}}^{\text{НК}} \leq \bar{L}_{\text{куб}}^{\text{НК}}, \quad \underline{L}_{\text{ар}}^{\text{КЧ}} \leq L_{\text{ар}}^{\text{КЧ}} \leq \bar{L}_{\text{ар}}^{\text{КЧ}}, \quad \underline{L}_{\text{а}}^{\text{КВ}} \leq L_{\text{а}}^{\text{КВ}} \leq \bar{L}_{\text{а}}^{\text{КВ}}. \quad (13)$$

В результате этого появляются три дополнительных управляющих воздействия: расходы кубовой жидкости из НК  $G_{\text{куб}}^{\text{п}2} = G_{\text{куб}}^{\text{НК}}$ , части чистой азотной флегмы из П1  $G_{\text{а}}^{\text{п}1,1}$  и жидкого азота из КВ  $G_{\text{а}}^{\text{КВ}}$ , значительно «расширяющие» ОДУ. Тем самым создаются потенциальные возможности для улучшения на интервале времени  $[0, T]$  режимов работы подсистемы, а значит, и установки в целом. Теперь совсем не обязательно в каждый момент времени  $t$ , характеризуемый заданным потреблением продуктов разделения, обеспечивать соответствующий ему оптимальный технологический режим. Оптимальные управляющие воздействия, число которых возросло, выбирают из условия минимизации энергетических затрат на всем интервале времени  $[0, T]$ .

Задача дестабилизационной оптимизации режимов работы подсистемы ректификации формулируется следующим образом.

Для требуемого режима потребления, характеризуемого кусочно-постоянными на интервале  $[0, T]$  функциями отборов  $V_{\text{а}}^3(t)$ ,  $V_{\text{к}}^3(t)$ ,  $G_{\text{ар}}^3(t)$  целевых продуктов и значениями их концентраций  $y_{\text{а},1}^3$ ,  $y_{\text{к},1}^3$ ,  $x_{\text{ар},2}^3$ , необходимо найти вектор-функцию управляющих воздействий

$$\hat{U}^*(t) = \left( V_{\text{в}}^*(t), G_{\text{а}}^{\text{п}1}(t), G_{\text{фл}}^{\text{п}1}(t), G_{\text{ар}}^{\text{к},2}(t), G_{\text{куб}}^{\text{п}1}(t), G_{\text{а}}^{\text{п}1,2}(t), G_{\text{а}}^{\text{КВ}}(t) \right), \quad (14)$$

называемую оптимальной, при которой на интервале времени  $[0, T]$  затраты энергии минимальны, т. е.

$$\hat{U}^*(t) = \arg \min_0^T \int \Theta(\hat{U}(t)) dt, \quad \hat{U}(t) \subseteq \hat{U}, \quad (15)$$

для  $\forall t \in [0, T]$  выполняются технологические ограничения (7), ограничения на количество и качество получаемых продуктов разделения (8), а также ограничения (13) на уровни в соответствующих аппаратах.

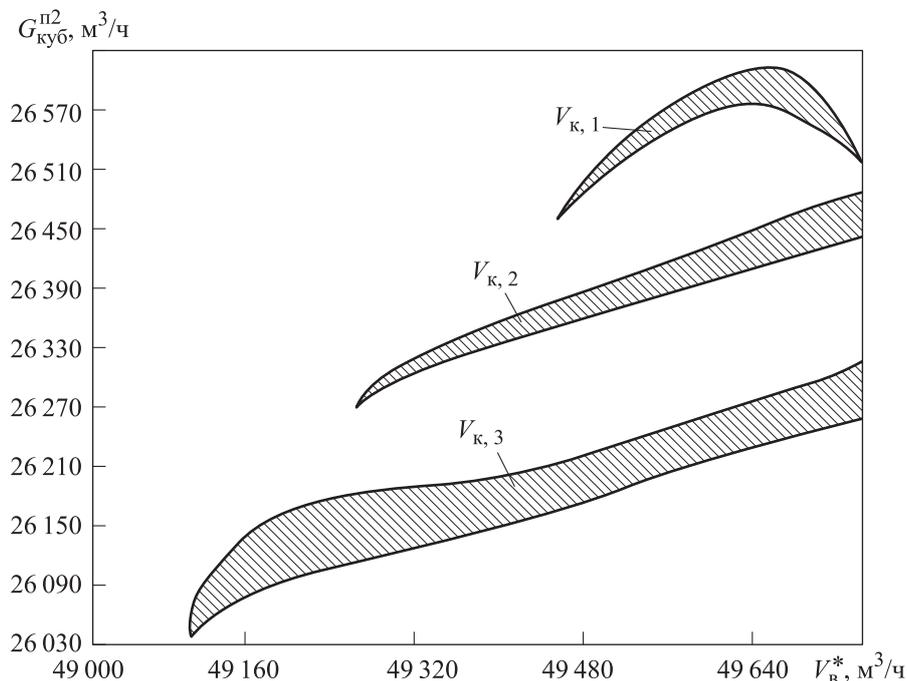
В выражении (15) новая область допустимых управлений  $\hat{U}$  определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{U} = \{ & \underline{G}_{\text{ap}}^{\text{к},2} \leq G_{\text{ap}}^{\text{к},2}(t) \leq \bar{G}_{\text{ap}}^{\text{к},2}, \quad \underline{G}_{\text{куб}}^{\text{п}2} \leq G_{\text{куб}}^{\text{п}2}(t) \leq \bar{G}_{\text{куб}}^{\text{п}2}, \\ & \underline{G}_{\text{a}}^{\text{п}1,2} \leq G_{\text{a}}^{\text{п}1,2}(t) \leq \bar{G}_{\text{a}}^{\text{п}1,2}, \quad \underline{G}_{\text{a}}^{\text{кв}} \leq G_{\text{a}}^{\text{кв}}(t) \leq G_{\text{a}}^{\text{кв}} / V_{\text{a}}(t) \geq V_{\text{a}}^3(t), \\ & V_{\text{к}}(t) \geq V_{\text{к}}^3(t), \quad G_{\text{ap}}(t) \geq G_{\text{ap}}^3(t), \\ & 0 \leq y_{\text{a},1} \leq y_{\text{a},1}^3, \quad y_{\text{к},1}^3 \leq y_{\text{к},1} \leq 1, \quad x_{\text{ap},2}^3 \leq x_{\text{ap},2} \leq 1, \\ & \underline{L}_{\text{куб}}^{\text{нк}} \leq L_{\text{куб}}^{\text{нк}}(t) \leq \bar{L}_{\text{куб}}^{\text{нк}}, \\ & \left. \underline{L}_{\text{ap}}^{\text{кч}} \leq L_{\text{ap}}^{\text{кч}}(t) \leq \bar{L}_{\text{ap}}^{\text{кч}}, \quad \underline{L}_{\text{кв}}^{\text{вкн}} \leq L_{\text{кв}}^{\text{вкн}}(t) \leq \bar{L}_{\text{кв}}^{\text{вкн}} \right\}. \end{aligned} \quad (16)$$

Следует отметить эквивалентность задач статической (7)–(12) и дестабилизационной (7), (8), (13)–(16) оптимизации для случая, когда в (14)–(16) вместо вектора управляющих воздействий  $\hat{U}(t)$  используется вектор  $U(t)$  и, следовательно, восстанавливаются ограничения вида (12) на уровни в соответствующих ректификационных колоннах. Решить задачу дестабилизационной оптимизации здесь то же самое, что многократно решить задачу статической оптимизации для всех интервалов времени внутри  $[0, T]$ , на которых потребность в целевых продуктах разделения задана и неизменна.

Решение сформулированных ранее задач предполагает знание статических свойств подсистемы ректификации в широком диапазоне изменения производительности установки по продуктам разделения. Это позволяет выявить ее поведение на разных технологических режимах и возможность получения на интервале времени  $[0, T]$  дополнительного экономического эффекта от использования режима дестабилизации. Последняя определяется в первую очередь видом зависимостей подынтегральной функции  $\mathcal{E}(\hat{U}(t))$  в (15) от вновь введенных управляющих воздействий  $G_{\text{куб}}^{\text{п}2}$ ,  $G_{\text{a}}^{\text{п}1,1}$  и  $G_{\text{a}}^{\text{кв}}$ .

**Анализ возможностей дестабилизационной оптимизации подсистемы ректификации.** Разнообразные искомые зависимости получены с помощью вычислительного эксперимента по разработанной математической модели статики подсистемы ректификации. Часть из них приведена далее. Так, на рис. 2 показано изменение в плоскости  $V_{\text{в}} - G_{\text{куб}}^{\text{п}2}$  положения, формы и размеров сечений ОДУ, характеризующихся штриховкой, при отборах азота  $V_{\text{a}} = 10\,360 \text{ м}^3/\text{ч}$  и аргона  $G_{\text{ap}} = 332,6 \text{ м}^3/\text{ч}$  и различных отборах кислорода  $V_{\text{к}} = 11\,250, 11\,300, 11\,350 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

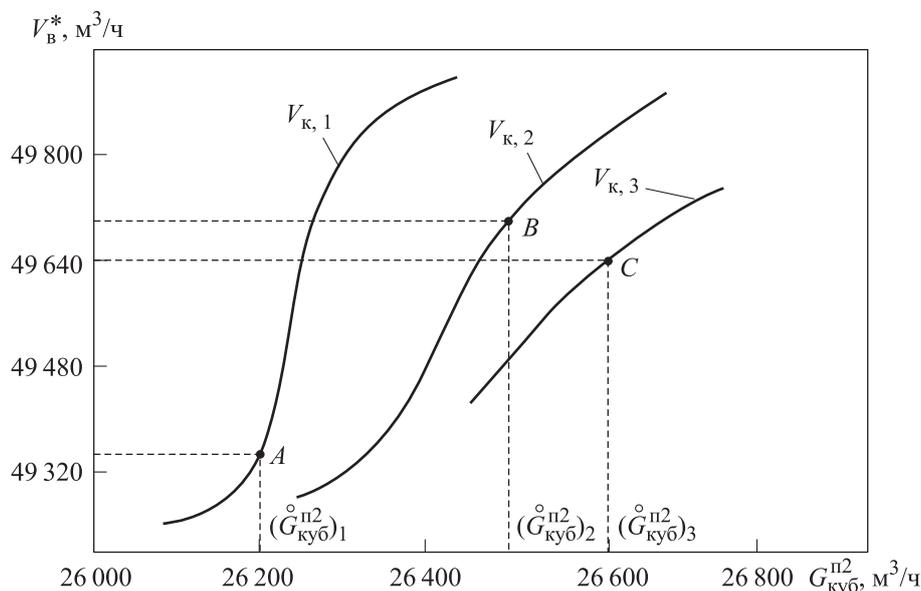


**Рис. 2.** Изменение положения, формы и размеров сечения ОДУ в плоскости  $V_B - G_{куб}^{п2}$  при  $V_a = 10\,360\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $G_{ар} = 332,6\text{ м}^3/\text{ч}$  и  $V_{к,1} = 11\,250\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $V_{к,2} = 11\,300\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $V_{к,3} = 11\,350\text{ м}^3/\text{ч}$

Дополнительно к управлениям, входящим в вектор управлений (9), здесь использовался расход  $G_{куб}^{п2}$ , значения которого в процессе поиска изменялись, а значения расходов  $G_a^{п1,2}$  и  $G_a^{кв}$  принимались такими, при которых обеспечивались соответствующие материальные балансы.

Из рис. 2 следует, что при конкретном отборе  $V_K$  минимум расхода воздуха, а, следовательно, и минимум расхода энергии достигается на левой границе сечений в ОДУ в точках, где пересекаются линии равного уровня концентраций  $y_{к,1} = 99,5\% \text{ O}_2$  и  $x_{ар,2} = 99,992\% \text{ Ar}$ . Характер изменения областей свидетельствует о том, что варьировать управлениями  $V_B$  и  $G_{куб}^{п2}$  надо так, чтобы не выйти за границы сечения, при этом с ростом отбора  $V_K$  размеры сечений уменьшаются.

Зависимости оптимального расхода  $V_B^*$  от расхода  $G_{куб}^{п2}$  приведены на рис. 3 в виде семейства параметрических кривых, где в качестве параметра используется  $V_K$ . При этом обеспечивается получение требуемых отборов азота  $V_a = 10\,360\text{ м}^3/\text{ч}$  и аргона  $G_{ар} = 332,6\text{ м}^3/\text{ч}$  при различных



**Рис. 3.** Зависимости оптимального  $V_B^*$  от дополнительного управления  $G_{\text{куб}}^{\text{п2}}$  при  $V_a = 10\,360 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $G_{\text{ар}} = 332,6 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $V_{\text{к},1} = 11\,250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $V_{\text{к},2} = 11\,300 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $V_{\text{к},3} = 11\,350 \text{ м}^3/\text{ч}$

отборах кислорода  $V_{\text{к}} = 11\,250, 11\,300, 11\,350 \text{ м}^3/\text{ч}$ , удовлетворяющих требованиям по качеству (концентрациям). Эти зависимости, соответствующие различным значениям  $V_{\text{к}}$ , можно считать близкими к линейным в окрестностях точек A, B и C, которые характеризуют оптимальные статические режимы, обеспечивающие получение необходимого количества целевых продуктов. При значениях расходов с обозначением  $\overset{\circ}{G}_{\text{куб}}^{\text{п2}}$  имеют место материальные балансы в НК, причем с увеличением  $V_{\text{к}}$  угол наклона прямолинейных участков к оси  $G_{\text{куб}}^{\text{п2}}$  уменьшается.

Следует отметить, что анализ рис. 3 безотносительно к задаче дестабилизационной оптимизации не имеет смысла. Действительно, за исключением точек A, B и C, для которых имеют место материальные балансы и существуют статические режимы, для всех остальных точек такие режимы стабильно не могут существовать длительное время. Действительно, если выставить расход  $G_{\text{куб}}^{\text{п2}} \neq \overset{\circ}{G}_{\text{куб}}^{\text{п2}}$ , то вскоре куб НК либо опустошится, либо нижние тарелки колонны окажутся залитыми кубовой жидкостью, что недопустимо. При поиске нового значения  $G_{\text{куб}}^{\text{п2}}$  в задаче дестабилизационной оптимизации необходимо учитывать изменение уровня в кубе и тот факт, что в  $\forall \in [0, T]$  должно выполняться ограничение

$\underline{L}_{\text{куб}}^{\text{нк}} \leq L_{\text{куб}}^{\text{нк}}(t) \leq \bar{L}_{\text{куб}}^{\text{нк}}$  на его изменение. Вопрос о том, в каком диапазоне допустимо изменение  $G_{\text{куб}}^{\text{п2}}$ , зависит в значительной степени от режима потребления целевых продуктов, величины  $T$  и промежутка времени на  $[0, T]$ , где режим действует. Проведена оценка влияния на подинтегральную функцию  $\mathcal{E}(\hat{U}(t))$  в (15) и других дополнительных управлений — расходов  $G_{\text{а}}^{\text{п1,2}}$  и  $G_{\text{а}}^{\text{кв}}$ .

**Дестабилизационная оптимизация режимов подсистемы ректификации.** При решении сформулированной задачи дестабилизационной оптимизации режимов подсистемы на интервале времени  $[0, T]$  необходимо использовать алгоритмы, разработанные авторами и представленные в [13–16]. В общем случае речь идет об алгоритмах дестабилизационного управления многомерными технологическими объектами, производящими несколько целевых продуктов, при неоднократном изменении их производительности на интервале  $[0, T]$ .

В частности, при описании рассматриваемого далее примера использован алгоритм, основанный на выражениях теоремы [13], приведенной ниже.

**Основная теорема.** Рассматривается случай, когда возмущающее воздействие  $F(t)$  является периодической (с периодом  $T$ )  $M$ -мерной двухуровневой вектор-функцией, а управляющее воздействие  $u(t)$   $N$ -мерной периодической с тем же периодом двухуровневой вектор-функцией. Считается, что подинтегральная функция  $Q(u, f)$  в функционале  $I$ , характеризующем эффективность управления на интервале времени  $[0, T]$ , представляется семейством параметрических  $N$ -мерных плоскостей, т. е. является линейной относительно управляющих воздействий  $u_n$ ,  $n = 1, N$ . Состояние объекта характеризуется некоторым  $N$ -мерным вектором  $\mu(t)$ , у которого его компоненты  $\mu_n(t)$ ,  $n = 1, N$ , определяют меру нарушения соответствующих балансовых соотношений. Используются следующие сокращения для функций, зависящих от двухуровневого возмущения:

$$\begin{aligned} f(t) &= (\vec{f}_1, \vec{f}_2, t_1): A_1 = a(\vec{f}_1), A_2 = a(\vec{f}_2), B_{n1} = b_n(\vec{f}_1), \\ B_{n2} &= b_n(\vec{f}_2), \beta_{n1} = \beta_n(\vec{f}_1), \beta_{n2} = \beta_n(\vec{f}_2), \omega_{n1}^{\text{H}} = \omega_n^{\text{H}}(\vec{f}_1), \\ \omega_{n1}^{\text{B}} &= \omega_n^{\text{B}}(\vec{f}_1), \omega_{n2}^{\text{H}} = \omega_n^{\text{H}}(\vec{f}_2), \omega_{n2}^{\text{B}} = \omega_n^{\text{B}}(\vec{f}_2). \end{aligned}$$

При двухуровневом периодическом возмущении  $f(t) = (\vec{f}_1, \vec{f}_2, t_1)$  с периодом  $T$  и знакопостоянстве функций  $\beta_n(f)$ ,  $n = 1, N$ , существуют

оптимальные начальные значения  $\mu_n^*(0)$ ,  $n = \overline{1, N}$ , и оптимальное управление  $(\vec{\omega}_1^*, \vec{\omega}_2^*, t_1)$ , являющееся двухуровневой периодической функцией с периодом  $T$ , которые определяются следующим образом.

Если

$$B_{n1} \cdot |\beta_{n2}| - B_{n2} \cdot |\beta_{n1}| < 0, \quad (17)$$

то

$$\mu_n^*(0) = \begin{cases} \mu_n^H, & \text{если } \beta_{n1} > 0; \\ \mu_n^B, & \text{если } \beta_{n1} < 0 \end{cases} \quad (18)$$

и

$$\omega_{n1}^* = \min \left( \omega_{n1}^{пр}; \omega_{n1}^B; -\frac{\beta_{n2}}{\beta_{n1}} \frac{(T-t_1)}{t_1} \omega_{n2}^H \right), \quad \omega_{n2}^* = -\frac{\beta_{n1}}{\beta_{n2}} \frac{t_1}{(T-t_1)} \omega_{n1}^*, \quad (19)$$

где

$$\omega_{n1}^{пр} = \frac{\mu_n^B - \mu_n^H}{|\beta_{n1}| t_1}. \quad (20)$$

Если

$$B_{n1} |\beta_{n2}| - B_{n2} |\beta_{n1}| \geq 0, \quad (21)$$

то

$$\mu_n^*(0) = \begin{cases} \mu_n^B, & \text{если } \beta_{n1} > 0; \\ \mu_n^H, & \text{если } \beta_{n1} < 0; \end{cases} \quad (22)$$

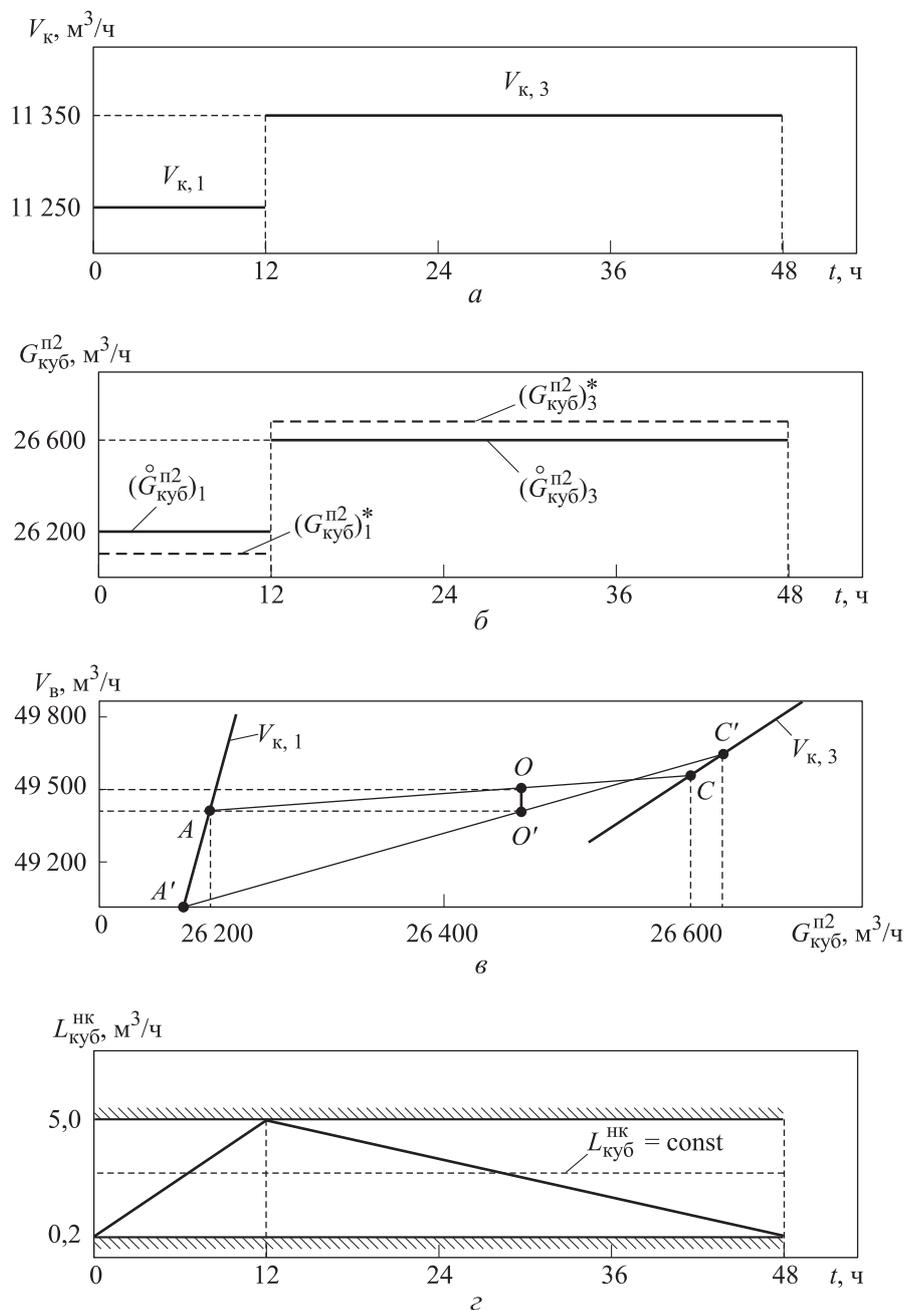
$$\omega_{n1}^* = \max \left( \omega_{n1}^{пр}; \omega_{n1}^H; -\frac{\beta_{n2}}{\beta_{n1}} \frac{(T-t_1)}{t_1} \omega_{n2}^B \right), \quad \omega_{n2}^* = -\frac{\beta_{n1}}{\beta_{n2}} \frac{t_1}{(T-t_1)} \omega_{n1}^*, \quad (23)$$

где

$$\omega_{n1}^{пр} = -\frac{\mu_n^B - \mu_n^H}{|\beta_{n1}| t_1}. \quad (24)$$

При этом функции  $\beta_p(f)$  и  $\beta_q(f)$  могут быть различного знака при  $p \neq q$ .

Геометрическая интерпретация решения задачи дестабилизационной оптимизации для элементарного частного случая, когда на интервале времени потребность в одном из продуктов изменяется один раз и имеется одно управление, приведена на рис. 4. Здесь (рис. 4, а) показан интервал времени  $[0, 48 \text{ ч}]$  работы установки, где в момент  $t_1 = 12 \text{ ч}$  осуществляется ее переключение с режима потребления 1, характеризуемого отборами  $V_{к,1} = 11\,250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $V_{а,1} = 10\,360 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $G_{ап1} = 321,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , на режим



**Рис. 4.** Геометрическая интерпретация задачи дестабилизационной оптимизации подсистемы ректификации на интервале  $[0, 48 \text{ ч}]$ :

$a$  — задание режима потребления целевых продуктов;  $b$  — оптимальные управления — стабилизирующее и дестабилизационное;  $c$  — определение эффекта от дестабилизации;  $d$  — изменение уровня кубовой жидкости

потребления 3 с отборами  $V_{к,3} = 11\,350 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $V_{а,3} = 10\,360 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $G_{ар3} = 321,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . На рис. 4, б приведены реализации на интервале времени оптимальных технологических режимов, при которых обеспечивается производство необходимых продуктов разделения воздуха нужного качества. Точки А и С на соответствующих кривых (см. рис. 3) отвечают управления  $\left(\overset{\circ}{G}_{куб}^{п2}\right)_1$  и  $\left(\overset{\circ}{G}_{куб}^{п2}\right)_3$ , обозначенные сплошными линиями и называемые «стабилизирующими», так как они обеспечивают выполнение равенства  $L_{куб}^{нк} = \text{const}$ . Управления  $\left(\overset{\circ}{G}_{куб}^{п2}\right)_1$ ,  $\left(\overset{\circ}{G}_{куб}^{п2}\right)_3$ , обозначенные штриховыми линиями, называются «дестабилизационными», и при них обеспечивается выполнение неравенства  $\underline{L}_{куб}^{нк} \leq L_{куб}^{нк}(t) \leq \bar{L}_{куб}^{нк}$ .

В нашем случае, согласно приложению  $M = 3$ ,  $N = 1$ , в обозначениях возмущений и управлений индекс  $i$  можно не учитывать. Поэтому коэффициенты, которые характеризуют наклоны зависимостей  $V_v^*$  от  $G_{куб}^{пб}$  для разных потребностей в целевых продуктах обозначены как  $B_1 > 0$ ;  $B_2 > 0$ ;  $B_1 > B_2$ . При этом коэффициенты  $\beta_1 = \beta_2 = I/S$ , где  $S$  — площадь поперечного сечения куба НК, характеризуют множители при интеграле в формуле изменения уровня жидкости в кубе. Диаметр колонны равен 2,4 м, а уровень изменяется от  $\underline{L}_{куб}^{нк} = 0,2 \text{ м}$  до  $\bar{L}_{куб}^{нк} = 2,82 \text{ м}$ .

На рис. 4, в приведены аппроксимированные линейные участки соответствующих оптимальных траекторий, изображенных на рис. 3. Здесь точки А и С имеют тот же самый смысл, а точки А' и С' характеризуют оптимальные дестабилизированные технологические режимы, при которых происходит потребление целевых продуктов 1 и 3. С учетом времени работы установки в заданных режимах потребления точки О и О' обозначают оптимальные на  $[0, T]$  значения расхода  $V_v$  при статической и дестабилизационной оптимизации. Таким образом, в течение 48 ч достигается экономия воздуха  $\Delta V_v$ , характеризуемая отрезком  $OO'$ , а следовательно, и дополнительная экономия энергии. На рис. 4, г показано, как при управлениях  $\left(\overset{\circ}{G}_{куб}^{п2}\right)_1$  на  $[0, t_1]$  и  $\left(\overset{\circ}{G}_{куб}^{п2}\right)_3$  на  $[T_1, t_1]$  увеличивается уровень  $L_{куб}^{нк}$  от своего минимального значения  $\bar{L}_{куб}^{нк}$  в момент времени  $t = 0$  до максимального  $\bar{L}_{куб}^{нк}$  в момент  $t = t_1$ , а затем на  $[t_1, T_1]$  уменьшается до  $\underline{L}_{куб}^{нк}$ . Значение  $L_{куб}^{нк} = \text{const}$ , обозначенное на рисунке штриховой линией, характеризует постоянство этого уровня на  $[0, T]$  при статиче-

ской оптимизации, т. е. при использовании стабилизирующих управлений  $(\overset{\circ}{G}_{\text{куб}}^{\text{п2}})_3$  и  $(\overset{\circ}{G}_{\text{куб}}^{\text{п2}})_1$ .

Аналогичным образом оцениваются эффекты, получаемые от введения дестабилизации режимов и двух других дополнительных управлений — расходов  $G_a^{\text{п1,2}}$  и  $G_a^{\text{кв}}$ , которые далее суммируются с полученными ранее результатами.

Следует отметить, что для рассмотренного примера имеющиеся объемы емкостей в аппаратах подсистемы ВРУ таковы, что говорить о заметном эффекте трудно. Однако при достаточно больших интервалах времени работы и частом изменении потребности в продуктах разделения воздуха эффект возрастает.

Необходимо увеличивать объемы аппаратов, учитывая при этом весь сопутствующий комплекс проблем. Это новая и весьма неординарная задача, требующая дополнительных исследований.

**Заключение.** 1. Сформулирована задача дестабилизационной оптимизации режимов подсистемы ректификации ВРУ АКАр-9, работающей на интервале времени  $[0, T]$  при переменной производительности по целевым продуктам, в которой зависимости оптимальных затрат энергии на разделение воздуха от дополнительных управлений, характеризующих их отклонение относительно значений, стабилизирующих уровни в аппаратах, имеют линейный параметрический вид.

2. Решение задачи дестабилизационной оптимизации режимов подсистемы ректификации проиллюстрировано примером для частного случая при двухуровневом однократном изменении на некотором интервале времени  $[0, T]$  потребности в одном из целевых продуктов с использованием только одного из дестабилизационных управлений, появляющихся в результате эффекта дестабилизации технологических режимов.

3. Для существующей ВРУ с имеющимися конструкциями аппаратов подсистемы ректификации, у которых объемы емкостей с жидкостями сравнительно невелики, при достаточно больших отрезках постоянства времени заданий по продуктам разделения, зависимости затрат энергии от дополнительных управлений на интервале времени  $[0, T]$ , как правило, близки к линейным для каждого конкретного задания по продуктам разделения. В общем случае это не так. Например, при введении специальных емкостей для промежуточного хранения жидкостей допустимый диапазон изменения дополнительных управлений значительно увеличивается, и характер зависимостей может быть иным. Этот случай заслуживает отдельного изучения.

4. На практике при решении сформулированной задачи дестабилизационной оптимизации режимов подсистемы ректификации необходимо оценивать разнообразные факторы: число и размеры емкостей технологических аппаратов, в которых возможно изменение уровней; эффект влияния на критерий оптимальности вводимых дополнительных управлений; период  $[0, T]$  работы установки; диапазон и последовательность изменения потребляемых продуктов разделения; длительность перехода процессов с одних технологических режимов на другие и т. д.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лавренченко Г.К. Состояние и перспективы развития кислородного и криогенного машиностроения. *Технические газы*, 2015, № 6, с. 3–22.
- [2] Лавренченко Г.К. Продукты разделения воздуха: их производство и применение. *Технические газы*, 2016, № 5, с. 3–17.
- [3] Лавренченко Г.К., Копытин А.В. Ключевая роль кислородных ВРУ в реализации новых технологий производства энергии с полным улавливанием  $\text{CO}_2$ . *Технические газы*, 2016, № 6, с. 35–47.
- [4] Захаржевский В.Я., Чоловская М.А. Увеличение производства жидкого кислорода в воздухоразделительных установках среднего давления. *Технические газы*, 2017, № 2, с. 64–70.
- [5] Лавренченко Г.К., Плесной А.В. Эффективные жидкостные ВРУ средней производительности на основе детандер-компрессорных агрегатов с двухступенчатым расширением воздуха. *Технические газы*, 2014, № 5, с. 24–31.
- [6] Кортиков А.В., Тарасова Е.Ю. Принципы накопительной ректификации и возможности ее использования в технологии низкотемпературного разделения воздуха. *Технические газы*, 2014, № 5, с. 32–36.
- [7] Хасанова Р.В., Нешпоренко Е.Г. Сопоставление энергетических затрат в установках разделения воздуха. Энергетические и электротехнические системы. Магнитогорск, Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015, с. 408–412.
- [8] Орешкин А.Н., Борзенко Н.А., Липа В.И., Федоренко Л.М. Автоматическое обеспечение энергосберегающих режимов работы блоков комплексной очистки воздуха воздухоразделительных установок. *Технические газы*, 2015, № 6, с. 71–77.
- [9] Графов А.П., Винник А.А. Резервы повышения эффективности производства неонгелиевой смеси в ВРУ низкого давления. *Технические газы*, 2016, № 5, с. 51–59.
- [10] Радченко А.А., Козлов А.В. Анализ способов регулирования производительности воздухоразделительных установок. *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2015, № 7-2, с. 383–387.
- [11] Козлов А.В., Воробьев А.А., Радченко А.А. Математическая модель ректификационной колонны воздухоразделительной установки малой производительности. *Современные научно-практические решения XXI века. Мат. междунар. науч.-практ. конф.* Воронеж, 2016, с. 168–175.

- [12] Суляев И.И., Седов Д.В. Моделирование воздухоподелительной установки низкого давления как объекта управления. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*, 2018, № 2, с. 47–53. DOI: 10.18721/JCSTCS.11204
- [13] Shamkin V.N., Muromtsev D.Yu., Gribkov A.N. Using destabilization control to improve the functioning of complex multidimensional technological objects on the time interval. *J. Eng. Appl. Sc.*, 2017, vol. 12, no. 24, pp. 7198–7217.
- [14] Муромцев Д.Ю., Грибков А.Н., Тюрин И.В. и др. Формализованная постановка задачи дестабилизационного энергосберегающего управления многомерными технологическими объектами при неоднократном изменении заданий по их производительности на длительном интервале времени. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2018, № 5, с. 99–115. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-5-99-115
- [15] Muromtsev D.Yu., Gribkov A.N., Tyurin I.V., et al. Theoretical justification for the solution of the problem of destabilization energy-saving control of multidimensional technological objects operating in variable performance conditions over a long time interval. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2019, no. 1, pp. 109–128. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-1-109-128
- [16] Gribkov A.N., Muromtsev D.Y., Shamkin V.N., et al. Software for energy efficient control system over process parameters of mimo objects on a set of functioning states. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1050, conf. 1, art. 012030. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012030

**Муромцев Дмитрий Юрьевич** — д-р техн. наук, проректор по научно-инновационной деятельности, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «ТГТУ» (Российская Федерация, 392000, г. Тамбов, Советская ул., д. 106).

**Грибков Алексей Николаевич** — д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и теплотехника» ФГБОУ ВО «ТГТУ» (Российская Федерация, 392000, г. Тамбов, Советская ул., д. 106).

**Зауголков Игорь Алексеевич** — канд. техн. наук, профессор кафедры «Математическое моделирование и информационные технологии» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина» (Российская Федерация, 392000, г. Тамбов, Интернациональная ул., д. 33).

**Тюрин Илья Вячеславович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «ТГТУ» (Российская Федерация, 392000, г. Тамбов, Советская ул., д. 106).

**Шамкин Валерий Николаевич** — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «ТГТУ» (Российская Федерация, 392000, г. Тамбов, Советская ул., д. 106).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Муромцев Д.Ю., Грибков А.Н., Зауголков И.А. и др. Дестабилизационная оптимизация режимов работы подсистемы ректификации воздуходелительной установки низкого давления для одновременного получения азота, кислорода и аргона. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2019, № 6, с. 75–98. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-6-75-98

**DESTABILIZING OPTIMIZATION OF OPERATING MODES  
OF THE RECTIFICATION SUBSYSTEM OF LOW PRESSURE  
AIR SEPARATION PLANT FOR SIMULTANEOUS PRODUCTION  
OF NITROGEN, OXYGEN AND ARGON**

D.Yu. Muromtsev<sup>1</sup>  
A.N. Gribkov<sup>1</sup>  
I.A. Zaugolkov<sup>2</sup>  
I.V. Tyurin<sup>1</sup>  
V.N. Shamkin<sup>1</sup>

mdjur@mail.ru  
gribkovalexey@yandex.ru  
intep64@gmail.com  
tyrinilja@yandex.ru  
shamkin-v@mail.ru

<sup>1</sup> **Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation**

<sup>2</sup> **Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russian Federation**

---

**Abstract**

The paper focuses on the problem of energy-saving control of a large low-pressure air separation plant with a turbo-expander. The plant is designed for simultaneous production of nitrogen, oxygen and argon and operates at variable performance over a time interval when the need for air separation products is repeatedly changed. The purpose of the research is to improve the efficiency of the air separation plant, in terms of minimizing energy consumption for air separation over a time interval, using destabilizing optimization algorithms for the operating modes of its rectification subsystem, the latter being the core of the proposed plant. The study introduces the author's "concept of destabilization", which consists in expanding the range of feasible solutions to the problem by replacing in its statement some constraints like equalities with inequality constraints. This is technologically equivalent to purposefully changing some parameters within acceptable limits instead of stabilizing them, which provides an additional effect over a time interval. The authors developed methods and algorithms for controlling an object over a time interval, which provide

**Keywords**

*Destabilizing optimization, operation time interval, rectification subsystem of air separation plant, variable performance, control action*

for all possible changes in the performance of various target air separation products with a linear dependence of the optimality criterion on additional control actions resulting from destabilization. A specific example demonstrates the use of destabilization control algorithms for solving the problem of optimizing the modes of the rectification subsystem of the air separation plant over a certain time interval with an estimate of the effect obtained. Using the proposed approach and making structural changes to the existing equipment of the rectification subsystem of the air separation plant, we can significantly increase the resulting effect. Destabilization can be fully applied to other complex technological objects with liquid capacities and when a change in the liquid levels is acceptable within certain limits. Further research is needed to find out how plant performance and the time of the plant constancy influence the degree of the resulting effect, as during the plant operation the need for separation products, the moments of their switching and the time of constant performance intervals repeatedly change

Received 12.07.2019  
© Author(s), 2019

---

*The research was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research, project no. 17-08-00457*

## REFERENCES

- [1] Lavrenchenko G.K. Current state and development trends of oxygen and cryogenic engineering. *Tekhnicheskie gazy*, 2015, no. 6, pp. 3–22 (in Russ.).
- [2] Lavrenchenko G.K. Air-separation products: their manufacture and use. *Tekhnicheskie gazy*, 2016, no. 5, pp. 3–17 (in Russ.).
- [3] Lavrenchenko G.K., Kopytin A.V. Key role of oxygen ASU in implementation of new technologies of energy production with complete CO<sub>2</sub> capture. *Tekhnicheskie gazy*, 2016, no. 6, pp. 35–47 (in Russ.).
- [4] Zakharzhevskiy V.Ya., Cholovskaya M.A. Increase of liquid oxygen production in air separation units of average pressure. *Tekhnicheskie gazy*, 2017, no. 2, pp. 64–70 (in Russ.).
- [5] Lavrenchenko G.K., Plesnoy A.V. Efficient liquid ASU of medium productivity on the basis of expander-compressor units with a two-stage air expansion. *Tekhnicheskie gazy*, 2014, no. 5, pp. 24–31 (in Russ.).
- [6] Kortikov A.V., Tarasova E.Yu. Principles accumulative distillation and the possibilities her application in the air low-temperature separation process. *Tekhnicheskie gazy*, 2014, no. 5, pp. 32–36 (in Russ.).

- [7] Khasanova R.V., Neshporenko E.G. Sopotavlenie energeticheskikh zatrat v ustanovkakh razdeleniya vozdukha. Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy [Comparison of energy cost in air separation units. Energy and electrical engineering systems]. Magnitogorsk, Izd-vo Magnitogorsk. gos. tekh. un-ta im. G.I. Nosova Publ., 2015, pp. 408–412.
- [8] Oreshkin A.N., Borzenko N.A., Lipa V.I., Fedorenko L.M. System of automatic implementation of energy saving modes of integrated treatment units operation in air-separation plants. *Tekhnicheskie gazy*, 2015, no. 6, pp. 71–77 (in Russ.).
- [9] Grafov A.P., Vinnik A.A. Potential for efficiency enhancement of neon-helium mixture extraction in low-pressure ASU. *Tekhnicheskie gazy*, 2016, no. 5, pp. 51–59 (in Russ.).
- [10] Radchenko A.A., Kozlov A.V. Analysis of productivity regulation methods of ASU. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2015, no. 7-2, pp. 383–387 (in Russ.).
- [11] Kozlov A.V., Vorob'yev A.A., Radchenko A.A. [Mathematical models of low-productivity ASU refractive column]. *Sovremennye nauchno-prakticheskie resheniya XXI veka. Mat. mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern applied research solutions of XXI century. Proc. Int. Sc.-Pract. Conf.]. Voronezh, 2016, pp. 168–175 (in Russ.).
- [12] Sulyaev I.I., Sedov D.V. Modeling of a low-pressure air separator as a control object. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [St. Petersburg Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 47–53 (in Russ.). DOI: 10.18721/JCSTCS.11204
- [13] Shamkin V.N., Muromtsev D.Yu., Gribkov A.N. Using destabilization control to improve the functioning of complex multidimensional technological objects on the time interval. *J. Eng. Appl. Sc.*, 2017, vol. 12, no. 24, pp. 7198–7217.
- [14] Muromtsev D.Yu., Gribkov A.N., Tyurin I.V., et al. Formalised statement of a problem dealing with energy-efficient destabilisation control of multidimensional technological objects for the case of repeated adjustment of expected performance over a long period of time. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 5, pp. 99–115 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2018-5-99-115
- [15] Muromtsev D.Yu., Gribkov A.N., Tyurin I.V., et al. Theoretical justification for the solution of the problem of destabilization energy-saving control of multidimensional technological objects operating in variable performance conditions over a long time interval. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2019, no. 1, pp. 109–128. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-1-109-128
- [16] Gribkov A.N., Muromtsev D.Y., Shamkin V.N., et al. Software for energy efficient control system over process parameters of mimo objects on a set of functioning states. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1050, conf. 1, art. 012030. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012030

**Muromtsev D.Yu.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovation Activity, Professor, Department of Design of Radioelectronic and Microprocessor Systems, Tambov State Technical University (Sovetskaya ul. 106, Tambov, 392000 Russian Federation).

**Gribkov A.N.** — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of the Department of Enterprise Energy Supply and Heat Engineering, Tambov State Technical University (Sovetskaya ul. 106, Tambov, 392000 Russian Federation).

**Zaugolkov I.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Professor, Department of Mathematical Modeling and Information Technologies, Derzhavin Tambov State University (Internatsionalnaya ul. 33, Tambov, 392000 Russian Federation).

**Tyurin I.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Design of Radioelectronic and Microprocessor Systems, Tambov State Technical University (Sovetskaya ul. 106, Tambov, 392000 Russian Federation).

**Shamkin V.N.** — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Professor, Department of Design of Radioelectronic and Microprocessor Systems, Tambov State Technical University (Sovetskaya ul. 106, Tambov, 392000 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Muromtsev D.Yu., Gribkov A.N., Zaugolkov I.A., et al. Destabilizing optimization of operating modes of the rectification subsystem of low pressure air separation plant for simultaneous production of nitrogen, oxygen and argon. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2019, no. 6, pp. 75–98 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2019-6-75-98