

М125984

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

Л. М. СТОЛПЕР

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК НИЗКОГО
ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

(05.194 — Холодильные машины, машины и аппараты
глубокого охлаждения и кондиционирования)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ



1125984

Столпер Л. М. Исследование

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском институте криогенного машиностроения (ВНИИкриогенмаш).

Научный руководитель —

кандидат технических наук Г. Б. Наринский.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук А. М. Архаров.

кандидат

Ведущее пр

Авторефера

71 г.

Защита дис
на заседании

71 г.

С диссертаци
тута (г. Москва
мана).

нсти-
Бау-

Уч

ка

1125984

За последние 10-15 лет потребление различными отраслями промышленности продуктов разделения воздуха, и в первую очередь, кислорода, значительно возросло

Основным потребителем кислорода остается черная металлургия. Применение кислорода в доменном производстве чугуна, при выплавке стали мартеновским и конверторным способом позволяет увеличить количество получаемого продукта на 10 + 15% с тех же производственных площадей.

Мощность проектируемых для нужд металлургии воздухоразделительных установок возросла за 15 лет в 3-4 раза. С 1966 года на заводах южной металлургии эксплуатируется крупнейшая в СССР и одна из крупнейших в мире воздухоразделительных установок БР-2М, производительность которой по кислороду составляет 85 тыс.м³/час. Однако, для вновь проектируемых комбинатов мощность этой установки уже не является достаточной, в связи с этим начаты работы по созданию сверхмощных установок производительностью 65-70 тыс.м³/час кислорода.

До недавнего времени при создании крупных воздухоразделительных установок основное внимание уделялось снижению удельного расхода энергии на выработку кислорода. При сравнении различных решений взаимосвязь и влияние технологических и конструктивных параметров, выбираемых при расчете установки, на величину суммарных затрат учитывались недостаточно. Изменение этих параметров не связывалось с изменением капитальных вложений.

Между тем, учитывая весьма значительную энергоёмкость процесса разделения и высокую стоимость блоков разделения, очевидно, что правильный выбор основных технологических и конструктивных параметров установки с учетом их влияния не только на энергетические, но и капитальные затраты может дать значительный экономический эффект.

Данная работа посвящена разработке методики технико-экономической оптимизации параметров крупных воздухоразделительных установок для получения кислорода на стадии проектирования.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

В первой главе проведен обзор вопросов, возникающих при разработке методики технико-экономической оптимизации, обоснована

1125984

актуальность постановки задачи оптимизации воздухоразделительных установок для получения кислорода. Вторая глава посвящена разработке методики оптимизации. В третьей главе описаны теоретические и экспериментальные исследования, позволившие уточнить ряд физических, технологических и стоимостных зависимостей составленной математической модели воздухоразделительной установки. В четвертой - обсуждаются результаты проведенных на ЭЦВМ расчетов по определению оптимальных параметров. В заключении показана возможность использования результатов работы в кислородном машиностроении.

1. Постановка и обоснование задачи технико-экономической оптимизации

Процесс разделения воздуха относится к числу хорошо изученных, для него проведен подробный термодинамический анализ холодильных циклов и основных узлов установки.

Основным выводом этого анализа является то, что возможность снижения расхода энергии за счет перехода к более сложным схемам установок, чем применяемые в настоящее время на практике, весьма ограничена. Так снижение расхода энергии (6 + 8%) за счет усовершенствования разделительного аппарата может быть достигнуто только ценой усложнения установки, одновременно затрудняется регулирование и возможность ведения оптимального режима эксплуатации.

В то же время технические потери от необратимости вследствие температурных напоров и гидравлических сопротивлений аппаратов достаточно велики (~30%) и их уменьшение позволило бы добиться значительной экономии энергии. Однако уменьшение технических потерь от необратимости, как правило, связано с увеличением капитальных вложений. В этом случае необходимо знать, какой ценой достигается термодинамическое совершенство процесса, иначе уменьшение энергетических затрат может не компенсировать увеличения затрат на капитальные вложения. Ответ на этот вопрос может быть получен в результате проведения технико-экономического анализа.

Таким образом технико-экономическая оптимизация (Т.Э.О.) является естественным продолжением термодинамического анализа. Термодинамический анализ позволяет правильно построить принципиальную схему процесса. Оптимальные же значения температурных и концентрационных напоров, гидравлические сопротивления аппаратов могут быть определены только в результате технико-экономического анализа с обязательным учетом величины капитальных вложений.

Математически задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом. Связь параметров и показателей оптимизируемого объекта описывается системой уравнений:

$$F_j(x_i) = 0, \text{ где } j = 1, 2, 3 \dots m; i = 1, 2, 3 \dots n.$$

Число зависимых и независимых переменных n заведомо больше, чем число уравнений m , описывающих процесс. В связи с этим система имеет число степеней свободы, равное $n-m$. Смысл технико-экономической оптимизации в том, что мы добавляем к имеющейся системе уравнений технико-экономические уравнения, переводящие часть (или все) из $n-m$ независимых переменных в зависимые. Благодаря этому появляется возможность не задаваться этими параметрами, а определять расчётным путём их оптимальное значение.

От технико-экономической оптимизации не приходится ожидать коренной перестройки процесса, а относительная величина экономического эффекта, для воздухоразделительных установок, как правило, невелика. Однако, мощность современных кислородных установок достигает десятков тысяч киловатт, а капитальные вложения нескольких миллионов рублей, и даже небольшая относительная экономия приводит к значительному экономическому эффекту.

Рассмотрение технико-экономических задач показывает, что разработка методики технико-экономической оптимизации состоит из ряда отдельных вопросов. Из них основными являются следующие:

1. Выбор критерия оптимальности и составление основного уравнения технико-экономического анализа.

2. Выбор оптимизируемых параметров.

3. Составление математической модели.

4. Выбор способа учета капитальных вложений.

5. Выбор метода оптимизации.

II. Разработка методики технико-экономической оптимизации

Первым этапом разработки методики является выбор критерия оптимальности, который представляет количественную оценку объекта оптимизации и дает возможность сравнивать эффект, получаемый от изменения тех или иных параметров. В общем случае в качестве такого критерия советскими экономистами предложена функция приведенного народно-хозяйственного дохода (ур-ние 2-1). Эта функция в экономически эквивалентных соотношениях учитывает изменение количества продукции K_i , её качества $\zeta\varphi_i$, эксплуатационных зат-

рат C и капитальных вложений B .

$$\sum_{i=1}^m \varphi_i K_i - C - p_n B \rightarrow \max \quad (2-1)$$

При решении задач оптимального проектирования, в отличие от задач оптимального управления, производительность и качество получаемого продукта заданы и остаются неизменными. Таким образом, первый член уравнения 2-1 величина постоянная, и задача сводится к минимизации суммы 2-го и 3-го слагаемых, которая получила название приведенных затрат:

$$C + p_n B \rightarrow \min. \quad (2-2)$$

Подстановка в целевую функцию отдельных составляющих затрат для воздухоразделительной установки приводит к уравнению:

$$M = \theta_1 \cdot \frac{\varphi_{г.к.}/P_{вс}}{K} + \frac{\tau_{эк}(\varphi_{б.р.} + \varphi_{к.р.})}{P_k \tau_{год}} + \frac{\beta \text{ З.пл.}}{P_k \tau_{год}}, \quad (2-3)$$

где :

K - выход кислорода, $\text{м}^3 \text{O}_2 / \text{м}^3 \text{пер.воздуха}$;

$P_{т.к.}$ - давление сжатия воздуха в турбокомпрессоре, кг/см^2 ;

$P_{вс}$ - давление всасывания, кг/см^2

P_k - часовая производительность установки, $\text{м}^3 \text{O}_2 / \text{час}$;

$\tau_{год}$ - число часов работы в году.

Первое слагаемое основного уравнения технико-экономического анализа учитывает энергетические затраты. Коэффициент θ_1 включает удельную стоимость расходуемой энергии и воды для охлаждения компрессора. Второй член уравнения представляет суммарную величину капиталовложений, входящих в целевую функцию. Коэффициент $\tau_{эк.}$, кроме коэффициента амортизации и нормативного коэффициента отчислений, учитывает стоимость вспомогательного оборудования, монтажа и транспортные расходы, которые принимаются равными определенной доле от суммарной стоимости блока разделения $\varphi_{б.р.}$ и турбокомпрессора $\varphi_{к.р.}$. Третий член учитывает расходы на заработную плату обслуживающему персоналу (З.пл.) и накладные расходы (β).

Одним из важнейших вопросов при разработке методики Т.Э.О. является вопрос правильного выбора узлов и параметров, подлежащих оптимизации. Число конструктивных и технологических параметров установки, которые могут выступать в качестве оптимизируемых, очень велико. Далеко не все из этих параметров влияют на эконо-

мику процесса равноценно. Необоснованное увеличение числа оптимизируемых параметров приводит к значительному усложнению математической постановки и решения задачи.

Выбор оптимизируемых узлов производился на основе совместного анализа потерь от необратимости и распределения капитальных вложений по звеньям процесса. Результаты анализа представлены в таблице I. Вес (значимость) каждого звена процесса определялся по уравнению:

$$C_i = \frac{\alpha_i + \xi_{\text{эл/кап}} \cdot \beta_i}{1 + \xi_{\text{эл/кап}}}, \quad (2-4)$$

где: $\xi_{\text{эл/кап}}$ — коэффициент пропорциональности между энергетическими и капитальными затратами, входящими в целевую функцию. При подсчете табличных данных значение коэффициента принято равным $\xi_{\text{эл/кап}} = 8$, что соответствует действующему уровню цен. Потери от необратимости α_i и удельные капиталовложения β_i подсчитаны для значений параметров установки БР-2М, однако они характерны и для других крупных воздухоразделительных установок для получения кислорода.

Табл. I

Узлы блока разделения	Потери от необ- ратимости в % от общих потерь в блоке разделения	Капитальные вложения в % от капиталов- ложений на блок разде- ления	Приведенные затраты в % от общих затрат
	α_i	β_i	C_i
Верхняя колонна	23,6	4,8	19,0
Нижняя колонна	4,8	3,9	4,6
Конденсаторы	8,2	6,0	7,7
Азотные регенера- торы	28,9	14,6	25,3
Кислородные регене- раторы	7,3	12,5	8,6
Переохладители и по- догреватель азота	5,7	5,0	5,5
Дроссели	3,3	-	2,5
Турбодетандер	6,6	7,2	6,8
Прочее	11,6	53,3	22,6

На основании приведенных в таблице данных в качестве оптимизируемых выбраны два узла установки: азотные регенераторы и верх-

ная колонна. Эти узлы блока разделения являются определяющими в общей сумме приведенных затрат (соответственно 25,3% и 19,0%) и от их оптимизации следует ожидать наибольшего экономического эффекта.

Уравнения (2-5 и 2-6) показывают зависимость потерь от необратимости в азотных регенераторах и верхней колонне от конструктивных и технологических параметров

$$\alpha_i^{os. reg.} = \varphi(T_B; T_A; T_n; H_{нас}; V_{yg}; \tau_{п.ч.}; k_{нас}) \quad (2-5)$$

$$\alpha_i^{в.к.} = \varphi(y_{к1}; y_{л1}; D; \Delta T_D; x_{л1}; x_{к1}; \Delta T_N; \Delta T_R; W_n; q; k_{кол}) \quad (2-6)$$

где: T_B ; T_A ; T_n - температура входа и выхода потоков из регенератора;

$k_{нас}$ - характеристика насадки регенераторов;

$y_{к1}$ - концентрация получаемого кислорода;

D - количество детандерного воздуха;

$x_{л1}; x_{к1}$ - концентрации азотной флегмы и кубовой жидкости;

$\Delta T_N; \Delta T_R; \Delta T_D$ - степень переохлаждения потоков на входе в колонну;

W_n - скорость пара по колонне;

$K_{кол}$ - конструкция колонны;

q - нагрузка колонны по жидкости.

Анализ технологических и конструктивных ограничений показал, что четыре параметра названных узлов: концентрация отходящего азота $y_{л1}$, высота насадки $H_{нас}$, удельный расход газа V_{yg} , время переключения азотных регенераторов $\tau_{п.ч.}$ могут выступать в качестве независимых переменных, а следовательно в качестве оптимизируемых параметров. Скорость пара по колонне и конструктивные размеры колонн, хотя и являются независимыми переменными, однако их оптимизация в настоящее время весьма затруднительна, в связи с отсутствием необходимых физических зависимостей, в частности, зависимости коэффициента эффективности тарелок от указанных параметров.

Разнообразие типов установок разделения воздуха чрезвычайно затрудняет создание единой математической модели. Поэтому модель составлена для одной из принятых в настоящее время базовых схем для создания крупных кислородных установок. Характерными особенностями схемы являются двукратная ректификация с вводом газообразного воздуха в верхнюю колонну и азотные регенераторы с дисковой насадкой. Незабываемость регенераторов обеспечивается отбором из середины регенераторов части прямого потока.

Составленная математическая модель включает схему влияния оптимизируемых параметров на целевую функцию (рис. 1,2) и математическое описание.

Математическое описание состоит из технологических, конструктивных и стоимостных зависимостей. Технологические связи составлены на основании балансовых уравнений масс и энергии, уравнений теплопередачи и гидродинамики. Конструктивные зависимости математического описания получены на основании рассмотрения компоновок промышленных установок различной мощности и описывают взаимное влияние конструктивных параметров аппаратов блока разделения. Зависимости стоимости аппаратов блока разделения от их конструктивных параметров составлены на основании анализа данных по трудоёмкости изготовления и расходу металла при изготовлении промышленных установок. Кроме указанных уравнений математическое описание включает уравнения, которые учитывают технологические и конструктивные ограничения на пределы изменения параметров, входящих в математическое описание.

Составленное математическое описание дает возможность подсчитать значение целевой функции для ряда задаваемых значений оптимизируемых параметров. Минимальному значению этой функции будет соответствовать искомое сочетание оптимальных параметров (оптимальный план). Однако полученное решение в этом случае носит единичный характер, т.к. оно справедливо только для принятых в расчете значений экономических и физических коэффициентов. Стоимостные коэффициенты подвержены изменениям и полученное таким образом решение недолговечно. Поэтому при решении технико-экономических задач стремятся объединить разрозненные стоимостные и физические коэффициенты в критерии.

Для воздухоразделительных установок критериальный вид целевой функции может быть получен, если представить капитальные и энергетические затраты как сумму постоянных и переменных частей и выразить переменные составляющие через относительные величины:

$$P_{т.к.} = P_0 + \Delta P = P_0 \left(1 + \frac{\Delta P}{P_0} \right) = \\ = P_0 (1 + m_1 \cdot n_{н.к.} + m_2 \cdot n_{в.к.} - m_3 \cdot \gamma_{д.1} + m_4 \cdot \gamma_{з.д.}^2 \cdot n_{нос.} \cdot V_{д.г.}^2); \quad (2-7)$$

$$\gamma_{б.р.} = \gamma_{б.р.} + \Delta \gamma_{б.р.} = \gamma_{б.р.} \left(1 + \frac{\Delta \gamma_{б.р.}}{\gamma_{б.р.}} \right) = \\ = \gamma_{б.р.} (1 + \gamma_1 \cdot n_{н.к.} + \gamma_2 \cdot n_{в.к.} + \gamma_3 \cdot V_{рег.}). \quad (2-8)$$

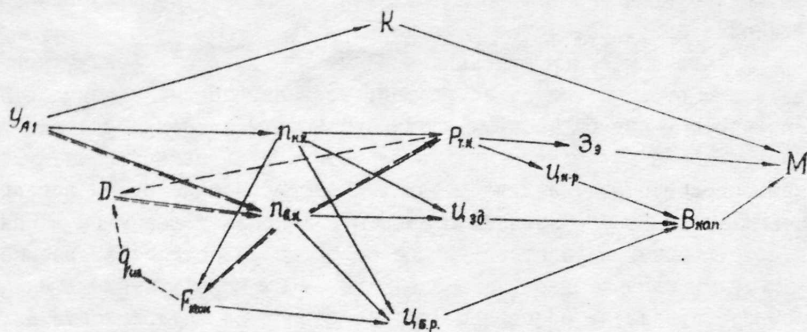


Рис. 1. Схема влияния концентрации отходящего азота y_{N1} на минимизируемую функцию M .

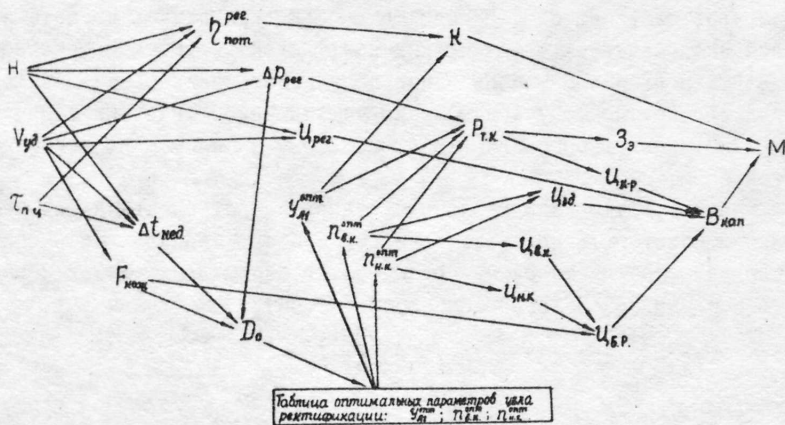


Рис. 2. Схема влияния оптимизируемых параметров регенератора (H , $V_{\text{гр}}$, $\tau_{п.ч}$) на минимизируемую функцию M .

В этом случае возможен переход от уравнения (2-3) к записи целевой функции в критериальном виде:

$$M = \frac{1}{K} K'z_I + \frac{1}{K} \left[\lg(1 + m_1 n_{н.к.} + m_2 n_{в.к.} - y_{Л1} \cdot m_3 + m_4 \cdot \frac{V_{рег}}{V_{нас.}}) + K'z_{II} (\gamma_1 \cdot n_{н.к.} + \gamma_2 \cdot n_{в.к.} + \gamma_3 \cdot V_{рег.}) \right], \quad (2-9)$$

где; $K'z_I$ - безразмерный критерий, характеризующий суммарную величину постоянных составляющих энергетических и капитальных затрат.

$K'z_{II}$ - безразмерный критерий, характеризующий соотношение капитальных и энергетических затрат;

$m_1; m_2; m_3; m_4$ - безразмерные коэффициенты, учитывающие относительное изменение энергетических затрат при изменении параметров колонн и регенераторов;

$\gamma_1; \gamma_2; \gamma_3$ - безразмерные коэффициенты, учитывающие относительное изменение капитальных затрат при изменении параметров колонн и регенераторов;

$n_{н.к.}; n_{в.к.}$ - число тарелок в нижней и верхней колоннах;

$V_{рег.}$ - объём регенератора.

Названные критерии, а также физические и экономические комплексы m и γ , однозначно определяют для заданной производительности установки все оптимизируемые параметры.

Полученный критериальный вид целевой функции дает возможность значительно сократить затраты машинного времени и проанализировать, в результате конкуренции каких составляющих получается оптимум и как изменение определяющих критериев сказывается на значении оптимальных параметров.

III. Экспериментальное и расчетное уточнение математической модели

Анализ составленной в главе II математической модели показывает, что ряд связей, необходимых для проведения оптимизационных расчетов, отсутствует или нуждается в уточнении. Теоретические и экспериментальные исследования проводились в следующих направлениях :

1. Получение зависимости разности температур на теплом конце регенератора от приведенной длины регенератора λ и приведенного времени π . ($\Delta t_{\text{тед}} = \mathcal{P}(\lambda, \pi)$).

2. Получение зависимости стоимости основных аппаратов блока разделения от их конструктивных размеров.

3. Получение зависимости коэффициента сопротивления насадки регенератора от числа Re и определение коэффициента забивки регенератора ($f_{\text{сущ}} = \mathcal{P}(Re)$; $f_{\text{заб}} = \mathcal{P}(f_{\text{сущ}})$).

4. Получение зависимости удельных потерь холода от мощности воздухоразделительной установки ($q_{\text{из}} = \mathcal{P}(B_{\text{пер}})$).

5. Определение коэффициента эффективности ректификационных тарелок большого диаметра.

Зависимости по п.п. 1,2 получены расчетным путём, зависимости по п.п. 3,4,5 получены экспериментальным путём на головном образце воздухоразделительного агрегата БР-2М.

1. Для получения зависимости разности температур в регенераторе от приведенных параметров нами разработана методика теплового расчета регенераторов на ЭЦВМ методом конечных разностей и проведены расчеты в широком диапазоне изменения приведенных параметров λ и π .

Для проверки разработанной методики сначала были проведены расчеты для идеальных регенераторов (равенство водяных эквивалентов и коэффициентов теплоотдачи со стороны прямого и обратного потоков ($W_n = W_o$; $\alpha_n = \alpha_o$), постоянное значение теплоёмкости газа и насадки по высоте регенератора ($C_p^{\text{г.н}} = \text{const}$; $C_p^{\text{нас}} = \text{const}$)).

Расчеты позволили определить коэффициент полезного действия идеального регенератора (для различных значений λ и π) и сравнить полученные данные с аналогичными данными Хаузена и Ламбертсона. Хорошее совпадение данных свидетельствовало о надежности разработанной методики.

Проблема расчета реальных регенераторов воздухоразделительных установок ($W_n \neq W_o$; $\alpha_n \neq \alpha_o$; $C_p^{\text{г.н}} = \text{var}$; $C_p^{\text{нас}} = \text{var}$); в значительной степени усложняется тем, что процесс теплообмена сопровождается процессом массообмена. Хотя процесс массообмена увеличивает общую тепловую нагрузку регенератора всего на 5+10%, эта нагрузка сосредоточена в узкой зоне и неравномерна по времени цикла, поэтому ее влияние на разность температур на теплом конце регенератора очень значительно.

Разработанная методика дала возможность провести расчеты для реальных регенераторов с учётом процесса высадки и возгонки влаги.

Построенная по результатам расчетов зависимость представлена на рис. 3.

2. На основе анализа и обработки весовых данных и данных по трудоёмкости изготовления аппаратов воздухоразделительных установок получены необходимые для оптимизационных расчетов стоимостные зависимости. В частности, получена зависимость стоимости ректификационных колонн в функции диаметра, числа тарелок и расстояния между ними $\mathcal{U}_k = \mathcal{F}(D_k; n; \ell_k)$, зависимость стоимости регенератора как функции диаметра и высота насадки $\mathcal{U}_{рег} = \mathcal{F}(D_{рег}; H_{нас})$. Получена зависимость стоимости блока разделения от количества перерабатываемого установкой воздуха $\mathcal{U}_{б.р} = \mathcal{F}(V_{пер})$. По данным Невского завода получена зависимость стоимости крупных турбокомпрессоров от их эффективной мощности $\mathcal{U}_{к-р.} = \mathcal{F}(N_{эф})$.

3. Практика расчета и эксплуатации воздухоразделительных установок показывает, что действительное сопротивление регенератора значительно превышает расчётное, подсчитанное по имеющимся в литературе данным. В связи с этим проведены исследования коэффициента сопротивления насадки регенератора в промышленных условиях.

В результате продувки сухой насадки регенератора теплым воздухом (количество воздуха изменялось от 10 до 100 тыс. м³/час) получена зависимость коэффициента сопротивления дисковых насадок, применяемых в настоящее время в промышленности, от числа Re . На рис. 4 представлена полученная зависимость для третьей зоны насадки.

Разброс основной массы опытных точек не превышает 15%, что следует считать вполне удовлетворительным для условий промышленного эксперимента. Суммарная погрешность определения коэффициента сопротивления не превышает $\pm 6\%$.

Для исследования качественного и количественного характера забивки регенератора твердыми примесями воды и двуокиси углерода проведена серия испытаний непосредственно после пуска установки, через два и шесть месяцев после начала рабочей кампании. В результате исследования показано, что в пусковой период происходит увеличение сопротивления I-ой и 2-ой зоны насадки из-за забивки их влагой. Дальнейшее увеличение сопротивления регенераторов связано с забивкой самой нижней зоны регенератора двуокисью углерода.

Среднее значение коэффициента забивки регенераторов по периоду кампании на основании полученных данных может быть принято равным:

$$\varphi_{заб.} = (1,4 \div 1,6) \varphi_{сух.} \quad (3-1)$$

4. Потери холода через изоляцию могут быть определены из теплового баланса установки, как разность между располагаемой холодопроизводительностью и потерями холода с выводимыми продуктами.

Для получения истинных значений потерь холода измерения опытных параметров должны производиться с большой точностью. Это в первую очередь относится к измерениям разности температур на теплоконце регенератора. Основная погрешность указанных измерений связана с попаданием на спай термопары капельной влаги в момент переключения регенераторов. Специальная конструкция термопары и защита термопары в момент переключения регенераторов позволили проводить измерения разности температур с погрешностью, не превышающей $0,1^{\circ}$.

При обработке результатов измерений средняя по циклу величина разности температур определялась как средняя интегральная по записи на потенциометре. Суммарная погрешность измерения разности температур не превышает $0,15^{\circ}$.

Все технологические потоки измерялись диафрагмами с внесением поправок на температуру и давление. Количество детандерного воздуха, в связи с особой важностью этой величины, кроме того, рассчитывалось по конструктивным размерам направляющего аппарата и давлению перед ним. Расхождение количеств детандерного воздуха во всех режимах не превышало 5%.

Особое внимание уделялось стабильности теплового режима.

Суммарная погрешность косвенных измерений при определении величины потерь холода может быть оценена в $10 \div 15\%$ с доверительной вероятностью 0,95.

По результатам проведенных измерений составлены тепловые балансы блока разделения, из которых найдено среднее значение величины потерь холода, приходящихся на 1 м^2 поверхности кожуха ($\bar{q}_f = 70 \div 80 \text{ ккал/час. м}^2$). На основании этой величины получена зависимость удельных потерь холода (на 1 м^3 перерабатываемого воздуха) от мощности воздухоразделительной установки:

$$q_{из} \approx 2,4 B_{пер.}^{-0,25} \quad (3-2)$$

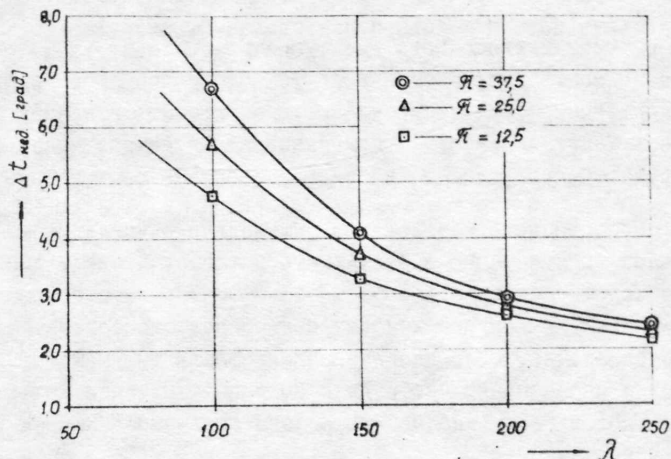


Рис. 3. Зависимость разности температур на теплом конце регенератора Δt_{med} от приведенной длины регенератора λ и приведенного времени Π .

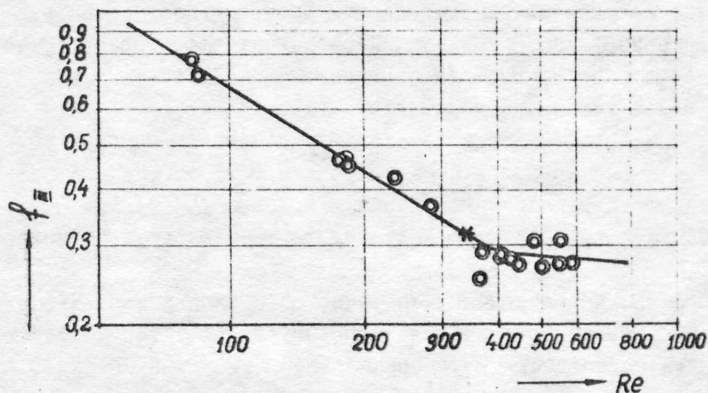


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления II-ой зоны насадки f_{II} от числа Re

© - теплая продувка; X - холодная продувка;

где: $V_{пер}$ - количество перерабатываемого воздуха, тыс.м³/час;

$q_{из}$ - удельные потери холода через изоляцию, тепловые мосты и с утечками холодного газа, ккал/час м² п.в.

Полученная зависимость дает возможность технологу при проектировании установок различной производительности определить величину удельных потерь холода. Как будет показано, эта величина оказывает наиболее существенное влияние на значения оптимальных параметров.

5. Для обоснованного перехода от оптимального числа теоретических тарелок, получаемого в результате расчёта, к числу действительных необходимы данные о коэффициенте эффективности ректификационных тарелок. Для верхней колонны полученных экспериментальных данных недостаточно, особенно для колонн большого диаметра. Проведенные нами исследования позволили получить значения коэффициента эффективности ректификационных колонн большого диаметра в промышленных условиях.

Для повышения надежности опытных данных проведены три режима с различной концентрацией получаемого кислорода ($y_{к1} = 97,6\% O_2$; $y_{к1} = 93\% O_2$; $y_{к1} = 98,6\% O_2$) и режим с уменьшенным на 25% количеством перерабатываемого воздуха. Измерение концентраций пара и жидкости по высоте колонны проводилось ручными и автоматическими газоанализаторами. Корректность измерений обеспечивалась специальной конструкцией пробоотборников.

Обработка полученных опытных данных производилась путем расчёта процесса ректификации воздуха. Коэффициент эффективности тарелки на участке определялся как отношение числа теоретических тарелок на данном участке к действительному.

Коэффициент эффективности тарелок верхней части колонны достаточно высок и составляет в среднем $\eta_{г.к}^{д.к.} = 0,75 \div 0,9$. Коэффициент эффективности тарелок нижней части колонны $\eta_{г.к}^{н.к.} = 0,25 \div 0,3$. Среднее значение коэффициента эффективности тарелок верхней колонны $\eta_{г.к} = 0,5 \div 0,6$.

Таким образом проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить ряд дополнительных зависимостей, необходимых для составления и уточнения математической модели.

IV. Реализация математической модели на ЭЦВМ.

Анализ полученных результатов

Для получения оптимальных значений четырех параметров

($Y_{\text{д1}}; H_{\text{нас}}; V_{\text{вг}}; T_{\text{п-г.}}$) необходимо несколько десятков тысяч расчетов. Для проектирования воздухоразделительных установок необходимы значения оптимальных параметров в широком диапазоне изменения физических и экономических показателей и решение задачи без использования ЭЦМ невозможно.

Составленная математическая модель реализована в виде программы машинного расчета на ЭЦМ М-220. Анализ затрат машинного времени показал, что создание сложной программы направленного поиска оптимума нецелесообразно и при решении задачи использовался простейший из применяемых численных методов - метод сеток. Алгоритм расчета соответствует схеме влияния оптимизируемых параметров на целевую функцию (рис. 1,2).

В результате проведенных расчетов определены оптимальные значения четырех основных параметров ($Y_{\text{д1}}^{\text{опт}}; H_{\text{нас}}^{\text{опт}}; V_{\text{вг}}^{\text{опт}}; T_{\text{п-г.}}^{\text{опт}}$) для всех сочетаний определяющих величин $K_{\text{г1}}; K_{\text{г2}}; m$ и Y при пяти различных значениях величины удельных потерь холода $q_{\text{из}}$.

Пределы изменения определяющих критериев $K_{\text{г1}}; K_{\text{г2}}; m$ и Y выбраны таким образом, что дают возможность изменять физические и стоимостные коэффициенты, входящие в них, в широком диапазоне. Так например, удельная стоимость энергии может быть изменена в 4-5 раз.

Пределы изменения величины удельных потерь холода ($q_{\text{из}}$ от 0,4 до 1,2) соответствуют изменению производительности установок $V_{\text{пер}} = 25 - 400$ тыс. м³/час.

Одновременно с оптимальными значениями $Y_{\text{д1}}; H_{\text{нас}}; V_{\text{вг}}; T_{\text{п-г.}}$ определялся ряд параметров, соответствующих найденным оптимальным значениям. К этим параметрам относятся: число теоретических тарелок в колоннах, количество детандерного воздуха, разность температур и сопротивление регенератора.

Общие затраты машинного времени составили ~ 5 часов.

Полученные расчетные данные оформлены в виде таблиц и графиков и легли в основу отраслевого руководящего технического материала по определению оптимальных значений основных параметров при создании воздухоразделительных установок для получения кислорода.

Рассмотрим основные зависимости и выводы, вытекающие из полученных расчетных данных.

I. Оптимальная концентрация отходящего азота в широком диапазоне изменения физических и экономических коэффициентов лежит в интервале 0,025 ÷ 1,6% (рис. 5). Для крупных воздухоразделитель-

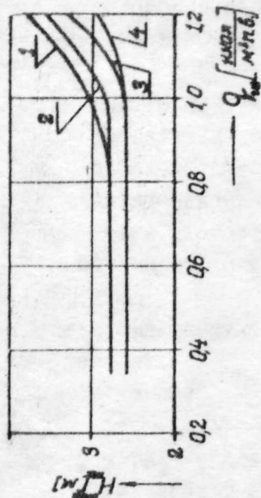


Рис. 6. Зависимость оптимальной высоты насадки регенератора H_{opt} от величины удельных потерь холода через изоляцию q_{loss} .

1- $m_4=0.5$; 2- $m_4=1.0$; 3- $m_4=1.5$; 4- $m_4=2.0$.

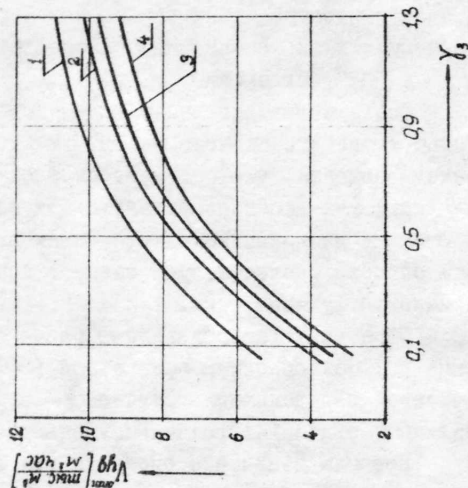


Рис. 7. Зависимость оптимального удельного расхода газа через регенератор $q_{loss,opt}$ от стоимостного показателя δ_s (при q_{loss}).

1- $m_4=0.5$; 2- $m_4=1.0$; 3- $m_4=1.5$; 4- $m_4=2.0$.

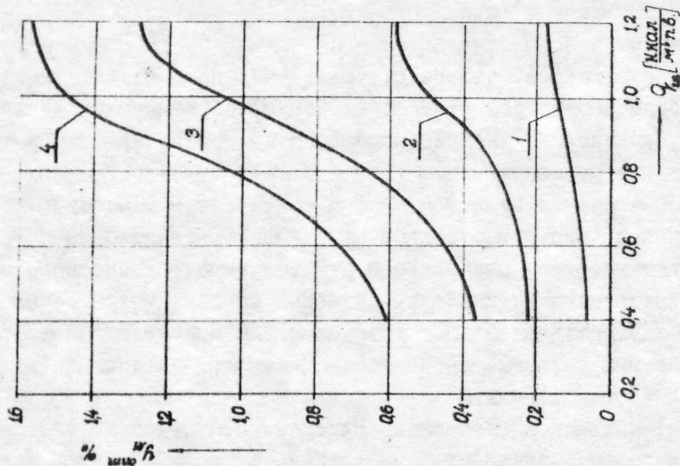


Рис. 5. Зависимость оптимальной концентрации отходящего азота $C_{N,opt}$ от величины удельных потерь холода через изоляцию q_{loss} :

1- $(\delta_{12}, m_{12}, 1)$; 2- $(\delta_{12}, m_{12}, 2)$; 3- $(\delta_{12}, m_{12}, 3)$; 4- $(\delta_{12}, m_{12}, 4)$.

ных установок ($q_{uz} < 0,8$) и принятых в настоящее время значений экономических и физических коэффициентов ($\gamma_{1,2}; m_{1,2}$)_{2,3} эта область значительно сужается $0,2 \div 0,6\%$. При увеличении коэффициентов m и γ оптимальное значение y_{oi} увеличивается.

2. Оптимальная высота насадки регенераторов крупных воздухоразделительных установок ($q_{uz} < 0,8$) составляет $2,6 \div 2,8$ м, что приблизительно в 1,5 раза меньше значений, принимаемых в настоящее время при проектировании.

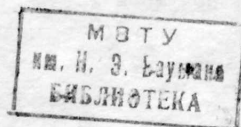
Изменение коэффициента m_4 , характеризующего относительные энергозатраты на азотные регенераторы, практически не сказывается на оптимальном значении высоты насадки (рис.6).

3. Оптимальное значение разности температур в регенераторе, соответствующее $H_{нас.}^{опт.} = 2,6 - 2,8$ м составляет $\Delta t_{ред.} = 6 \div 6,5^\circ$. При проектировании установок со средней концентрацией получаемого кислорода $y_{ki} \approx 96\%$ наблюдается неправильная тенденция к уменьшению этой разности до $3 \div 4^\circ$ и ниже. При этом неоправданно увеличиваются размеры азотных регенераторов (за счет увеличения высоты насадки), а следовательно и их сопротивление.

Даже для очень крупных воздухоразделительных установок ($q_{uz} = 0,4 \div 0,6$) оптимальное количество детандерного воздуха составляет $D = 0,21 \div 0,23$. Повышенное значение объясняется тем, что при получении кислорода с концентрацией $y_{ki} \approx 96\%$ флегмовое число в верхней колонне значительно превышает минимальное. Уменьшение количества детандерного воздуха вызывает появление резервов ректификации, которые, однако, не могут быть реализованы без коренной перестройки узла ректификации. В этом случае целесообразнее использование этих резервов в регенераторах за счет увеличения разности температур и соответствующего уменьшения сопротивления.

4. Оптимальный расход газа через регенераторы практически не зависит от величины удельных потерь холода через изоляцию. Наибольшее влияние на эту величину оказывает значение величины относительных капиталовложений на регенераторы γ_3 (рис. 7).

5. Для принятых в настоящее время значений физических и экономических коэффициентов оптимальное время переключения совпадает с принимаемым при проектировании ($\tau_{п.ч.} = 0,05$ час).



M125984

1. Разработана методика технико-экономической оптимизации воздухооразделительных установок для получения одного продукта или нескольких продуктов с близкой эксергетической ценностью:

а) выбран критерий оптимальности, и на его основе составлено основное уравнение технико-экономического анализа применительно к воздухооразделительным установкам;

б) на основе совместного анализа потерь от необратимости и распределения капиталовложений показано, что два узла установки (верхняя колонна и азотные регенераторы) являются определяющими с точки зрения суммарных затрат;

в) проведенный анализ ограничений позволил выбрать основные технологические и конструктивные параметры этих узлов, подлежащие оптимизации ($U_{\text{дн}}$; $H_{\text{нас}}$; $V_{\text{вг}}$; $T_{\text{п.г}}$).

г) получено критериальное уравнение целевой функции, которое значительно упростило проведение анализа влияния отдельных факторов на оптимальные параметры.

2. Составлена математическая модель воздухооразделительной установки для получения технологического кислорода или одновременного получения технологического и технического кислорода.

3. Экспериментальным путем на действующей воздухооразделительной установке получен ряд зависимостей, необходимых для уточнения математической модели:

а) значение коэффициента сопротивления дисковых насадок регенератора в зависимости от числа Re . Получено значение коэффициента забивки регенератора по периоду кампании;

б) зависимость величины удельных потерь холода в функции количества перерабатываемого воздуха;

в) значения коэффициента эффективности ректификационных тарелок большого диаметра.

Полученные зависимости нашли применение при расчете установок различных типов.

4. Разработана методика расчета регенераторов воздухооразделительных установок на ЭЦЕМ. В результате проведенных расчетов получена необходимая для проведения оптимизации зависимость разности температур в регенераторе от приведенных параметров λ и π .

5. Получены зависимости стоимости основных аппаратов блока разделения (колонн и регенераторов) от их конструктивных размеров.

6. В результате проведенных на ЭЦВМ расчетов получены оптимальные значения основных технологических и конструктивных параметров установки в широком диапазоне изменения экономических и физических коэффициентов. Полученные оптимальные значения справедливы для установок различной производительности ($25 + 400 \text{ тыс. м}^3/\text{час}$).

7. На основе разработанной методики и полученных данных выпущен отраслевой руководящий технический материал, который позволяет при создании установок для получения кислорода выбирать основные параметры близкими к их оптимальным значениям.

8. На основе полученных данных проведена оптимизация основных параметров воздухоразделительного агрегата БР-2М. Годовой экономический эффект составляет 150 тыс. рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих статьях:

1. Наринский Г.Б., Столпер Л.М. Оптимальная концентрация отходящего азота при проектировании установок технологического кислорода. Сб. Применение математических методов и электронно-вычислительной техники в решении экономических и научно-технических задач. ЦИНТИхимнефтемаш, 1969.

2. Столпер Л.М. Методика и результаты расчета регенераторов воздухоразделительных установок на ЭЦВМ. Сб. Криогенное, кислородное и автогенное машиностроение № 3, ЦИНТИхимнефтемаш, 1969.

3. Столпер Л.М., Наринский Г.Б. Сопротивление дисковых регенераторов крупных воздухоразделительных установок. Сб. криогенное, кислородное и автогенное машиностроение, ЦИНТИхимнефтемаш, 1969.

4. Столпер Л.М., Наринский Г.Б. Разность температур в регенераторах и тепловой баланс крупной воздухоразделительной установки. Сб. Криогенное, кислородное и автогенное машиностроение № 2, ЦИНТИхимнефтемаш, 1970 г.

5. Наринский Г.Б., Столпер Л.М., Краковский Б.Д. Исследование работы верхней ректификационной колонны воздухоразделительного аппарата. Кислородная промышленность № 3, НИИТЭИ, 1970 .

6. Наринский Г.Б., Столпер Л.М. Определение экономических оптимальных параметров воздухоразделительных установок для получения кислорода. Сб. Криогенное, кислородное и автогенное машиностроение, № 2, ЦИНТИхимнефтемаш, 1970.