

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смольянинов С.И., Маслов С.Г. Термобрикетирующие торфа. – Томск: Изд-во ТГУ, 1975. – 108 с.
2. Афанасьев А.Е., Чураев Н.В. Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства. – М.: Недра, 1992. – 288 с.
3. Никифоров В.А. Разработка торфяных месторождений и механическая переработка торфа. 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: Выща школа, 1979. – 400 с.
4. Попов М.В., Шабаров А.М., Гушин А.И. Энергетическое использование фрезерного торфа. – М.: Энергия, 1974. – 304 с.
5. Субботин А.Н. Тепломассоперенос при зажигании и горении структурно неоднородных сред: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Томск, 2011. – 307 с.
6. Теплотехнический справочник: В 2-х т. / под ред. В.Н. Юренина, Н.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – Т. 2. – 896 с.
7. Субботин А.Н., Кулеш Р.Н. Исследование механизма и минимальной энергии зажигания торфа источником тепла // Пожарная безопасность. – 2009. – № 4. – С. 77–83.
8. Субботин А.Н. Закономерности развития подземного пожара при разных условиях тепло- и массообмена с внешней средой // Тепломассообмен ММФ. – Минск: Изд-во НАНБ, 2000. – Т. 4. – С. 224–231.
9. Субботин А.Н. О некоторых особенностях распространения подземного пожара // ИФЖ. – 2003. – Т. 76. – № 5. – С. 159–165.
10. Субботин А.Н. Распространение торфяного пожара при разных условиях тепломассообмена с внешней средой // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16. – № 5. – С. 42–49.

Поступила 20.06.2012 г.

УДК 620.93

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА СИНТЕТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ИЗ УГЛЯ С СИСТЕМОЙ ОЧИСТКИ ПРОДУКТОВ ГАЗИФИКАЦИИ

Э.А. Тюрина, О.В. Скрипченко

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
E-mail: tyurina@isem.sei.irk.ru

Приведены результаты оптимизационных исследований перспективной технологии переработки угля в синтетическое жидкое топливо и электроэнергию на энерготехнологической установке комбинированного производства синтетических жидких топлив и электроэнергии с учетом затрат в систему очистки продуктов газификации от H_2S и CO_2 и разной степени удаления CO_2 из продуктов газификации. Представлены математические модели системы очистки продуктов газификации методом Ректизол и энерготехнологической установки в целом. Основное внимание уделено оптимизационным исследованиям системы очистки продуктов газификации методом Ректизол.

Ключевые слова:

Энерготехнологические установки, синтетическое жидкое топливо, уголь, метанол, метод Ректизол.

Key words:

Coal-fired plants, synthetic liquid fuel, coal, methanol, Rectisol method.

Реализация угольных проектов в электроэнергетике сдерживается вследствие низкой энергоэффективности и экологичности сжигания рядовых углей, высоких затрат на доставку энергии угля, особенно низкокалорийных, к конечным потребителям. В связи с этим возникает большой интерес к проблеме переработки углей в синтетическое жидкое топливо как альтернативное энергетическое топливо.

Одним из наиболее перспективных направлений переработки угля является его газификация с последующим синтезом синтетических жидких топлив в энерготехнологических установках комбинированного получения синтетического жидкого топлива и электроэнергии. Интерес к данной технологии определяется высокой производительностью процесса синтеза синтетического жидкого топлива, достаточной экологической чистотой процесса и производством экологически чистого топлива.

Работы по математическому моделированию энерготехнологических установок синтеза различных синтетических жидких топлив (метанол, диметилэфир и др.) и их технико-экономические исследования выполняются в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск) в течение длительного времени. Разработаны математические модели отдельных блоков энерготехнологических установок синтеза синтетических жидких топлив и установок в целом, найдены оптимальные схемно-параметрические решения по установкам и условия их конкурентоспособности [1–4].

Следует отметить, что в ранее проводимых исследованиях энерготехнологических установок системы очистки синтез-газа от соединений серы и диоксида углерода рассматривались в упрощенном виде с использованием экспертных данных по удельным затратам энергии и капитальным вложениям. В то же время при каталитическом синтезе

зе синтетических жидких топлив одним из основных требований со стороны катализаторов является отсутствие соединений серы, так как они способствуют их «отравлению» и снижают скорость образования синтетических жидких топлив. Представляется также необходимым удаление из продуктов газификации излишнего диоксида углерода. Поскольку данные системы являются весьма дорогостоящими и имеют значительное энергопотребление, их упрощенное представление не позволяет с необходимой точностью определить технико-экономические показатели энерготехнологической установки в целом.

В связи с этим возникает необходимость математического моделирования и технико-экономических исследований системы очистки продуктов газификации в составе энерготехнологической установки синтеза синтетического жидкого топлива.

Отметим, что в качестве синтетического жидкого топлива в работе рассматривается метанол.

Исследования состоят из двух этапов. На первом этапе строится математическая модель системы очистки продуктов газификации методом Ректизол, и проводятся её оптимизационные технико-экономические исследования, на втором этапе разработанная модель включается в состав математической модели энерготехнологической установки в целом для проведения дальнейших оптимизационных технико-экономических исследований. Цель таких исследований заключается в получении оптимальных параметров энерготехнологической установки с разной степенью извлечения диоксида углерода из продуктов газификации. Это обусловлено тем, что некоторая часть диоксида углерода участвует в реакциях синтеза метанола, что может увеличить его выход или выход дополнительного количества окиси углерода в составе продувки синтез-газа, поступающего на сжигание в камеру сгорания газовой турбины. Второе обстоятельство может повлиять на выработку дополнительного количества электроэнергии.

Математическое моделирование системы очистки продуктов газификации методом Ректизол. Основой разработанной математической модели системы очистки является один из перспективных процессов очистки продуктов газификации от соединений серы и излишнего диоксида углерода, так называемый Ректизол-процесс (метод очистки газа метанолом при низких температурах). Интерес к данному методу обусловлен тем, что, *во-первых*, он прошёл широкую промышленную проверку при очистке синтез-газа, получаемого газификацией угля, *во-вторых*, в энерготехнологических установках производства синтетических жидких топлив присутствуют потоки с низкими температурами, которые могут быть эффективно использованы в системе очистки, *в-третьих*, этот способ обеспечивает комплексную очистку газов от CO₂, H₂S, сероорганических соединений и других примесей одним и тем же растворителем.

В зависимости от способа газификации и состава исходного газа используют различные схемы очистки. В данном случае рассматривается двухступенчатая очистка продуктов газификации холодным метанолом от H₂S и CO₂. Её расчётная схема [5], для которой разработана математическая модель, представлена на рис. 1.

При построении математической модели системы очистки продуктов газификации от H₂S и CO₂ использовались ранее разработанные модели входящих в неё элементов: теплообменников, испарителей, компрессоров, смесителей и др., а также были разработаны новые элементы: абсорбер и десорбер H₂S и CO₂.

Математическая модель абсорбера включила в себя зависимости между входными и выходными параметрами элемента (равновесные составы и расходы абсорбента (метанола) и растворяемого газа (продуктов газификации), давления и температуры потоков), а также зависимости между этими переменными и конструктивными характеристиками аппарата.

В математической модели абсорбера исходными данными служат расход и состав растворителя и растворяемого газа, входное давление, температура и энтальпия. Ниже дана система уравнений, описывающих математическую модель [6].

- *Материальный баланс процесса*

$$\Sigma G_{(i)} = G_{L(i)}^{bx} + G_{r(i)}^{bx},$$

где $\Sigma G_{(i)}$ – суммарный расход распределяемого компонента из газовой фазы в раствор во всём аппарате; $G_{L(i)}^{bx}$ – расход абсорбента (метанола), содержащего распределяемые компоненты, на входе в секцию; $G_{r(i)}^{bx}$ – расход компонента газа на входе в секцию.

- *Тепловой баланс процесса*

$$G_r^{cp} \cdot c_r \cdot (t_r^{bx} - t_r^{bvx}) - G_L^{cp} \cdot c_L \cdot (t_L^{bvx} - t_L^{bx}) + Q^{диф} = 0,$$

где $Q^{диф}$ – дифференциальная теплота растворения газа; G_r^{cp} , G_L^{cp} – средние расходы фаз на секции абсорбера; c_L – относительная теплоёмкость абсорбента; c_r – относительная теплоёмкость растворяемого газа; t_L^{bvx} , t_r^{bvx} – температура в данном сечении абсорбента и растворяемого газа; t_L^{bx} , t_r^{bx} – начальная температура абсорбента и растворяемого газа.

При определении равновесного состава растворов в абсорбере используется *закон Генри* для идеальных растворов (т. к. при протекании процесса отсутствуют химические взаимодействия между газом и поглотителем, а также используются умеренные давления и невысокие температуры)

$$X_i = k_i \cdot P_i,$$

где X_i – мольная доля извлекаемого компонента в растворе; k_i – константа Генри компонента; P_i – парциальное давление компонента газа.

- *Поверхность массопередачи*

$$F = \Sigma G_{(i)} / (K_r \cdot \Delta \bar{Y}_{cp}),$$

где $\Sigma G_{(i)}$ – суммарный расход распределяемого компонента из газовой фазы в раствор во всём ап-

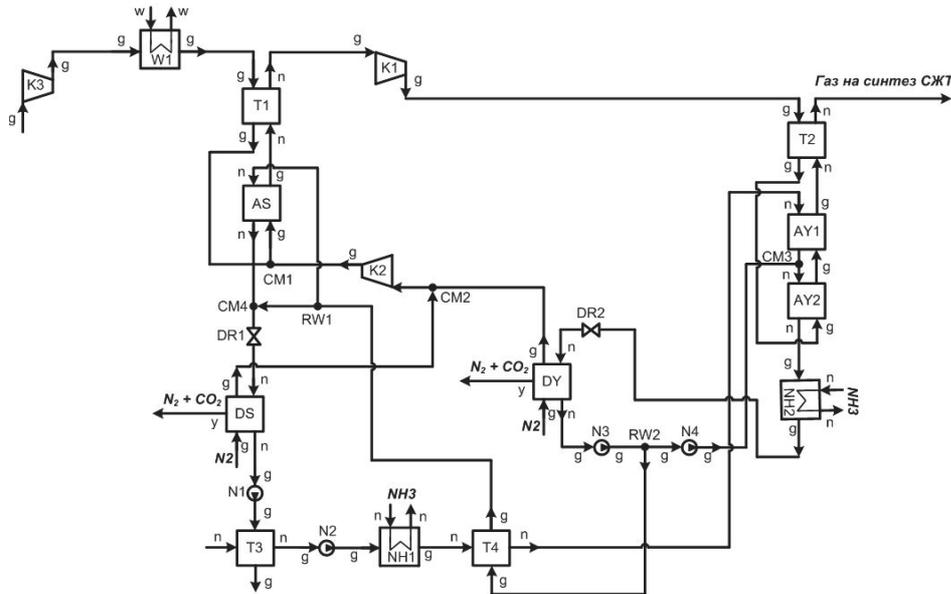


Рис. 1. Расчетная схема двухступенчатой системы очистки продуктов газификации от H_2S и CO_2 методом Ректизол: W1 – газодводяной теплообменник; T1–T4 – теплообменники; AS – абсорбер сероочистки; AY1, AY2 – абсорбер CO_2 1-й и 2-й ступени; NH1, NH2 – испарители; DY – десорбер CO_2 ; DS – десорбер сероочистки; K1–K3 – компрессоры; N1–N4 – насосы. Обозначение потоков: g – греющий поток; n – нагреваемый поток; y – удаленные компоненты из синтез-газа

парате; K_r – коэффициент массопередачи; $\Delta \bar{Y}_{cp}$ – движущая сила в единицах концентраций газовой фазы.

- Коэффициент массопередачи

$$K_r = 1/(1/\beta_r + m/\beta_L),$$

где β_L и β_r – коэффициенты массоотдачи соответственно в жидкой и газовой фазах, кг/(м²·с); m – коэффициент распределения, кг метанола /кг газа.

- Высота абсорбера определяется из геометрического соотношения

$$H = F/(0,785 \cdot a \cdot d_{cr}^2 \cdot \psi_a),$$

где F – поверхность массопередачи; a – удельная поверхность насадки; d_{cr} – стандартный диаметр обечайки абсорбера; ψ_a – доля активной поверхности насадки.

Для решения системы уравнений используется итерационный метод Ньютона с учётом ограничения по тепловому балансу. В результате решения этой системы определяются конструктивные характеристики абсорбера.

Математическая модель десорбера включает зависимости для определения равновесного состава двухфазных смесей, теплового и материального балансов. Учитываются ограничения на неотрицательность температурных напоров. Определяются конструктивные характеристики (поверхность массопередачи, высота ступени десорбера и др.).

Таким образом, математическая модель системы очистки продуктов газификации методом Ректизол ориентирована на конструкторский расчёт элементов установки: определение поверхностей нагрева теплообменников, поверхностей массопередачи абсорберов и десорберов, мощности приво-

да насосов и компрессоров, термодинамических параметров, расходов потоков и др.

На основе разработанной математической модели системы очистки методом Ректизол проведены оптимизационные исследования, целью которых являлось определение энергетических и капитальных затрат в зависимости от степени удаления CO_2 при условии тонкой очистки продуктов газификации от соединений серы.

Для этого решались задачи нелинейного математического программирования, смысл которых состоит в вычислении параметров (поверхностей массопередачи абсорберов и десорберов и др.), которые обеспечивают минимальное значение капитальных затрат в систему очистки при заданной стоимости керамических кислотоупорных насадок (колец Рашига) с учетом физико-технических ограничений на параметры системы очистки и энергетических затрат на удаление H_2S и CO_2 .

Постановка задачи в математическом виде

$$\min \Delta K_{cy}(x, y, K^{TO}, K^{AS}, K^{DS}, K^{RR}, \Delta N_{cy})$$

при ограничениях

$$H(x, y) = 0; G(x, y) \geq 0, x_{\min} \leq x \leq x_{\max},$$

где x – вектор независимых оптимизируемых параметров; y – вектор зависимых (вычисляемых) параметров; H – вектор ограничений-равенств (уравнения материального, энергетического балансов, теплопередачи и др.); G – вектор ограничений-неравенств; x_{\min}, x_{\max} – векторы граничных значений оптимизируемых параметров; ΔK_{cy} – капиталовложения в систему удаления H_2S и CO_2 ; K^{TO} – капиталовложения в теплообменники; K^{AS} – капиталовложения в абсорберы; K^{DS} – капиталовложения в дес-

орберы; K^{KR} – капиталовложения в компрессоры; ΔN_{cy} – потребление энергии в системе очистки.

Всего оптимизируется 20 параметров (расход метанола в системе очистки, изменение энтальпий холодных потоков в испарителях, расход азота на входе в десорберы и т. д.). Система ограничений включает условия на неотрицательность конечных температурных напоров теплообменников, ограничения на расчётные температуры и механические напряжения труб теплообменников, поверхности массопередачи абсорберов и десорберов и т. д. Всего – 135 ограничений.

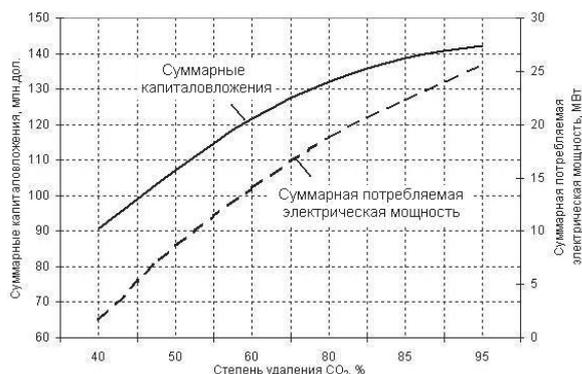


Рис. 2. Зависимость суммарных капиталовложений и суммарного потребления электроэнергии в системе очистки от степени удаления CO_2

На основе результатов оптимизационных исследований системы очистки построены аппрок-

симационные зависимости (рис. 2) для определения капиталовложений и потребляемой энергии в системе очистки в зависимости от степени удаления CO_2 при условии тонкой очистки от соединенной серы.

Исследования системы очистки методом Ректизол показали, что с уменьшением степени удаления CO_2 вырождаются ступени абсорбции за счёт понижения расхода абсорбента, необходимого для поглощения CO_2 из продуктов газификации (вариант с удалением 40 % CO_2 имеет одну ступень абсорбции).

Из полученных аппроксимационных зависимостей (рис. 2) виден рост капиталовложений и затрат энергии в систему очистки за счёт увеличения поверхностей массопередачи абсорберов и десорберов при увеличении доли удаления CO_2 .

Разработанная математическая модель системы очистки продуктов газификации от H_2S и излишнего CO_2 методом Ректизол включена в математическую модель энерготехнологической установки в целом (рис. 3) для проведения дальнейших исследований.

Оптимизационные исследования энерготехнологической установки синтеза метанола с учётом удаления H_2S и CO_2 . Математическая модель энерготехнологической установки в целом ориентирована на конструкторский расчёт элементов установки и содержит порядка 2000 переменных, несколько сот алгебраических и трансцендентных уравнений. Решение системы уравнений производится методом Зейделя.

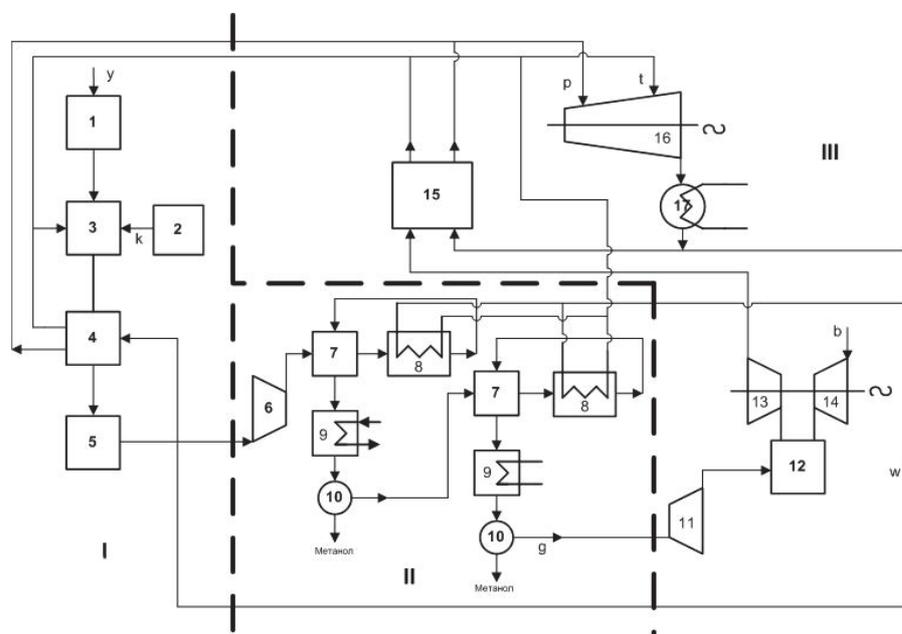


Рис. 3. Упрощенная технологическая схема энерготехнологической установки синтеза метанола из угля: 1 – система топливopодготовки; 2 – система разделения воздуха; 3 – газогенератор; 4 – система охлаждения продуктов газификации; 5 – блок очистки продуктов газификации методом Ректизол; 6 – компрессор синтез-газа; 7 – регенеративный газо-газовый теплообменник; 8 – каталитические реакторы синтеза метанола; 9 – холодильник-конденсатор метанола; 10 – сепаратор метанола; 11 – расширительная газовая турбина; 12 – камера сгорания газовой турбины; 13 – основная газовая турбина; 14 – воздушный компрессор; 15 – котел-утилизатор; 16 – паровая турбина; 17 – конденсатор паровой турбины. Обозначение потоков: g – газ, b – воздух, w – питательная вода, y – уголь, k – кислород, p – пар низкого давления, t – пар высокого давления. I – блок получения синтез-газа, II – блок синтеза метанола, III – энергетический блок

Целью оптимизационных исследований на математической модели энерготехнологической установки с системой очистки продуктов газификации от H_2S и CO_2 является получение оптимальных термодинамических и расходных параметров установок и изменения их технико-экономических показателей в зависимости от степени удаления CO_2 из продуктов газификации в системе очистки.

Оптимизация проводилась по критерию минимального значения цены на производимое синтетическое жидкое топливо при заданных уровнях внутренней нормы возврата капиталовложений, ценах на потребляемое топливо и отпускаемую электроэнергию с учетом физико-технических ограничений на параметры установки и затрат в систему очистки от H_2S и CO_2 .

В качестве оптимизируемых параметров назначались энтальпии, давления и расходы перегретого пара, объем катализатора в энерготехнологической установке синтеза метанола и др. Система ограничений содержит условия на неотрицательность конечных температурных напоров теплообменников, перепадов давлений вдоль проточной части паровых, газовых турбин, ограничения на расчетные температуры и механические напряжения труб теплообменников, на минимальную и максимальную температуру газификации и т. д. Исходная технико-экономическая информация принята на основе ранее проведенных в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск) исследований технологий переработки твердого топлива в синтетические жидкие и газообразные топлива и анализа смет технологических и энергетических производств [1–4]. Газификация топлива происходит в газогенераторах с кипящим слоем и сухим шлакоудалением на парокислородном дутье под давлением 2 МПа. Такой газогенератор является аналогом достаточно исследованного и реализованного в промышленных масштабах газогенератора Winkler. Эти газогенераторы чаще всего применяют в установках синтеза синтетических жидких топлив. Внутренняя норма возврата капиталовложений составляет 15 %, что соответствует мировой практике при исследовании крупномасштабных проектов.

Постановка задачи в математическом виде

$$\min C_{СЖТ}(x, y, k_m, \Delta K_{СУ}, \Delta N_{СУ})$$

при ограничениях

$$H(x, y) = 0; G(x, y) \geq 0; x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, IRR = IRR_z,$$

где x – вектор независимых оптимизируемых параметров; y – вектор зависимых (вычисляемых) параметров; H – вектор ограничений-равенств (уравнения материального, энергетического балансов, теплопередачи и др.); G – вектор ограничений-неравенств; x_{\min}, x_{\max} – векторы граничных значений оптимизируемых параметров; $C_{СЖТ}$ – стоимость метанола; k_m – коэффициент удаления CO_2 ; $\Delta K_{СУ}$ – капиталовложения в систему очистки от H_2S и CO_2 ; $\Delta N_{СУ}$ – затраты энергии в системе очистки; IRR_z –

соответственно расчетная и заданная внутренняя норма возврата капиталовложений.

В таблице представлены оптимальные технико-экономические показатели энерготехнологической установки производства метанола и электроэнергии на основе угля при различных значениях степени удаления CO_2 .

Таблица. Основные технико-экономические показатели энерготехнологической установки на угле с разной степенью удаления CO_2

Наименование	Варианты энерготехнологической установки с разной степенью удаления CO_2 , %		
	25	50	90
Годовой расход топлива (угля): условного, тыс. т у. т натурального, тыс. т	2480 4580		
Цена угля, дол./т у. т	20		
Годовое производство метанола: условного, тыс. т у. т натурального, тыс. т	1323,5 1852,9	1317,5 1844,5	1255,2 1757,3
Годовой отпуск электроэнергии, млн кВт·ч	1549,1	1508	1802
Мощность, МВт: газовой турбины, паровой турбины, собственных нужд, полезная	317,09 243,01 338,8 221,3	338,4 229,5 352,5 215,4	402,4 246,9 391,9 257,4
Капиталовложения в систему очистки продуктов газификации, млн дол.	53,8	76,1	126,1
Капиталовложения суммарные в установку, млн дол.	1108	963,6	947,2
Термический КПД производства метанола, %	64,6	64	63,5
Цена отпускаемой электроэнергии, цент/кВт·ч	4		
Цена производства метанола, дол./т у. т	257	225	241

На рис. 4 даны зависимости основных показателей энерготехнологической установки от степени удаления CO_2 из продуктов газификации.

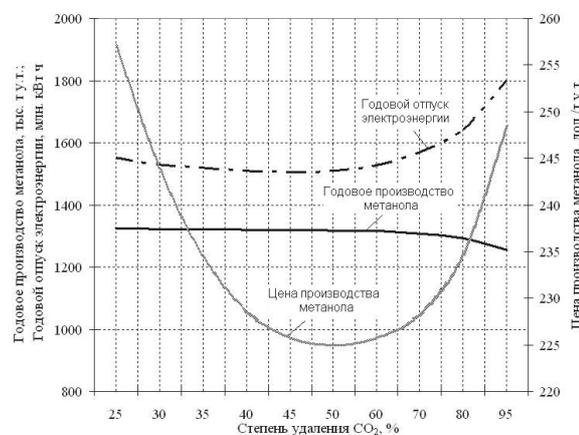


Рис. 4. Зависимость годового производства метанола, годового отпуска электроэнергии и цены производства метанола от степени удаления CO_2

При исследовании энерготехнологической установки с системой очистки продуктов газификации в целом в зависимости от степени удаления CO_2 определена оптимальная доля извлечения CO_2 (рис. 4). Эта доля соответствует варианту с 50 % удалением и характеризуется наименьшей ценой производимого метанола. Как рост, так и снижение доли удаляемого CO_2 характеризуются большей стоимостью метанола.

Выводы

Исследования системы очистки методом Ректизол показали, что с уменьшением степени удаления CO_2 вырождаются ступени абсорбции за счёт понижения расхода абсорбента, необходимого для поглощения CO_2 из продуктов газификации.

В результате проведённых исследований и разработанных математических моделей новых элементов системы очистки методом Ректизол (абсорбер и десорбер) и модели системы в целом, которая была включена в математическую модель энерготехнологической установки, получены ап-

проксимационные зависимости энергетических и капитальных затрат в системе очистки от степени удаления CO_2 при условии тонкой очистки продуктов газификации от соединений серы. На основе разработанных математических моделей проведены оптимизационные технико-экономические исследования энерготехнологической установки с учетом затрат в систему очистки в зависимости от степени удаления CO_2 , которые показали, что существует оптимальный вариант с 50 % удалением CO_2 , характеризующийся наибольшей эффективностью.

Полученные результаты исследований и разработанные математические модели системы глубокой очистки продуктов газификации от диоксида углерода и соединений серы методом Ректизол могут быть применены для исследований как энерготехнологических, так и различных теплоэнергетических установок на угле с учётом затрат в систему глубокой очистки продуктов газификации, а также могут быть использованы на предпроектных и проектных стадиях их разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клер А.М., Тюрина Э.А. Математическое моделирование и технико-экономические исследования энерготехнологических установок синтеза метанола. – Новосибирск: Наука, 1998. – 127 с.
2. Клер А.М., Деканова Н.П., Тюрина Э.А. и др. Теплосиловые системы: Оптимизационные исследования. – Новосибирск: Наука, 2005. – 236 с.
3. Клер А.М., Санеев Б.Г., Тюрина Э.А. и др. Перспективы развития новых технологий производств и транспорта энергии // Системные исследования проблем энергетики / под ред. Н.И. Воропая. – Новосибирск: Наука, 2000. – С. 135–144.
4. Тюрина Э.А. Комбинированное производство искусственного жидкого топлива и электроэнергии: сопоставление технологий // Перспективы энергетики. – 2002. – Т. 6. – С. 377–384.
5. Справочник азотчика: Физико-химические свойства газов и жидкостей. Производство технологических газов. Очистка технологических газов. Синтез аммиака / под ред. Е.Я. Мельникова. – М.: Химия, 1986. – 512 с.
6. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / под ред. Ю.И. Дытнерского. – М.: Химия, 1991. – 496 с.