

## 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. Юренива, 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  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , 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  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$ . Её расчётная схема [5], для которой разработана математическая модель, представлена на рис. 1.

При построении математической модели системы очистки продуктов газификации от  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$  использовались ранее разработанные модели входящих в неё элементов: теплообменников, испарителей, компрессоров, смесителей и др., а также были разработаны новые элементы: абсорбер и десорбер  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$ .

*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*

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

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

- *Тепловой баланс процесса*

$$G_r^{\text{ср}} \cdot c_r \cdot (t_r^{\text{вх}} - t_r^{\text{вых}}) - G_L^{\text{ср}} \cdot c_L \cdot (t_L^{\text{вых}} - t_L^{\text{вх}}) + Q^{\text{диф}} = 0,$$

где  $Q^{\text{диф}}$  – дифференциальная теплота растворения газа;  $G_r^{\text{ср}}$ ,  $G_L^{\text{ср}}$  – средние расходы фаз на секции абсорбера;  $c_L$  – относительная теплоёмкость абсорбента;  $c_r$  – относительная теплоёмкость растворяемого газа;  $t_L^{\text{вх}}$ ,  $t_r^{\text{вх}}$  – температура в данном сечении абсорбента и растворяемого газа;  $t_L^{\text{вх}}$ ,  $t_r^{\text{вх}}$  – 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)

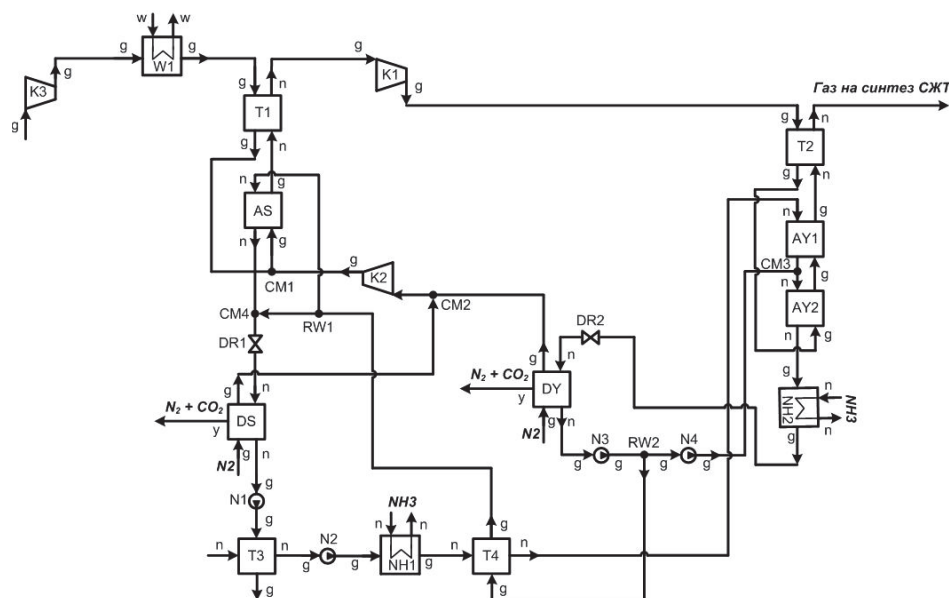
$$X_i = k_i \cdot P_i,$$

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

- *Поверхность массопередачи*

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

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 – удалённые 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  $\beta_L$  и  $\beta_r$  – коэффициенты массоотдачи соответственно в жидкой и газовой фазах, кг/(м<sup>2</sup>·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;  $\psi_a$  – 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

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

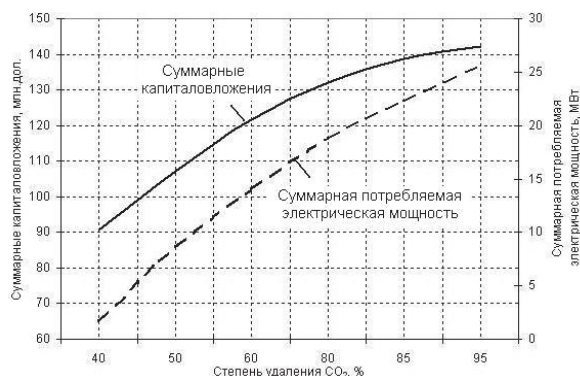
при ограничениях

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

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;  $\Delta K_{cy}$  – 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;  $\Delta N_{cy}$  – 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-

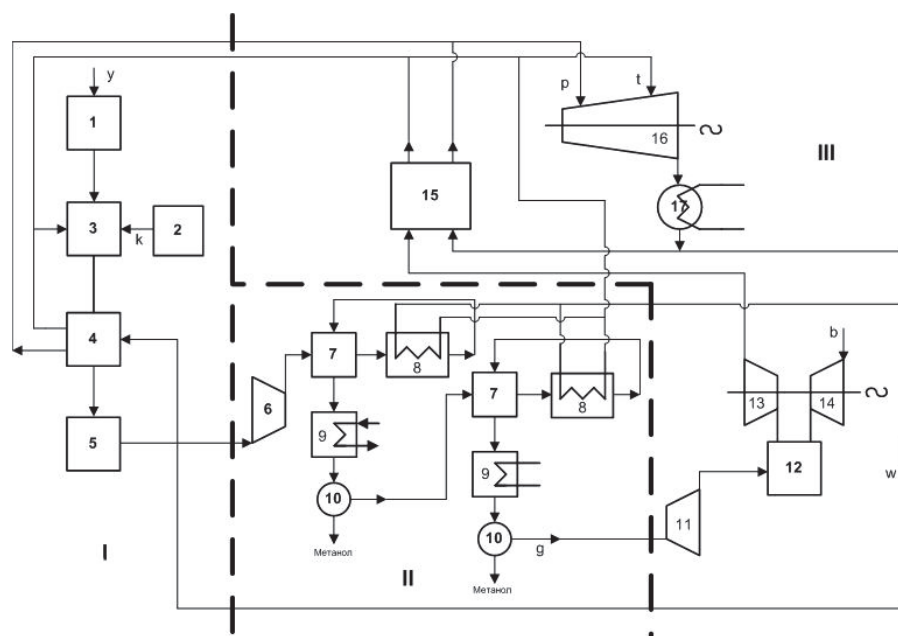
симационные зависимости (рис. 2) для определения капиталовложений и потребляемой энергии в системе очистки в зависимости от степени удаления  $CO_2$  при условии тонкой очистки от соединенной серы.

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;  $IRR_z$  –

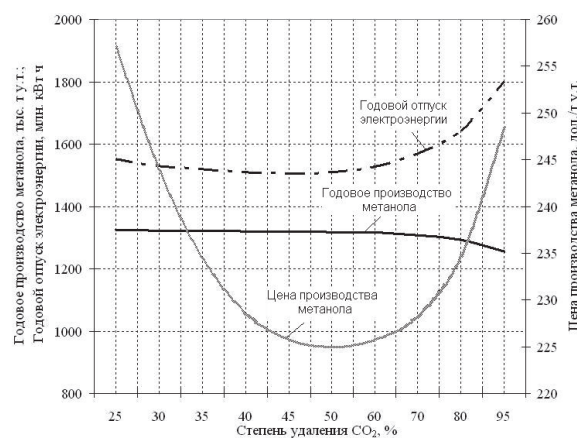
соответственно расчетная и заданная внутренняя норма возврата капиталовложений.

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  $\text{CO}_2$  определена оптимальная доля извлечения  $\text{CO}_2$  (рис. 4). Эта доля соответствует варианту с 50 % удалением и характеризуется наименьшей ценой производимого метанола. Как рост, так и снижение доли удаляемого  $\text{CO}_2$  характеризуются большей стоимостью метанола.

#### Выводы

Исследования системы очистки методом Ректизол показали, что с уменьшением степени удаления  $\text{CO}_2$  вырождаются ступени абсорбции за счёт понижения расхода абсорбента, необходимого для поглощения  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ , которые показали, что существует оптимальный вариант с 50 % удалением  $\text{CO}_2$ , 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.