

В масс-спектре пробы заметно приращение интенсивностей максимумов с $M=91$ и 92 а.е.м. Интенсивность максимума толуола с $M=91$ а.е.м. в пробе ($I_{T\text{PP}}^{91}$) как минимум в 2,5 раза превосходит интенсивность, соответствующую пределу обнаружения, численно равному погрешности определения $I_{T\text{PP}}^{91}/I_{T\text{PP}}^{92}=3/2$. Это свидетельствует о наличии в пробе толуола.

Расчет концентрации толуола с малым содержанием в пробе проводится по формуле (4), где $I_{T\text{PP}}^{91}=I_{T\text{PP}+\phi}^{91}-I_{T\phi}^{91}$, $I_A=I_A^{75}+I_A^{76}+I_A^{77}+I_A^{78}$, т.е. для расчета взята сумма интенсивностей максимумов всех ионных групп арсина. Такой выбор рабочих ионных групп наиболее удобен для проведения анализа.

Интенсивность максимума (I) рассчитывается по формуле:

$$I=h \cdot R,$$

где h – высота максимума на спектре; R – сопротивление делителя напряжения на входе регистрирующего прибора.

В нашем случае $I_{T\text{PP}}^{91}=1200$ у.е. (условных единиц), $I_A=5000000$ у.е. (масс-спектр не имеет особенностей), $S_{T/A}=0,6$, $K_{\text{взв}}=300$ при напряжении питания ВЭУ 4 кВ.

Рассчитывая СТ по формуле (4), получаем значение $1,3 \cdot 10^{-4}$ об. %.

Погрешность анализа обусловлена, в основном, погрешностью определения $S_{T/A}$ и может достигать до 30 отн. %.

Приведенный в данной работе подход к анализу содержания толуола в арсине приемлем и для анализов других примесей.

Заключение

В очищенном на газовых центрифугах арсине были обнаружены толуол, ксилол и фреон. Установлено, что источниками появления толуола и фреона является эпоксидный компаунд статора и стеклопластик ротора. Это позволяет сделать вывод о том, что наличие потока обратной диффузии газа из зароторного пространства газовой центрифуги через систему уплотнений внутрь ротора является существенным фактором при получении высокочистых веществ и его следует учитывать при расчетах и оптимизации технологических схем очистительных каскадов.

Предел обнаружения примесей, при соответствующей подготовке магнитного масс-спектрометра, может достигать $1 \cdot 10^{-5}$ об. %. Погрешность воспроизводимости результатов не более 10 отн. %. Полная погрешность анализов до 30 отн. %. Значение полной погрешности может быть снижено при условии более корректной калибровки масс-спектрометра, т.е. после получения качественных эталонных смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Агафонов И.Л., Девярых Г.Г. Масс-спектрометрический анализ газов и паров особой чистоты. – М.: Наука, 1980.

2 Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.

УДК 661.87:519

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦЕНТРИФУЖНЫХ КАСКАДАХ ОБОГАЩЕНИЯ УРАНА

С.В. Филимонов, Г.М. Скорынин, А.А. Орлов*, Д.Н. Голдобин

ФГУП «ПО «Электрохимический завод», г. Зеленогорск

*Томский политехнический университет

E-mail: orlov@phtd.tpu.edu.ru

Разработана и реализована математическая модель нестационарных гидравлических процессов в промышленных центробежных каскадах обогащения урана, предназначенная для применения в качестве экспертной системы в автоматизированной системе управления технологической схемой и использования в компьютерном тренажере для подготовки специалистов разделительного производства.

Введение

Автоматизированная система управления технологической схемой (АСУТС) центрифужного разделительного завода предназначена для обеспечения и поддержания параметров расчетной технологической схемы (ТС) при изменяющихся внеш-

них условиях. АСУТС основана на моделировании стационарных процессов разделения. Многолетний опыт эксплуатации показал её эффективность, особенно в последние годы, когда существенно выросли требования по качеству выпускаемой продукции.

Вместе с тем, большое влияние на работу разделительного производства оказывают нестационарные гидравлические процессы, возникающие как в ходе нормальной эксплуатации каскадов, например, при изменении частоты питающего тока, при переходе на новый технологический режим, при плановом отключении части оборудования и т.п., так и при нарушениях нормальной работы схемы, например, при закрытии внешних потоков каскадов.

Эти процессы влияют на качество выпускаемого товарного продукта, эффективность работы ТС завода и могут привести к недопустимым перегрузкам оборудования. Во всех нестационарных процессах необходимо обеспечить безопасность оборудования и свести к минимуму потери работы разделения, что и обуславливает важность изучения и учета этих процессов. Кроме того, по сравнению с диффузионными, центрифужные каскады имеют меньшее газосодержание, а следовательно и меньшую инерционность. Малая инерционность приводит к усилению влияния нестационарных процессов на эффективность работы разделительных каскадов.

В связи с этим возникла необходимость решения задачи полномасштабного учета нестационарных гидравлических процессов в разделительном производстве.

С целью решения поставленной задачи разработана и программно реализована математическая модель нестационарных гидравлических процессов в многокаскадной ТС разделительного производства.

В отличие от ранее известных работ [1], рассматриваемая модель нестационарных процессов учитывает особенности построения ТС разделительных предприятий, в частности, заключающиеся в том, что соединения ступеней в каскаде могут осуществляться по параллельно-последовательной схеме.

Кроме того, в модель включены линии межкаскадных коммуникаций (МКК), связывающие каскады между собой.

1. Описание математической модели нестационарных гидравлических процессов

1.1. Объемы, входящие в модель

В описываемой модели газосодержание ступени n каскада m многокаскадной ТС считается сосредоточенным в 10-ти объемах (для 8-секционной ступени). Из них 8 объемов роторов газовых центрифуг (ГЦ) секций i с газосодержанием $M_{i, nm}$ ступени n каскада m (i, n, m – номер секции, ступени, каскада). Газосодержание $M_{i, nm}$ определяется давлением на носике отборника тяжелой фракции после прохождения скачка уплотнения $P_{w0, nm}$ [2]:

$$M_{i, nm} = V_{i, nm}(\omega)P_{w0, nm}, \quad i = 1 - 8,$$

где $M_{i, nm}$ – газосодержание роторов ГЦ i -ой секции n -ой ступени каскада m ; $V_{i, nm}$ – коэффициент, зависящий от частоты вращения роторов ω и типа ГЦ.

Аналитическое выражение для газосодержания $M_{i, nm}$ определено исходя из принятой упрощенной газодинамической модели ГЦ.

В газовые центрифуги секции i ступени n подается поток питания $L_{0i, nm}$ а выходят потоки легкой $L_{Li, nm}$ и тяжелой фракции $L_{Ti, nm}$. 9-ый объем трассы отвала ступени n каскада m с газосодержанием $M_{2, nm}$ и давлением $P_{T, nm}$ включает в себя коммуникации от коллекторов отвала отдельных ГЦ до межступенного регулятора давления. Его газосодержание определяется выражением:

$$M_{2, nm} = V_{2, nm}P_{T, nm},$$

где $M_{2, nm}$ – газосодержание трассы отвала ступени n каскада m ; $V_{2, nm}$ – константа, зависящая от физических свойств рабочего газа и геометрических размеров трассы отвала ступени n каскада m ; $P_{T, nm}$ – давление в коллекторе отвала ступени n каскада m .

В данный объем входят секционные потоки отвала $L_{T2, nm}$, а выходит суммарный поток отвала ступени $G_{T, nm}$ равный расходу $G_{p, nm}$ через межступенный регулятор. Принято, что поток в секционной (секция i) трассе отвала $L_{Ti, nm}$ равен потоку отвала из ГЦ секции i $L_{Ti, nm}$.

10-ый объем трассы питания ступени n каскада m с газосодержанием $M_{3, nm}$ и давлением $P_{0, nm}$ может включать следующие коммуникации:

- блочная трасса отбора предыдущей ступени;
- байпасная линия отбора предыдущей ступени;
- коллектор питания ступени;
- байпасная линия отвала следующей ступени;
- блочная трасса отвала следующей ступени.

Для газосодержания трассы питания ступени n каскада m имеем:

$$M_{3, nm} = V_{3, nm}P_{0, nm},$$

где $M_{3, nm}$ – газосодержание трассы питания ступени n каскада m ; $V_{3, nm}$ – константа, зависящая от физических свойств рабочего газа и геометрических размеров трассы питания ступени n ; $P_{0, nm}$ – давление в коллекторе питания ступени n каскада m .

В общем случае в этот объем могут входить следующие потоки:

- отбора двух предыдущих ступеней $G_{Jn-1, m}, G_{Jn-2, m}$;
- отвала следующих двух ступеней $G_{Tn+1, m}, G_{Tn+2, m}$;
- питания ступени T_{Rkn} и T_{Wkn} , являющиеся потоками отбора и отвала полки k ($k \neq m$) соответственно;
- внешнего питания данной ступени $T_{0n}(t)$, являющегося заданной функцией от времени t ;
- воздуха $G_{Bn}(t)$ являющегося заданной функцией от времени t при моделировании нарушения вакуумной плотности оборудования.

Из 10-го объема выходит сумма потоков питания секций данной ступени $L_{02i, nm}$.

1.2. Основные уравнения нестационарной гидравлики

Основные уравнения нестационарной гидравлики – это уравнения баланса вещества в выделенных объемах, которые не учитывают коррозионные потери. Изменение газосодержания в каждом выделенном объеме определяется разностью входящих и выходящих потоков. Для выделенных объемов ступени n каскада m можно записать следующие уравнения нестационарной гидравлики:

$$\frac{dM_{1im}}{dt} = L_{01im} - L_{T1im} - L_{J1im}, \quad i = 1, 2, \dots, 8, \quad (1)$$

$$\frac{dM_{2nm}}{dt} = \sum_{i=1}^S L_{T1im} - G_{pnm}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dM_{3nm}}{dt} = & Tn(t) + \sum_{k=1}^K \delta_{Rkn} T_{Rkn} + \sum_{k=1}^K \delta_{Wkn} T_{Wkn} + \\ & + \delta_{Jn-1} G_{Jn-1,m} + \delta_{Jn-2} G_{Jn-2,m} + \delta_{Tn+1} G_{Tn+1,m} + \\ & + \delta_{Tn+2} G_{Tn+2,m} + \delta_{OP} (G_{JNm} - T_{OPm}(t)) - \\ & - \sum_{i=1}^S L_{01im} + \delta_{Bn} G_{Bn}(t), \quad (3) \end{aligned}$$

где K – количество каскадов ТС; δ_{Rkn} и δ_{Wkn} – признаки связи между потоками отбора и отвала каскада k с питанием ступени n ($k \neq m$); δ_{Jn-1} , δ_{Jn-2} , δ_{Tn+1} , δ_{Tn+2} , δ_{Bn} – признаки наличия потока (0 или 1); δ_{OP} – признак отборной ступени (0 или 1); G_{JNm} , T_{OPm} – соответственно потоки отбора отборной ступени и каскада m .

Ур. (1) составляется для каждой секции ступени n каскада m . Уравнения (2) и (3) составляются для каждой ступени n каскада m .

1.3. Уравнения для потоков

Поток питания отдельной ГЦ L_{01im} проходит через расходомерную диафрагму. Для потока питания ГЦ секции i ступени n каскада m имеем:

$$L_{01im} = N_{im} K_{0im} P_{0im}, \quad (4)$$

где N_{im} – количество ГЦ в секции i ступени n ; K_{0im} – коэффициент расхода; P_{0im} – давление на входе в ГЦ.

Секционный поток питания L_{02im} для принятого турбулентного течения газа по трассе питания [3] определяется следующим выражением:

$$(L_{02im})^2 \zeta_{0im} = P_{0im}^2 - P_{im}^2, \quad (5)$$

где P_{0im} – давление в коллекторе питания ступени; P_{im} – давление на входе в ГЦ; ζ_{0im} – коэффициент гидравлического сопротивления [3].

Исходя из ламинарного характера течения газа в отборнике тяжелой фракции ГЦ, для потока отвала ГЦ секции i ступени n каскада m L_{T1im} имеем:

$$\frac{L_{T1im} \zeta_{T1im}}{N_{im}} = P_{w0im}^2 - P_{Tnm}^2, \quad (6)$$

Поток отбора ГЦ i -ой секции L_{J1in} определяем с помощью формализованной универсальной гидра-

влической характеристики ГЦ, которая представляется в виде:

$$L_{J1in} = N_{im} \left(b1_{im} + b2_{im} \left(\frac{L_{01im}}{N_{im}} \right) + b3_{im} \left(\frac{L_{01im}}{N_{im}} \right)^2 + b4_{im} P_{Tnm} + b5_{im} P_{Tnm}^2 + b6_{im} \left(\frac{L_{01im}}{N_{im}} \right) P_n \right), \quad (7)$$

где $b1_{im} - b6_{im}$ – коэффициенты гидравлической характеристики, зависящие от типа ГЦ, температуры помещения, температуры охлаждения ГЦ, концентрации легких примесей, частоты вращения ω и т.п.

К уравнениям (4–7) в принятой модели добавляются уравнения, связанные с работой межступенного регулятора.

Считая истечение газа через сопло регулятора критическим, запишем расход через регулятор в виде

$$Gp = D(h)P_{до}, \quad (8)$$

где D – коэффициент расхода, зависящий от положения клапана регулятора h ; $P_{до}$ – давление до регулятора.

В данной модели рассматриваются пропорциональные регуляторы с регулированием по перепаду давления $P_{Tn} - P_{0n}$. В этом случае линеаризованное уравнение регулятора можно записать через приращение давлений ΔP_{Tn} , ΔP_{0n} :

$$\frac{Tnd\mu}{dt} + \mu = Pn(\Delta P_{Tn} - \Delta P_{0n}), \quad (9)$$

где $\mu = \Delta h/h$ – относительное изменение положения клапана регулятора; Tn и Pn постоянная времени регулятора и коэффициент усиления регулятора ступени n ; h – величина, характеризующая положение регулирующего клапана регулятора.

Внутренние потоки питания T_{Rkn} , T_{Wkn} определяются через соответствующие потоки отбора и отвала каскадов с учетом транспортной задержки $\tau_{зд}$, под которой понимается время прохождения гидравлического возмущения по соответствующим линиям МКК. Время $\tau_{зд}$ рассчитывается исходя из уравнения неразрывности для установившегося одномерного потока, изолированного от внешней среды [2], а также из расчетных величин потоков и давлений на участках линий МКК и заданных значений геометрических размеров этих участков.

2. Схема решения уравнений нестационарной гидравлики

Расчет нестационарных гидравлических процессов сводится к нахождению величин давлений во всех введенных объемах для всех ступеней каскадов, положений регулирующего клапана межступенных регуляторов, как временных функций при заданных начальных условиях. В качестве начальных условий приняты расчетные значения давлений исходного стационарного состояния ступеней каскадов.

Входящие в уравнения (4–9) коэффициенты расхода шайб, коэффициенты гидравлических сопротивлений трасс, коэффициенты гидравлических характеристик ГЦ, параметры регуляторов и т.п. предполагаются известными из экспериментальных и расчетных данных. Подставляя выражения для газосодержания и потоков в уравнения (1–3) получим систему дифференциальных уравнений первого порядка относительно давлений P_{w0imn} , P_{Tnm} , P_{0imn} , P_{0imn} и положений регулирующего клапана регуляторов μ_{nm} для каждого из каскадов ТС.

Таким образом, задача моделирования нестационарных процессов в промышленных центрифужных каскадах сводится к решению системы дифференциальных уравнений первого порядка с заданными начальными условиями. Задача Коши за редким исключением не имеет аналитических методов решения. В численном методе вместо отыскания непрерывных функций времени рассчитываются значения искомых функций в дискретные моменты времени, а система дифференциальных уравнений заменяется тем или иным способом разностными уравнениями. В применяемом алгоритме использована неявная схема Эйлера с пересчетом [4], которая обладает третьим порядком точности на шаге и вторым на интервале.

Полученные системы нелинейных уравнений решаются итерационным методом Ньютона [5] на каждом временном слое. При этом процесс получения системы линейных уравнений, относящихся к одной ступени, объединяется с их частичным решением. Величины приращений давлений P_{w0imn} , P_{Tnm} , P_{0imn} относящиеся к одной ступени выражаются через приращения давлений в трассах питания ступеней P_{0imn} . В результате получаем систему линейных уравнений относительно приращений давлений в трассах питания ступеней каскадов. В предложенной расчетной модели система линейных уравнений на каждом шаге итерации решается методом исключения Гаусса [4].

На каждом временном шаге решение может дополняться расчетом нестационарной гидравлики линий МКК, состоящих из подкачивающих компрессоров, регуляторов давления различных типов и других элементов.

По предлагаемой методике проведены численные исследования для различных случаев нестационарных возмущений ТС, результаты которых позволили сделать следующие выводы:

ционарных возмущений ТС, результаты которых позволили сделать следующие выводы:

- Результаты расчетов, для которых имеются фактические данные (изменение величин внешних потоков, закрытие блоков), позволяют судить о достаточной адекватности описанной модели поведению реального объекта;
- Расчетное время распространения гидравлических возмущений по ступеням каскадов и линиям МКК практически совпадает с имеющимися опытными данными;
- Временные характеристики модели позволяют оперативно производить расчеты многокаскадной технологической схемы в режиме реального времени.

Заключение

Предложена математическая модель нестационарных гидравлических процессов в промышленных центрифужных каскадах, учитывающая отличительные особенности построения исследуемой технологической схемы разделительных производств. Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений первого порядка с заданными начальными условиями и позволяет получать решения в режиме реального времени при произвольном наборе возмущающих воздействий.

Разработан алгоритм решения уравнений, описывающих нестационарные гидравлические процессы, как в центрифужных каскадах, так и в линиях МКК, объединяющих эти каскады.

Предложенная модель позволяет исследовать нестационарные процессы, возникающие при изменении величин внешних потоков; отключении внешних потоков; изменении частоты и отключении питающего тока; нарушении вакуумной плотности оборудования; изменении точки подачи питания; отказах и перенастройке межступенных регуляторов; отключении/включении части оборудования; нарушениях в работе оборудования линий МКК; а также при различных сочетаниях этих воздействий.

Модель может быть использована в АСУТС в качестве экспертной системы и в компьютерном тренажере для подготовки специалистов разделительного производства [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обогащение урана / Под ред. С. Виллани. Пер. с англ. под ред. И.К. Кикоина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 316 с.
2. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. – М.: Энергия, 1974. – 592 с.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 476 с.
4. Пирумов У.Г. Численные методы. – М.: Дрофа, 2003. – 221 с.
5. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 598 с.
6. Пат. 2250509 РФ. МПК⁶ G09B 9/00. Тренажер операторов системы управления технологическим процессом разделения изотопов урана центробежным методом в штатных и аварийных ситуациях / В.А. Власов, А.А. Орлов, А.Н. Шубин, С.В. Филимонов, Г.А. Колпаков. Оpubл. 20.04.2005, Бюл. № 11.