УДК 661.87.519

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ, СВЯЗАННЫХ С ПРОТЕКАНИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕНТРИФУЖНЫХ КАСКАДАХ

А.А. Орлов, В.Г. Бутов, С.Н. Тимченко

Томский политехнический университет
E-mail: orlov45@sibmail.com

Рассмотрены способы моделирования и предложена модель, имитирующая возмущающие воздействия, связанные с протеканием нестационарных гидравлических и разделительных процессов в каскадах газовых центрифуг по обогащению урана. Приведены результаты численного расчета и экспериментального исследования нестационарных процессов, возникающих при различных возмущающих воздействиях.

Ключевые слова:

Газовые центрифуги, моделирование, нестационарные процессы, каскад, уран.

Key words:

Gas centrifuges, modeling, non-stationary processes, the cascade, uranium.

Введение

Большое влияние на работу центрифужного оборудования оказывают нестационарные гидравлические и разделительные процессы, возникающие в ходе нормальной эксплуатации каскадов и потоков межкаскадных коммуникаций (МКК) и при аварийных ситуациях. По сути, эксплуатация центрифужного оборудования осуществляется в условиях постоянно протекающих нестационарных процессов.

В ходе протекания нестационарных гидравлических процессов нарушаются оптимальные режимы работы ступеней каскадов и могут возникать возмущения, приводящие к недопустимым перегрузкам оборудования. Кроме того, изменение гидравлического режима работы оборудования приводит к возникновению нестационарных разделительных процессов, связанных с изменением во времени концентрации ^{235}U в ступенях каскадов и в выходящих потоках.

Таким образом, эти процессы влияют на качество выпускаемого товарного продукта, эффективность работы технологической схемы (ТС) завода и на условия работы оборудования. Во время протекания нестационарных процессов необходимо обеспечить безопасность оборудования и свести к минимуму потери работы разделения.

Малая инерционность центробежных каскадов обуславливает усиление влияния нестационарных процессов на эффективность их работы. Возникает необходимость оперативно, в режиме реального времени, вносить коррективы в технологические режимы. На стадии подготовки к изменению ТС требуется иметь представление о характере протекания нестационарных процессов в тех или иных аварийных ситуациях для выработки требований на срабатывание блокировок и аварийных защит и корректировки регламента по действию персонала в этих ситуациях.

Перечисленные факторы обуславливают необходимость и актуальность решения задачи полномасштабного исследования и последующего учета нестационарных процессов.

Другим немаловажным аспектом задачи исследования нестационарных процессов является подготовка оперативного персонала.

В настоящее время профессиональные навыки оперативный персонал приобретает в процессе практической эксплуатации технологической схемы завода. При этом не исключены ошибки, приводящие к нарушению технологического процесса и выходу из строя дорогостоящего оборудования. Для подготовки персонала к действиям в этих условиях требуется значительное время, так как на действующем оборудовании аварийные ситуации случаются достаточно редко, а создавать их искусственно экономически нецелесообразно и опасно.

Одним из путей решения проблемы подготовки и поддержания профессиональных навыков у оперативного персонала центрифужного производства является разработка компьютерного тренажера, который базируется на имитационных математических моделях, адекватно описывающих нестационарные процессы, протекающие в центрифужных каскадах.

Кроме того, исходя из многообразия нестационарных процессов, возникающих в ходе повседневной эксплуатации центрифужного оборудования, их скоротечности, требуется превратить имитационное моделирование нестационарных процессов в многокаскадной технологической схеме из чисто исследовательской задачи в инструмент, используемый в повседневной эксплуатации разделительного производства, чтобы получить возможность заранее «проиграть» любую ситуацию и вовремя скорректировать технологический режим.

Ранее нами были разработаны имитационные математические модели нестационарных гидравлических и разделительных процессов [1, 2], протекающих в каскадах газовых центрифуг (ГЦ) по обогащению урана, алгоритмы и программное обеспечение для расчета параметров этих процессов [3]. Создана модель с использованием нейронных сетей для определения основных параметров единичной газовой центрифуги [4], необходимых

при проведении расчетов нестационарных процессов в каскадах, и разработана функциональная модель компьютерного тренажера разделительного производства [5], представляющая собой структуру объектов и внутреннюю организацию их взаимодействия между собой.

Теперь настала очередь моделирования различных возмущающих воздействий, а также проведения численных расчетов и экспериментальных исследований нестационарных процессов при наложении различных возмущающих воздействий.

1. Моделирование возмущающих воздействий

Вид нестационарного процесса при его численном моделировании определяется в основном заданием соответствующих величин в виде кусочно-линейной функции времени. В некоторых случаях возмущения моделируются путем изменения состояния запорной арматуры (моторных клапанов блоков, секций, линий МКК), признаки состояния которой, введены в программный алгоритм модели. Ниже приведены разработанные способы моделирования возмущающих воздействий для нестационарных гидравлических и разделительных процессов.

Изменение величины внешних потоков каскадов и их концентрации

Величины внешних потоков питания каскадов ТС, а также концентрации ^{235}U в них задаются в виде кусочно-линейных функций времени. Функцией времени могут задаваться также величины потоков отбора каскадов. Отключение потоков питания и отбора рассматривается как частный случай временных функций потоков. При рассмотрении случаев отключения потоков питания, подаваемых в отборную часть каскада, на каждом временном слое контролируется разница между давлением до регулятора отвала и давлением до узла расходомерных шайб линии отбора. В тот момент, когда разница достигает нулевого значения, давление до узла расходомерных шайб принимается равным давлению до регулятора отвала. Соответственно пересчитывается поток отбора линии.

Отключение потока отвала каскада моделируется путем введения в программный алгоритм признака закрытия регулятора давления отвала в отвальной ступени исследуемого каскада.

Изменение точек подачи питания каскадов

Процесс переноса внешних по отношению к ступени потоков питания с одной ступени на другую моделируется путем отключения соответствующего потока питания одной ступени и включения его в другую ступени.

Закрытие части разделительного оборудования

Закрытие части ступени или всей ступени производится исключением их из расчетного алгоритма путем изменения состояния соответствующих

элементов запорной арматуры (моторных клапанов блоков, секций) и последующего обнуления соответствующих признаков в уравнениях нестационарной гидравлики и регулятора. При этом газосодержание исключенных элементов в дальнейших расчетах не учитывается. Моделирование самооткачки рабочего газа из отключенного от технологической схемы разделительного оборудования осуществляется заданием внешнего потока питания в соответствующую ступень каскада.

Изменение частоты питающего тока и отключение электропитания газовых центрифуг

Величина частоты питающего тока $F_{\text{ГЦ}}$ задается в виде кусочно-линейной функции времени. При этом полагается, что при медленном изменении частоты питающего тока для разделительного оборудования с нестабилизированной частотой питания скорость вращения роторов газовых центрифуг ν изменяется синхронно изменению частоты

$$\nu = kF_{\text{ГЦ}}(t),$$

где k – коэффициент, зависящий от типа ГЦ.

В случае резких изменений частоты питающего тока, а также в случае отключения электропитания ГЦ учитываются инерционные свойства роторов ГЦ, так как скорость изменения числа оборотов при изменении частоты питающего тока не может превышать максимального значения, определяемого мощностью. В этих случаях необходимо учитывать уравнение, определяющее характер изменения числа оборотов роторов ГЦ

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = -W, \quad (1)$$

где J – момент инерции ротора ГЦ; ω – угловая скорость вращения ротора $\omega = 2\pi\nu$; W – мощность, вызывающая изменение числа оборотов.

С целью получения оценки максимально возможной скорости изменения числа оборотов ротора уравнение (1) разрешается относительно изменения скорости вращения $\Delta\nu$ за время Δt

$$\frac{\Delta\nu}{\Delta t} = -\frac{W}{4\pi^2 J\nu_0}, \quad (2)$$

где ν_0 – скорость вращения в начальный момент времени.

При отключении электропитания ГЦ скорость вращения роторов ГЦ ν определяется из выражения (2).

Изменение загрузки оборудования

Изменение загрузки оборудования осуществляется перенастройкой межступенного регулятора на заданную величину давления отвала. При перенастройке меняется расход потока и изменяется положение регулировочного клапана регулятора. Моделирование настройки на заданное давление осуществляется изменением на время настройки коэффициента расхода регулятора. Расчет регулятора заменяется расчетом расходомерной шайбы, коэффи-

циент расхода которой отличается от исходного коэффициента регулятора (на момент начала регулировки) на заданную величину. При достижении заданной величины давления отвала осуществляется переход на исходный алгоритм расчета регулятора.

Нарушение штатного функционирования потока МКК

Нарушение штатного функционирования потока МКК возникает как в ходе обычной эксплуатации потока, так и при аварийных ситуациях. Все нарушения функционирования потока МКК моделируются в предложенной модели следующим образом.

Изменения величин закруточного и отборного потоков каждой из линий общего потока МКК моделируются заданием соответствующих величин давлений в виде кусочно-линейной функции времени.

Переключения линий потока МКК, а также отказы запорной арматуры линий моделируются путем изменения состояния запорной арматуры, признаки состояния которой введены в программный алгоритм модели.

Процесс отключения/включения компрессоров моделируется введением в расчетный алгоритм функций времени для степени сжатия компрессоров $\alpha(t)$

$$\alpha(t) = 1,0 + (\alpha_{\text{ном}} - 1) \exp(-At), \quad t < t_{\text{торм}}, \quad (3)$$

$$\alpha(t) = 0,95 + 0,05 \exp(-Bt), \quad t < t_{\text{разгон}}, \quad (4)$$

$$\alpha(t) = \alpha_{\text{ном}}, \quad t \geq t_{\text{разгон}}, \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{ном}}$ – номинальная степень сжатия компрессора; $t_{\text{торм}}$ – время торможения компрессора; $t_{\text{разгон}}$ – время разгона; A, B – расчетные коэффициенты, зависящие соответственно от времени торможения и времени разгона.

Выражение (3) используется в случае отключения компрессора, а (4) и (5) – включения стоящего компрессора. Случай стопорения компрессора моделируется состоянием $\alpha(t)=1$.

Нарушение вакуумной плотности
разделительного оборудования

Нарушение вакуумной плотности разделительного оборудования моделируется путем ввода в расчетный алгоритм в качестве дополнительного потока питания ступени внешнего потока воздуха, являющегося заданной функцией от времени и использованием гидравлических и разделительных характеристик ГЦ.

Различное сочетание возмущающих воздействий

Сочетание возмущающих воздействий моделируется путем задания для каждого из возмущений функции времени, в которой определяется как начало, так и время действия возмущения.

2. Результаты численных и экспериментальных исследований нестационарных процессов

По описанным в [3] алгоритмам расчета нестационарных гидравлических и разделительных процессов проведены численные исследования различных случаев нестационарных возмущений ТС, а также проведен ряд экспериментальных исследований при различных сочетаниях этих возмущений, в том числе с разнесением их по времени.

В результате проведенных исследований и расчетов установлено, что динамика протекания гидравлических процессов соответствует характеру статической устойчивости центрифужных каскадов.

Показано, что в случае соединения нулевых полостей регуляторов, установленных в трассах отвала ступеней, с нулевой линией динамическая устойчивость каскада значительно повышается.

Протекание нестационарных процессов в некоторых случаях (например, изменения потока отбора и питания каскада или закрытия потока отвала) приводит к значительному снижению эффективности работы разделительного оборудования.

При исследовании нестационарных процессов, возникающих в ТС в случае отключения внешних потоков каскадов, показано, что одним из наиболее опасных нарушений работы ТС является отключение потока отвала каскада.

Отмечено, что в случае срабатывания блокировок, заключающихся в закрытии потоков питания каскада с отключенным потоком отвала, возможно закрытие отвальной ступени вследствие срабатывания аварийной защиты по превышению давления с последующим сбросом рабочего газа. Дан ряд рекомендаций (увеличение объема трассы отвала отвальной ступени каскада, автоматическое регулирование загрузки отвальной ступени, применение интегральной защиты), предотвращающих закрытие отвальной ступени и, соответственно, сброс газа. На основе проведенных расчетов предложен порядок действий оперативного персонала, обеспечивающий безопасность разделительного оборудования при закрытии потока отвала на неопределенное время. Показано, что при закрытии потока отвала одного каскада и, как следствие – исключении каскада из технологической цепочки, имеют место значительные концентрационные изменения по всем отборам оставшихся в работе каскадов. Даны рекомендации по корректировке технологического режима, обеспечивающие кондицию товарного потока.

Для случая закрытия потока отбора каскада, установлено, что необходимость отключения потока питания зависит от конкретной схемы работы каскада. Для некоторых рассмотренных случаев, выполнение указанной блокировки не только не обязательно, но и экономически нецелесообразно.

Анализ полученных данных показал, что с помощью регулировки давления в ступенях с повышенной загрузкой по питанию можно избежать

срабатывания аварийной защиты при закрытии потока отбора.

Исследование процессов, связанных с переносом точки подачи питания, позволили сделать следующие заключения, которые следует учитывать при подготовке и проведении этой операции: 1) перенос точки подачи питания в сторону отбора может привести к увеличению давления питания в ступенях, превышающему уставку срабатывания аварийной защиты; 2) перенос точки подачи питания в сторону отвала может привести к уменьшению величины потока отбора последней ступени до значения, меньшего, чем значение величины отбора каскада, что приведет к «срыву» товарного потока и к нарушению работы ТС.

Изучение процессов, связанных с отключением компрессоров линий потоков отбора МКК, показало, что подобные возмущения приводят к значительному снижению потока отбора каскада.

При рассмотрении процессов, связанных с изменением частоты питающего тока, установлено, что увеличение частоты на 0,3 % в течение 2-х ч приводит к «срыву» потока отбора каскада на длительное время и, следовательно, к нарушению работы всей ТС.

Выработаны рекомендации по порядку и степени корректировки технологического режима для сохранения кондиции товарного продукта при закрытии оборудования.

Показано, что результаты ряда расчетов (изменение величин потока отбора каскада, внешнего потока питания ТС, отключение компрессоров линий потоков МКК, изменение частоты питающего тока, закрытие ступеней) удовлетворительно совпадают с результатами экспериментальных исследований, что позволяет судить об адекватности разработанных моделей поведению реального объекта. Максимальные отклонения расчетных данных от экспериментальных не превышают 1,0...4,7 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов В.А., Бутов В.Г., Голдобин Д.Н., Орлов А.А., Тимченко С.Н. Моделирование нестационарных процессов в центробежных каскадах // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 2. – С. 103–106.
2. Власов В.А., Орлов А.А., Бутов В.Г., Тимченко С.Н. Моделирование нестационарных гидравлических процессов в каскадах центрифуг обогащения урана // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 2. – С. 94–97.
3. Власов В.А., Орлов А.А., Тимченко С.Н. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для обучения персонала действиям при авариях на разделительном производстве // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. 15-й научно-техн. конф. – г. Томск, 9–11 декабря 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 90–92.

Разработанные имитационные математические модели нестационарных гидравлических и разделительных процессов, модель с использованием нейронных сетей для определения основных параметров единичной газовой центрифуги и модель, имитирующая возмущающие воздействия и их сочетания будут использованы в дальнейшем при создании компьютерного тренажера разделительного производства.

Заключение

1. Разработана модель возникновения возмущающих воздействий, имитирующих нестационарные гидравлические и разделительные процессы в каскадах газовых центрифуг по обогащению урана. Проведено их численное и экспериментальное исследование.
2. Результаты расчетов в пределах 1,0...4,7 % совпадают с экспериментальными данными, что позволяет судить об адекватности описанных моделей.
3. Выявлены тенденции и закономерности изменения технологических параметров и эффективности разделительного процесса в каскадах и линиях потоков межкаскадных коммуникаций при воздействии нестационарных возмущений.
4. Показано, что протекание нестационарных процессов приводит к снижению эффективности работы разделительного оборудования, уменьшению товарного потока и отклонению его от кондиции.
5. Уточнены требования на срабатывание блокировок и аварийных защит, даны рекомендации по корректировке технологического режима для обеспечения безопасности оборудования, снижения потерь разделительной мощности и сохранения кондиции товарного продукта.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта 09-08-9915-р_офи.

4. Власов В.А., Бутов В.Г., Орлов А.А., Тимченко С.Н. Определение основных параметров работы газовой центрифуги с помощью нейронных сетей // 7-я Курчатовская молодежная научная школа: Матер. – г. Москва, 10–13 ноября 2009. – Москва: РНЦ «Курчатовский институт», 2009. – С. 302.
5. Орлов А.А., Власов В.А., Тимченко С.Н., Наумов С.А. Разработка тренажера Завода разделения изотопов «СХК» // Современные техника и технологии: Матер. XV научно-практ. конф. студентов и молодых ученых. – г. Томск, 4–8 мая 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 86–88.

Поступила 04.06.2010 г.