

2. **Химия** и технология редких и рассеянных элементов. Ч. I. Под ред. К.А. Большакова. Учебное пос. Изд. 2-е. М.: Высшая школа, 1976. 198 с.
3. **Химическая** энциклопедия. Т. 2. М.: Сов. энциклопедия, 1990. 524 с.
4. **Химия** и технология фтористых соединений. Под ред. К.В. Ткачева. Свердловск, УНИХИМ, 1982. 110 с.
5. **Рысс И.Г.** Химия фтора и его соединений. М.: Химия, 1956. 532 с.
6. **Степин Б.Д., Серебренникова Г.М., Наумова Г.М.** Новые направления в разделении веществ методом кристаллизации. М.: Наука, 1978. 35 с.
7. **Степин Б.Д., Горштейн И.Г., Блюм Г.З. и др.** Методы получения чистых неорганических веществ. Л.: Химия, 1969. 63 с.
8. **Золотов Ю.А., Кузьмин Н.М.** Концентрирование микроэлементов. М.: Химия, 1982. 67 с.
9. **Тихонов В.Н.** Аналитическая химия элементов. М.: Наука, 1971. 266 с.

Поступила в Редакцию 11.08.20

УДК 66.028.2:621.564.2:661.87.04

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДОЗИРОВАНИЕМ ХЛАДАГЕНТА АППАРАТА ДЕСУБЛИМАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

Николаев А.В., Криницын Н.С., Дядик В.Ф. (ТПУ, г. Томск)

e-mail:dyadik@tpu.ru

Повышение эффективности производства является актуальным для любого предприятия. Обычно в это вкладывают такие способы ее достижения, как повышение производительности путем внедрения новых технологий, снижение себестоимости выпускаемой продукции посредством уменьшения эксплуатационных затрат и сокращения используемых ресурсов, улучшение качества выпускаемой продукции за счет отладки технологии, повышение отказоустойчивости оборудования в результате планово-предупредительного ремонта. Повышение производительности и качества выпускаемой продукции требует длительных научных изысканий, экспериментальных исследований, что не всегда является приемлемым на действующем предприятии с давно отлаженной технологией. Наиболее доступным способом повышения эффективности производства представляется снижение себестоимости выпускаемой продукции без потери качества за счет сокращения используемых ресурсов.

Гексафторид урана на сублиматном заводе АО «СХК» получают в пламенном реакторе путем высокотемпературного фторирования U_3O_8 и тетрафторида урана [1]. В составе многокомпонентной газовой смеси он поступает на узел десублимации. С выхода узла десублимации технологический газ поступает в аппарат улавливания фторсодержащих продуктов, где остатки газообразного гексафторида урана вступают в реакцию с оксидами урана. Каждая стадия технологического процесса сопровождается вы-

делением большого количества теплоты. Для охлаждения аппаратов и теплоотвода используются охлаждающие контуры, в которых в качестве хладагента применяется подготовленная вода.

Единая трубопроводная сеть охлаждения аппаратов и технологических линий производства запитана от общего магистрального трубопровода, на входе которого обеспечивается регламентное давление. Технологический процесс предполагает периодический ввод и вывод из эксплуатации аппаратов, снижение и повышение нагрузки. Такой переменный режим работы приводит к колебаниям давления и расхода воды в единой трубопроводной сети охлаждения аппаратов.

Одними из потребителей хладагента являются аппараты узла десублимации, в которых требуется стабильный расход хладагента для формирования условий десублимации гексафторида урана [2].

Аппарат десублимации. Он представляет собой кожухотрубный теплообменный аппарат с вертикальным стальным обогреваемым цилиндрическим корпусом, нижняя часть которого заканчивается конусом и запорной задвижкой [3, 4]. Внутри аппарата смонтирована разделенная на секции трубчатка. Технологический газ поступает в нижнюю часть, движется вдоль трубчатки и выходит в верхней части. Трубчатка вводится через верхнюю крышку аппарата и представляет собой разветвленную трубопро-

водную сеть, разделенную на девять секций. Каждая секция состоит из вертикальных параллельно соединенных трубок Фильда. В зависимости от удаленности от радиального центра аппарата число трубок в секции варьируется от 5 до 13.

Работа аппарата десублимации предусматривает два режима: накопление десублимата и его сброс. Во время накопления в секции трубки подается хладагент — вода. За счет их охлаждения возникают условия для десублимации гексафторида урана на их поверхности. Сброс десублимата подразумевает отслаивание накопленного продукта и его осыпание под действием силы тяжести в транспортный контейнер. Для этого хладагент вытесняется теплоносителем, поверхность трубки нагревается. В результате происходят сублимация пограничного слоя десублимата и его последующее осыпание.

Циклический принцип работы заключается в чередовании режимов накопления и сброса десублимата. Режим накопления определяется временем захлаживания. Длительность времени захлаживания влияет на толщину и плотность накапливаемого десублимата. Режим сброса задается временным интервалом отпаривания трубки, достаточным для осыпания десублимата.

Для соблюдения условий десублимации требуется поддержание температуры поверхности трубки ниже температуры фазового перехода гексафторида урана. Для этого необходимо гарантировать расход хладагента, обеспечивающий требуемый теплоотвод в результате десублимации [5].

Расчет расхода хладагента. На вход аппарата десублимации поступает многокомпонентный технологический газ массой

$$m_T = \rho_T Q_{v_T} / 3600,$$

где ρ_T — плотность технологического газа, кг/м³; Q_{v_T} — объемный расход технологического газа, м³/ч.

Масса газообразного гексафторида урана в составе технологического газа вычисляется в соответствии с его объемной долей по формуле

$$m_{UF_6T} = \rho_{UF_6T} Q_{v_T} \phi_{UF_6} / 3600,$$

где ϕ_{UF_6} — объемная доля гексафторида урана в составе поступающего технологического газа.

На вход узла десублимации поступает разогретый технологический газ. По мере продвижения по аппарату он охлаждается, в результате чего хладагенту передается количество теплоты

$$Q_T = c_T m_T (T_{T,ВХ} - T_{T,ВЫХ}),$$

где c_T — теплоемкость технологического газа, Дж/(кг·град.); $T_{T,ВХ}$, $T_{T,ВЫХ}$ — температура технологического газа на входе и выходе аппарата соответственно, К.

При достижении технологическим газом температуры фазового перехода гексафторида урана начинается его десублимация. Теплота фазового перехода рассчитывается по уравнению

$$Q_{ф.п} = m_{UF_6T} \Delta H_{UF_6} k,$$

где ΔH_{UF_6} — тепловой эффект фазового перехода, Дж/кг; k — степень десублимации газообразного гексафторида урана.

После фазового перехода твердый гексафторид урана охлаждается на поверхности трубки до температуры хладагента, на что затрачивается количество энергии

$$Q_{UF_6ТВ} = c_{UF_6T} m_{UF_6T} k (T_{ф.п} - T_x),$$

где c_{UF_6T} — теплоемкость твердого гексафторида урана, Дж/(кг·град.); $T_{ф.п}$, T_x — температура фазового перехода и хладагента, К.

Корпус аппарата десублимации прогревается тепловой рубашкой, что исключает десублимацию гексафторида урана на его поверхности. Влияние выделяемой теплоты от корпуса на технологический газ оценивается по формуле

$$Q_K = k_K S_K (T_K - T_{T,ВЫХ}),$$

где k_K — коэффициент теплопередачи от стенки аппарата к технологическому газу, Вт/(м²·град.); S_K — площадь поверхности корпуса аппарата десублимации, м²; T_K — температура тепловой рубашки аппарата десублимации, К.

Тогда общее количество теплоты $Q_{сум}$, отводимое хладагентом, вычисляется по принципу суперпозиции

$$Q_{сум} = Q_K + Q_T + Q_{UF_6ТВ} + Q_{ф.п}.$$

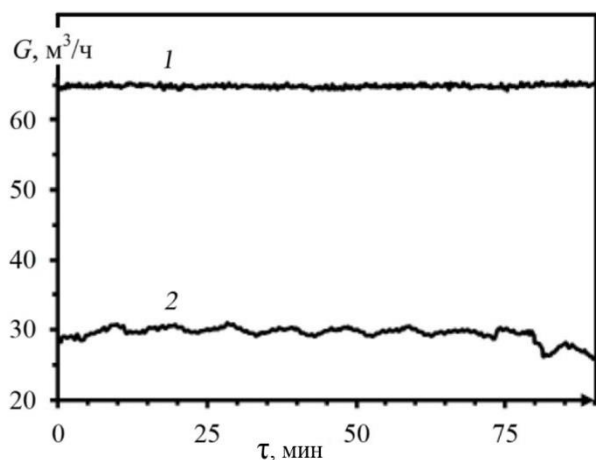
Расход хладагента Q_w , требуемый для отвода образующегося количества тепловой энергии $Q_{\text{сум}}$, рассчитывается, исходя из свойств хладагента и степени его нагрева за время движения в трубчатке:

$$Q_w = Q_{\text{сум}} / \rho_x c_x \Delta T_x,$$

где ρ_x — плотность хладагента, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_x — теплоемкость хладагента, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; ΔT_x — разность между температурой хладагента на выходе и входе, К .

Зарегистрированные на производстве показания расходомера и расчетный расход хладагента показаны на рис. 1. При расчете расхода хладагента в качестве исходных использовали производственные показания технологических переменных. Расчет проводился, исходя из условия повышения температуры хладагента за время его движения в трубчатке на 2°C . Видно, что для выполнения заданного условия требуется расход $30 \text{ м}^3/\text{ч}$. Регламентный расход хладагента для обеспечения технологического процесса десублимации составляет не менее $60 \text{ м}^3/\text{ч}$. Таким образом, можно говорить о возможности двукратной экономии ресурсов.

Эксперимент. Для подтверждения расчетного расхода хладагента проведены эксперименты на действующем производстве. В качестве расходомера использовали отечественный электромагнитный расходомер Питерфлоу РС фирмы ООО «Термотроник». Расходом хладагента управляли с помощью нормально открытого одностороннего клапана с мембранным исполнительным механизмом 25ч41пНО фирмы ООО

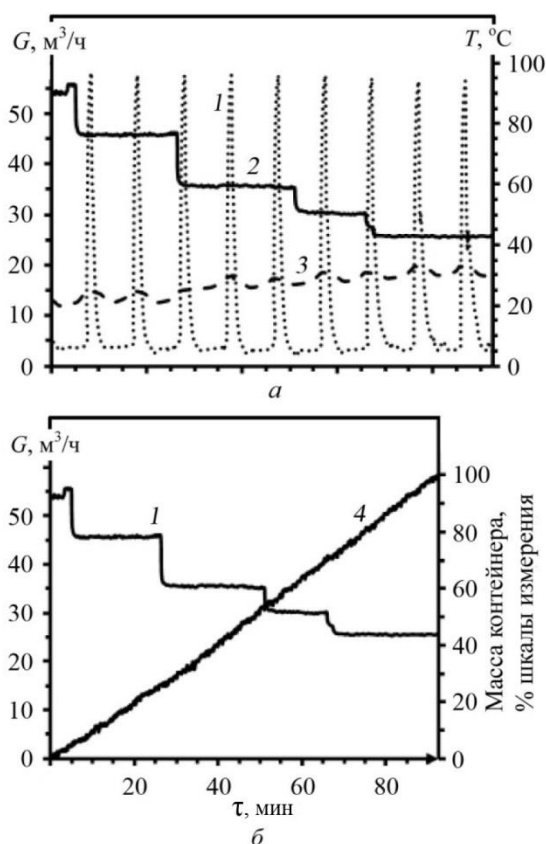


Р и с. 1. Измеренный (1) и расчетный расход (2) хладагента

«Авангард». Температуру измеряли термометрами сопротивления, установленными на общем входном коллекторе и на выходе каждой секции.

Эксперимент проводили во время штатной работы в течение 2 ч. Критериями стабильности протекания технологического процесса служили следующие технологические переменные: температура хладагента на выходе секций трубчатки не выше 15°C , температура технологического газа на выходе аппарата десублимации не выше 45°C .

Изменение температуры хладагента показано на рис. 2 для 5-й секции с наибольшим числом трубок и наиболее чувствительной к его колебаниям. Пик температуры хладагента указывает на режим сброса накопленного на трубчатке десублимата. В интервалы между пиками десублимат накапливается. Расход снижали пошагово. После очередного снижения выжидали время окончания переходного процесса, которое было определено как два цикла работы трубчатки. Расход снижали в четыре шага, в результате которых было достигнуто его двукратное уменьшение.

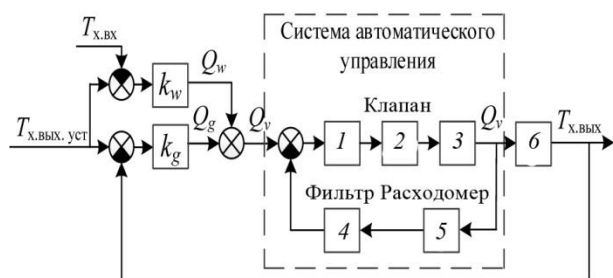


Р и с. 2. Расход (1), температура хладагента на выходе секции (2), газа на выходе аппарата (3), масса контейнера (4) в эксперименте по снижению расхода

В результате снижения расхода хладагента в 2 раза температура технологического газа на выходе повысилась с 20 до 30 °С, температура хладагента на выходе трубочки — с 5 до 7 °С. Масса в транспортном контейнере накапливалась равномерно. Технологические переменные в процессе испытаний соответствовали стабильному протеканию процесса десублимации.

Разработка системы управления дозированием хладагента. Полученные в ходе эксперимента результаты подтвердили теоретические расчеты и возможность безопасного снижения расхода хладагента. Однако необходимо учесть, что длительное поддержание расхода на одном уровне может привести к ухудшению качества десублимации. Это связано с возможным недостаточным охлаждением трубочки в результате повышения нагрузки, расхода технологического газа после изменения состава перерабатываемого сырья и изменения температуры хладагента в результате сезонной смены.

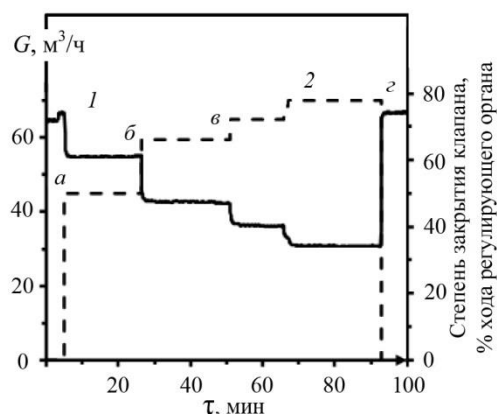
Заниженный расход хладагента уменьшает степень десублимации гексафторида урана в аппарате, следовательно, его производительность. Для поддержания расхода хладагента на необходимом уровне разработана комбинированная система управления, способная реагировать на указанные возмущения (рис. 3). Уставка на расход хладагента Q_v вычисляется как сумма расчетного расхода Q_w , исходя из текущего режима работы производства, и корректирующего Q_g , формируемого на основании сигнала рассогла-



Р и с. 3. Информационно-структурная схема комбинированной системы управления дозированием хладагента аппарата десублимации производства гексафторида урана: 1 — регулятор; 2 — исполнительное устройство; 3 — технологический объект управления; 4 — преобразователь сигнала; 5 — измерительное устройство; 6 — трубочка десублиматора; k_w — коэффициент передачи цепи компенсации; k_g — коэффициент передачи регулятора системы стабилизации температуры на выходе трубочки

сования уставки и измеренной температуры хладагента на выходе трубочки $T_{х.вых}$. Стабилизация расхода на требуемом уровне реализуется одноконтурной системой автоматического управления. Фильтрация измеряемого сигнала по каналу обратной связи вызвана нестабильностью расхода, возникающей в результате изменения давления в магистральной сети и циклической работы аппарата. Сглаживание измерений выполняется с помощью экспоненциального фильтра.

Система автоматического управления. Первым этапом разработки системы автоматического управления расходом хладагента является идентификация технологического объекта управления, т.е. математическое описание закономерностей, присущих объекту. В данном случае технологический объект управления состоит из участка трубопровода от места установки клапана до расходомера. Динамические модели строятся, как правило, на основании экспериментальных исследований реакции объекта на входное ступенчатое воздействие (рис. 4).



Р и с. 4. Расход хладагента (1) и степень закрытия клапана (2) в эксперименте

Идентификация выполнялась методом Орманса [6]. При анализе рассматривались участки с наиболее выраженными переходными процессами. По его результатам предложено описывать исследуемый объект инерционным звеном первого порядка с запаздыванием

$$W_{об} = K_{об} \exp(-\tau_{об} s) / T_{об} s + 1. \quad (1)$$

Результаты определения параметров модели объекта (1) по экспериментальным переходным процессам приведены в таблице. При усреднении параметров объекта управления переходный

процесс под номером z не учитывался как ложный.

Расчетные параметры объекта управления по результатам идентификации

Переходный процесс (см. рис. 4)	Изменение закрытия клапана, % хода регулирующего органа	Коэффициент передачи $K_{об}$	Постоянная времени $T_{об}$, с	Запаздывание $\tau_{об}$, с
a	0—50	0,96	3,6	0,85
b	50—66	0,63	2,5	1
v	66—72	0,83	6,25	0
z	78—0	0,4	1,9	1,15
Среднее		0,66	2,7	1

Таким образом, исследуемый объект описывается следующей передаточной функцией:

$$W_{об} = 0,66 \exp(-s) / 2,7s + 1.$$

Закон регулирования выбирали в зависимости от отношения $\tau_{об}/T_{об}$ [7]. При условии $0,2 \leq \tau_{об}/T_{об} < 0,66$ рекомендуется применять пропорционально-интегральный закон регулирования. В данном случае $\tau_{об}/T_{об} = 0,37$. Параметры настройки пропорционально-интегрального регулятора рассчитывали методом оптимального модуля [8]. По результатам расчетов были получены следующие параметры настройки регулятора: $K_p = 2,1$, $T_i = 2,7$ с. Период квантования согласно рекомендациям $\Delta t = (0,1—0,4)T_{об}$ выбран равным $\Delta t = 1$ с [9].

Заключение. Математические расчеты показали возможность снижения расхода хладагента в режиме накопления десублимата в 2 раза. Последующий эксперимент на действующем производстве подтвердил полученный результат. Во время его проведения показатели стабильности протекания процесса оставались в пределах принятого на предприятии технологического регламента. Разработанная комбинированная система управления дозирования хладагента позволяет обеспечить теплоотвод и создать условия для регламентного протекания десублимации внутри аппарата. Комбинированная система управления включает расчет необходимого расхода хладагента, исходя из соблюдения теплового баланса с его коррекцией по текущей выходной температуре, и одноконтурную систему автоматического управления,

обеспечивающую удержание расхода хладагента на рассчитанном уровне. Разработанная комбинированная система управления позволит снизить объем хладагента без потери качества и объема выпускаемой продукции.

Предложенная методика дозирования хладагента может быть применена для последующих ступеней узла десублимации. В этом случае параметры разработанной системы должны быть адаптированы к условиям эксплуатации аппаратов.

Исследования по разработке системы управления дозированием хладагента аппарата десублимации производства гексафторида урана были профинансированы в рамках проекта № 8.3079.2017/4.6 Государственного задания «Наука».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Г.Г. Фторидные технологии в производстве ядерного топлива. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2014. 152 с.
2. Горелик А.Г., Амيتين А.В. Десублимация в химической промышленности. М.: Химия, 1986. 272 с.
3. Курин Н.П., Андреев Г.Г., Ливенцов С.Н. и др. АСУТП производств гексафторида урана. — Изв. Томского политехнического ун-та, 2002, т. 305, № 3, с. 398—402.
4. Nikolaev A.V., Krinitsyn N.S., Dyadik V.F. Algorithm of automatic control of uranium hexafluoride production deposition. — Bul. Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engng, 2019, v. 330, № 5, p. 75—83.
5. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V. Desublimation for purification and transporting UF_6 : process description and modeling. — Separation Purification Rev., 2017, v. 46, № 1, p. 81—89.
6. Круг Е.К., Минина О.М. Электрические регуляторы промышленной автоматики. М.: Госэнергоиздат, 1962. 335 с.
7. Штейнберг Ш.Е., Залуцкий И.Е. Адаптация стандартных регуляторов к условиям эксплуатации в промышленных системах регулирования. — Пром. АСУ и контроллеры, 2003, № 4, с. 11—16.
8. Гурецкий Х. Анализ и синтез системы с запаздыванием. М.: Машиностроение, 1974. 328 с.
9. Гибшман Е.А. Реализация оптимальных режимов эксплуатации систем регулирования в АСУТП. — Пром. АСУ и контроллеры, 2004, № 6, с. 1—6.

Поступила в Редакцию 5.12.19