

УДК 661.87

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ДЕСУБЛИМАЦИИ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

А. А. Орлов, Р. В. Малюгин

(Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск)

Представлен обзор и анализ известных подходов к математическому моделированию процесса десублимации гексафторида урана. Показаны недостатки созданных математических моделей. Выработана концепция развития теоретических исследований и оптимизации процесса десублимации.

Ключевые слова: гексафторид урана, тепло- и массоперенос, десублимация, математическая модель, нестационарный процесс.

Модернизация разделительных предприятий с заменой старых газовых центрифуг на современные требует создания и проектирования конденсационно-испарительных установок (КИУ) большей производительности. В связи с этим становится актуальной разработка математической модели процесса десублимации для разделительных производств, которая может быть использована при расчете и проектировании участка КИУ повышенной производительности, а также для исследования и оптимизации самого процесса.

Целью настоящего обзора является анализ известных подходов к математическому моделированию процесса десублимации гексафторида урана для выработки концепции развития указанного направления.

Десублимация относится к классу задач Стефана, рассматривающих процессы тепло- и массопереноса, которые сопровождаются поглощением или выделением тепла при фазовом переходе, с целью определения границы фазового перехода и температурного поля внутри вещества. Передача энергии в каждой фазе вещества описывается уравнением теплопроводности, а поведение границы фазового перехода — балансом энергий при переходе вещества из одного агрегатного состояния в другое (условием Стефана). Ключевым условием также является равенство температуры среды на границе фазового перехода температуре плавления рассматриваемого вещества, которая считается известной констан-

той. Это условие имеет характер аксиомы, так как не следует ни из каких фундаментальных законов, но достаточно точно отражает многие реальные процессы [1].

Прямая задача Стефана состоит в нахождении распределения температуры и закона движения границы разделения фаз при заданных граничных и начальных условиях, а также определении условий в области фазового перехода. Обратная задача Стефана заключается в нахождении распределения температуры в сосуществующих фазах по заданному закону изменения границы фаз.

Существует два подхода к теоретическому описанию происходящих процессов: статистический [2–5], основанный на модельных атомно-молекулярных взаимодействиях, и феноменологический (термодинамический) [6–9], рассматривающий состояние системы с точки зрения происходящих в ней количественных превращений энергии.

В статистическом методе рассматривается поведение отдельных частиц системы и с помощью методов математической статистики усредняются их характеристики. Полученные средние значения физических величин характеризуют состояние системы в целом. Например, А. Г. Гореликом и А. В. Амитиным в работе [10] нестационарный процесс десублимации разделен на три периода:

- 1) рост отдельных кристаллов (рис. 1, а) — охлаждаемая поверхность покрывается тон-

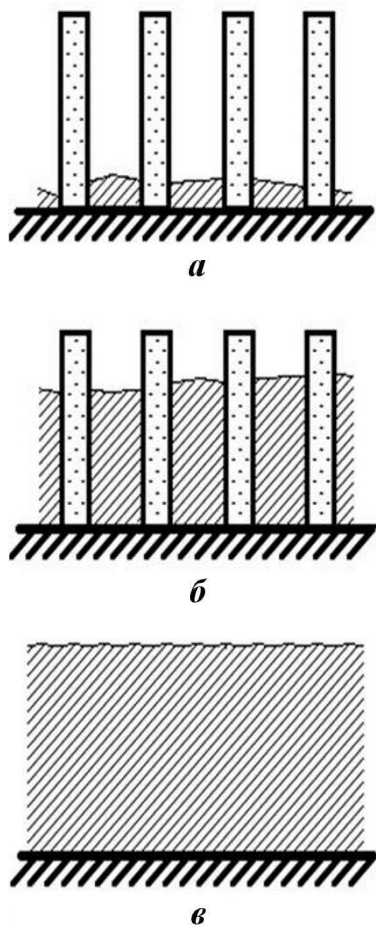


Рис. 1. Изменение структуры десублимата в процессе его роста: *a* — рост отдельных кристаллов; *б* — формирование слоя десублимата; *в* — стабилизация слоя десублимата

ким слоем десублимата, на котором появляются кристаллы, располагающиеся на расстоянии друг от друга и растущие в вертикальном направлении с одинаковой скоростью;

- 2) рост шероховатого слоя десублимата (рис. 1, *б*) — формирование более однородного слоя десублимата с последующим увеличением его средней плотности и нарастанием толщины до момента времени, соответствующего достижению поверхностью десублимата температуры плавления;
- 3) завершение роста (рис. 1, *в*) — форма слоя десублимата не претерпевает изменений до тех пор, пока в результате роста термического сопротивления слоя его поверхность не достигнет температуры плавления, после чего начинается оплавление поверхности слоя десублимата.

Феноменологический метод при описании процесса десублимации не опирается на модельные представления об атомно-молекулярной структуре вещества, а рассматривает десублимацию как совокупность двух самостоятельных, протекающих одновременно процессов — массопереноса (фазового перехода) и теплопереноса. Движущая сила этих процессов связана с термодинамическими параметрами газообразного UF_6 — разностью температур и разностью парциальных давлений около теплообменной поверхности и внутри десублимационного аппарата [11–13].

Уравнение теплопроводности выводится из закона сохранения энергии и закона Фурье:

$$\frac{\partial T(\xi, \tau)}{\partial \tau} + \frac{1}{c_P \rho} \frac{\partial}{\partial \xi} q(\xi, \tau) = 0, \quad (1)$$

$$q(\xi, \tau) = -\lambda \frac{\partial}{\partial \xi} T(\xi, \tau), \quad (2)$$

где $T(\xi, \tau)$ [K] — температура; ξ, τ — безразмерные координата и время; c_P [Дж/(кг·K)] — удельная изобарная теплоемкость; ρ [кг/м³] — плотность вещества; $q(\xi, \tau)$ [Дж/кг] — тепловой поток; λ [Дж/(м·с·K)] — коэффициент теплопроводности.

Из соотношений (1), (2) получается известное уравнение теплопроводности, учитывающее диффузионный механизм переноса тепла:

$$\frac{\partial T(\xi, \tau)}{\partial \tau} - a^2 \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} T(\xi, \tau) = 0, \quad (3)$$

где $a = \frac{\lambda}{c_P \rho}$ [м²/с] — коэффициент температуропроводности среды.

Уравнение (3) справедливо, если среда неподвижная. В случае, когда среда подвижная, имеет место еще и конвективный механизм переноса тепла, вызванный движением самой среды. При этом уравнение теплопроводности принимает вид [14]

$$\frac{\partial T(\xi, \tau)}{\partial \tau} - a^2 \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} T(\xi, \tau) + V \frac{\partial}{\partial \xi} T(\xi, \tau) = 0,$$

где V [м/с] — скорость конвективного потока.

В зависимости от конкретной задачи уравнения дополняются различными граничными условиями [6–9, 14].

Рассмотрим подробнее существующие подходы к описанию процесса десублимации UF_6 , представленные в литературе.

Математическая модель процессов тепло- и массопереноса UF₆ в горизонтальные транспортные емкости описана в работе [15]. В этой расчетной модели сделаны следующие допущения:

1. Считается, что процесс десублимации UF₆ происходит только на цилиндрической, орошаемой хладагентом, поверхности емкости, а на торцевых стенках в силу слабого теплообмена с окружающей воздушной средой он не учитывается.
2. Десублимат в каждый момент времени представляется цилиндром с осевой симметрией, которая обусловлена равномерным распределением давления газообразного UF₆ внутри емкости, а также незначительным изменением температуры хладагента по мере ламинарного обтекания им боковой стенки емкости.
3. Процесс десублимации считается квазистационарным, т. е. распределение температур и толщина слоя твердого UF₆ линейны и слабо изменяются во времени.

Авторами [15] использованы следующие граничные условия: температура наружной поверхности цилиндрической стенки считается постоянной и равной температуре хладагента, а температура внутренней стенки десублимированного UF₆ равна температуре фазового перехода (десублимации) UF₆ для текущего давления в емкости.

Тепловой поток через цилиндрическую поверхность слоя десублимата рассчитывается по формуле

$$\frac{dQ}{dt} = K \pi L (T_p - T_c),$$

где dQ [Дж/(м²·с)] — количество тепла, проходящего через поверхность теплообмена за время dt ; K [Дж/(м·с·К)] — коэффициент теплопередачи через двухслойную поверхность; L [м] — длина цилиндрической стенки транспортной емкости; T_c [К] — температура охлажденного слоя UF₆, равная температуре хладагента; T_p [К] — температура фазового равновесия на границе десублимации UF₆, связанная с соответствующим давлением газообразного UF₆ в емкости в диапазоне температур от 0 до 64 °С [16, 17] формулой

$$T_p = \frac{\lg P - 7,76}{0,015} + \frac{\sqrt{(7,76 - \lg P)^2 - 0,03 \cdot (228,10 - 183,41 \lg P)}}{0,015},$$

где P [Па] — давление газообразного UF₆ в емкости.

Количество теплоты, образующееся в системе при фазовом переходе UF₆, определяется следующим образом [15]:

$$\frac{dQ}{dt} = \left[\Delta H + \frac{C_U (T_p - T_c)}{2} \right] \frac{dm_U}{dt}.$$

Здесь ΔH [Дж/кг] — удельная теплота десублимации UF₆; C_U [Дж/(кг·К)] — удельная теплоемкость твердого UF₆ при постоянном давлении; $\frac{dm_U}{dt}$ — скорость изменения массы десублимированного UF₆, которая определяется при решении дифференциального уравнения

$$\frac{dm_U}{dt} = 2\rho\pi L (r_0 - r) \frac{dr}{dt},$$

где r_0 [м] — внутренний радиус корпуса емкости; r [м] — толщина слоя UF₆; $\frac{dr}{dt}$ [м/с] — скорость изменения толщины десублимированного UF₆.

С учетом того, что количество теплоты, отданное системой, равно количеству теплоты, которое образовалось в системе, авторами [15] в дифференциальном виде получена зависимость изменения толщины слоя десублимированного UF₆ от времени:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{T_p - T_c}{\left[\Delta H + \frac{C_U (T_p - T_c)}{2} \right] 2\rho K (r_0 - r)}. \quad (4)$$

Таким образом, при известной из уравнения (4) толщине слоя десублимата определяется масса UF₆, перешедшего в твердую фазу:

$$m = \rho\pi L \left[r_0^2 - (r_0 - r)^2 \right].$$

На базе разработанной математической модели процесса десублимации UF₆ создана и успешно используется программа расчета степени заполнения транспортных емкостей в режиме реального времени.

В работе [18] процессы тепло- и массопереноса при десублимации UF₆ в вертикальные транспортные емкости рассматриваются как стационарные, при этом коэффициент теплопроводности твердого UF₆ не изменяется, а транспортная емкость представлена в виде бесконечного цилиндра.

Граничные условия записаны в следующем виде:

$$T(r_0) = T_{cor}; \quad -\lambda \left(\frac{dT}{dr} \right)_{r_s} = \frac{Q}{2\pi L_T r_s}, \quad (5)$$

где T_{cor} [К] — температура корпуса емкости; r_s [м] — радиус границы раздела фаз UF_6 ; L_T [м] — высота транспортной емкости; Q — тепловой поток от границы раздела фаз UF_6 к корпусу емкости, для определения которого использовалась эмпирическая формула, учитывающая процесс массопереноса:

$$Q = \Delta H \frac{dm_U}{dt}.$$

Процесс теплопереноса описывается стационарным дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0. \quad (6)$$

В результате решения уравнения (6) в полярной системе координат с учетом граничных условий (5) авторами [18] получена зависимость распределения температуры в слое десублимата по радиусу емкости:

$$T(r) = T_c - \frac{Q}{2\pi L_T \lambda} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right). \quad (7)$$

При экспериментально установленном линейном характере зависимости $T(r)$ по уравнению (7) определено значение коэффициента теплопроводности λ твердого UF_6 в температурном диапазоне $0 \div 10^\circ C$.

Математическая модель процессов тепло- и массопереноса в аппаратах с тепловым сбросом создана пока только для сублиматного производства [19–23]. В ее основе лежат уравнения материального и теплового баланса:

$$m = G_{m UF_6} \alpha t_3; \quad (8)$$

$$Q_\Gamma = Q_c - Q_d, \quad (9)$$

где m [кг] — масса десублимата; $G_{m UF_6}$ [кг/с] — массовый расход UF_6 на входе десублиматора, определяется на основании стехиометрического состава парогазовой смеси на выходе пламенного реактора; α — степень десублимации; t_3 [с] — время захолаживания; Q_Γ [Дж/с] — количество тепла, отданное газовой фазой через поверхность теплообмена; Q_c [Дж/с] — количество

тепла, переданное через цилиндрическую стенку теплообменных элементов с учетом слоя десублимата; Q_d [Дж/с] — количество тепла, выделенное в результате фазового перехода.

Процесс десублимации считается стационарным.

Масса десублимата определяется через объем, который занимает осевший на внешней поверхности трубок Фильда слой десублимата:

$$m = \pi L_F r (2R_F + r) \rho, \quad (10)$$

где L_F и R_F [м] — длина и внешний радиус трубок Фильда.

Для оценки интенсивности происходящего процесса массопереноса авторами [23] используется степень десублимации α :

$$\alpha = \frac{G^{вх} C_{UF_6}^{вх} - G^{вых} C_{UF_6}^{вых}}{G^{вх} C_{UF_6}^{вх}}. \quad (11)$$

Здесь $G^{вх}$ и $G^{вых}$ [m^3/c] — расходы парогазовой смеси на входе и выходе десублиматора; $C_{UF_6}^{вх}$ и $C_{UF_6}^{вых}$ — концентрации UF_6 в парогазовой смеси на входе и выходе десублиматора, при этом $C_{UF_6}^{вх}$ определяется по показаниям масс-спектрометра, а $C_{UF_6}^{вых}$ по следующей формуле:

$$C_{UF_6}^{вых} = \frac{P_{UF_6}}{P_{ап}} = \frac{e^{0,12342T_{п} - 10,26646 - 0,000144291T_{п}^2 - 2678,406/T_{п}}}{P_{ап}}, \quad (12)$$

где P_{UF_6} [Па] — парциальное давление UF_6 при известной температуре на поверхности теплообмена; $P_{ап}$ [Па] — давление в аппарате; $T_{п}$ [К] — температура на поверхности теплообмена с учетом слоя десублимата.

Q_Γ , Q_c и Q_d , входящие в уравнение теплового баланса (9), определяются из уравнений

$$\begin{aligned} Q_\Gamma &= \frac{G_\Gamma}{V_\mu} \sum_i \mu_i c_i (T_\Gamma - T_\Pi); \\ Q_c &= \frac{2\pi\lambda L_F (T_\Pi - T_c)}{\ln \left(1 + \frac{r}{R_F} \right)}; \\ Q_d &= \Delta H m = \Delta H G_{UF_6}^{вх} \alpha, \end{aligned} \quad (13)$$

где T_Γ [К] — температура технологического газа на входе в десублиматор; V_μ [$m^3/моль$] — молярный объем технологического газа; μ_i [моль] — количество вещества i -го компонента парогазовой смеси; c_i [Дж/(моль·К)] — молярная теплоемкость i -го компонента парогазовой смеси;

$G_{\text{UF}_6}^{\text{вх}}$ [кг/с] — количество UF_6 , поступившего в десублиматор.

В результате решения уравнения теплового баланса (9) с учетом (13) в работе [23] получено выражение для определения температуры поверхности теплообмена:

$$T_{\text{п}} = \frac{AT_{\text{г}} + BT_{\text{с}} + \Delta Hm}{A + B}, \quad (14)$$

где

$$A = \frac{G_{\text{г}}}{V_{\mu}} \sum_i \mu_i c_i; \quad B = \frac{2\pi\lambda L_F}{\ln\left(1 + \frac{r}{R_F}\right)}. \quad (15)$$

При совместном решении уравнений (8)—(12) и (14), (15) определяются масса образовавшегося десублимата и скорость заполнения транспортных емкостей.

Все рассмотренные математические модели процесса десублимации UF_6 относятся к стационарным или квазистационарным, в то время как процесс является нестационарным; на его характер существенное влияние оказывает структура образующегося слоя, поскольку интенсивность процесса в значительной мере определяется теплопроводностью слоя десублимата [2]. Толщина и плотность слоя десублимата, коэффициенты тепло- и массопереноса, температура поверхности десублимации также изменяются с течением времени. В связи с этим представляет интерес рассмотреть подходы к теоретическому описанию нестационарных процессов тепло- и массопереноса при десублимации.

В. А. Вариводовой и др. [24—30] учтено изменение плотности инея в процессе инееобразования на плоской, цилиндрической теплообменных поверхностях, а также поверхности с ребрением.

Для математического описания процесса теплопереноса на плоской поверхности в работе [24] используются дифференциальные уравнения теплопроводности

$$c\rho(\tau) \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \xi(\tau); \quad (16)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \quad -\delta < x < 0, \quad (17)$$

где τ [с] — время; T_1 [K] — температура инея; T_2 [K] — температура стенки; a_2 [$\text{м}^2/\text{с}$] — коэффициент температуропроводности стенки; λ_1 [$\text{Дж}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{K})$] — коэффициент теплопроводности инея; c [$\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$] — удельная теплоемкость льда; $\rho(\tau)$ [$\text{кг}/\text{м}^3$] — средняя по слою плот-

ность инея; x [м] — расстояние по оси, направленной по нормали к теплообменной поверхности; δ [м] — толщина стенки; $\xi(\tau)$ [м] — толщина слоя инея.

На границе охлаждающей поверхности с хладагентом принимаются граничные условия первого рода:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \alpha_3 (T_2 - T_3), \quad x = -\delta, \quad (18)$$

где T_3 [K] — температура хладагента; λ_2 [$\text{Дж}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{K})$] — коэффициент теплопроводности стенки; α_3 [$\text{Дж}/(\text{м}^2\cdot\text{с}\cdot\text{K})$] — коэффициент теплопередачи стенки.

На границе поверхности теплообмена с инеем принимаются граничные условия четвертого рода:

$$T_2 = T_1, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}, \quad x = 0. \quad (19)$$

Теплообмен через поверхность инея с учетом фазового перехода описывается уравнением

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \alpha_0 (T_0 - T_1) + r_D \frac{d(\xi\rho)}{d\tau}, \quad (20)$$

где T_0 [K] — температура газообразной среды; α_0 [$\text{Дж}/(\text{м}^2\cdot\text{с}\cdot\text{K})$] — коэффициент теплопередачи инея; r_D [$\text{Дж}/\text{кг}$] — скрытая теплота сублимации.

Принимается, что при массообмене часть влаги проникает внутрь инея, увеличивая его плотность, а другая часть превращается в иней на границе раздела фаз, увеличивая его толщину:

$$\frac{\xi d\rho}{d\tau} = \frac{D\left(1 - \frac{\rho}{\rho_1}\right)}{R\psi_1 T_1} \frac{\partial p''}{\partial T_1} \frac{\partial T_1}{\partial x}; \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho d\xi}{d\tau} &= \beta (p - p'') - \\ &- \frac{D\left(1 - \frac{\rho}{\rho_1}\right)}{R\psi_1 T_1} \frac{\partial p''}{\partial T_1} \frac{\partial T_1}{\partial x}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $\xi \frac{d\rho}{d\tau}$ [$\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$] — часть влаги, увеличивающая плотность инея; $\rho \frac{d\xi}{d\tau}$ [$\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$] — часть влаги, увеличивающая толщину слоя инея; ρ_1 [$\text{кг}/\text{м}^3$] — плотность льда; D [$\text{м}^2/\text{с}$] — кинематическая вязкость охлаждаемого влажного воздуха; R [$\text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{K})$] — газовая постоянная влажного воздуха; ψ_1 [$\text{кг}/\text{м}^3$] — плотность структуры инея; p'' , p [Па] — парциальные давления

пара соответственно на поверхности инея и в области влажного пара; β — коэффициент массоотдачи влаги, приведенный к парциальному давлению.

При приведении системы уравнений (16)—(22) к безразмерному виду получены аналитические зависимости плотности инея и времени его образования как функции толщины инея. На основании анализа этих зависимостей авторами [24] отмечены следующие особенности образования инея:

1. Толщина стенки теплообменной поверхности с теплопроводностью $\lambda = 45$ Дж/(м·с·К) практически не влияет на процесс десублимации.
2. При увеличении теплоотдачи со стороны охлаждаемой среды слой десублимата растет медленнее, но при этом увеличивается скорость его уплотнения.
3. При увеличении коэффициента массоотдачи β слой инея растет быстрее, а скорость его уплотнения уменьшается.
4. При равных условиях на цилиндрической поверхности нарастание инея происходит медленнее, чем на плоской поверхности, и эта разница тем существеннее, чем меньше внешний радиус цилиндрической поверхности.

В работах [26, 28] сделано предположение, что слой инея с плотностью ρ_c содержит микропоры в виде призм с треугольным основанием. Таким образом, учитывается изменение плотности инея не только во времени, но и по толщине слоя (рис. 2). Иней рассматривается как сплошная

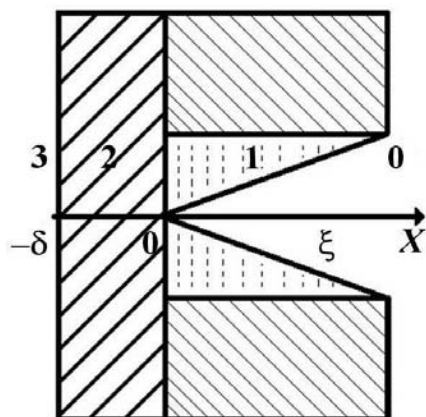


Рис. 2. Расчетная схема инеобразования (0 — воздух; 1 — иней; 2 — стенка; 3 — хладагент)

среда, поэтому принимается следующая гипотеза плотности инея:

$$\rho(x, \tau) V = \rho_c \left(1 - \frac{kx}{\xi} \right),$$

где ρ_c — плотность инея на стенке $x = 0$; $k = \text{const}$; $\xi = \xi(\tau)$; $(1 - kx/\xi)$ — часть объема, занятая инеем с плотностью ρ_c .

В работе [31] предложен подход к вычислению среднего значения теплопроводности неоднородных сред. Гетерогенная система представлена совокупностью последовательно и параллельно соединенных квазиоднородных участков, которые получены при разделении среды соответственно изотермическими и адиабатическими плоскостями. Эффективный коэффициент теплопроводности среды вычисляется суммированием по аналогии с электрическим сопротивлением (рис. 3).

Из анализа рассмотренных математических моделей процесса десублимации UF_6 следует, что все они имеют недостатки.

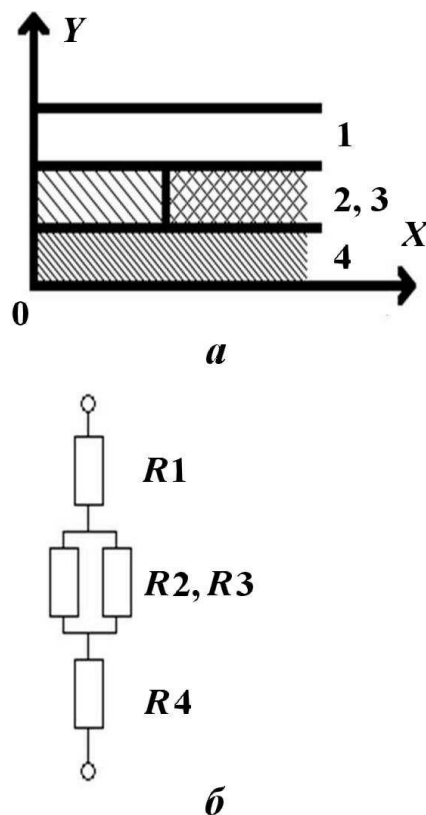


Рис. 3. Схема слоя десублимата (а) и его эквивалентная схема (б) для определения коэффициента теплопроводности

Математическая модель для горизонтальных транспортных емкостей не учитывает неоднородность смачивания хладагентом поверхности стенок транспортных емкостей.

При описании процесса десублимации UF_6 в вертикальных транспортных емкостях процесс массопереноса учитывается на основании полученной эмпирической зависимости и не описан математически. Не учитываются изменение температуры фазового перехода UF_6 при изменении давления внутри транспортной емкости и ребрение внутренней поверхности емкости, которое используется для интенсификации процесса десублимации.

Математическая модель для аппаратов с тепловым сбросом создана пока только для сублиматных производств, на которых содержание неконденсирующихся примесей составляет 25–55 %. На разделительных предприятиях содержание примесей в UF_6 составляет не более $5 \cdot 10^{-3}$ % [32, 33]. Из литературных данных [34] известно, что содержание неконденсирующихся примесей в парогазовой смеси влияет на скорость десублимации (содержание примесей выше 1 % уменьшает скорость десублимации на один-два порядка), поэтому рассмотренная математическая модель не пригодна для применения на разделительных предприятиях.

Общим недостатком всех рассмотренных подходов к математическому описанию процесса десублимации UF_6 является отсутствие учета:

- теплопереноса путем конвекции и трения газообразного UF_6 о слой десублимата во время его движения вдоль теплообменных стенок (при десублимации в емкости или десублиматоре газообразный UF_6 считается неподвижным);
- десублимации на торцевых стенках теплообменных емкостей;
- нестационарности процессов тепло- и массопереноса.

Таким образом, в результате анализа имеющихся в литературе данных показано, что требуется разработка нестационарных математических моделей процесса десублимации UF_6 в вертикальных транспортных емкостях с внутренним ребрением, в горизонтальных транспортных емкостях, а также в аппаратах с тепловым сбросом с учетом изменения плотности и теплопроводности UF_6 с течением времени.

Список литературы

1. Мейрманов А. М. Задача Стефана. Новосибирск: Наука, 1986.
2. Финько С. Ф. Моделирование теплофизических процессов инееобразования на низкотемпературных поверхностях энергетических установок: дис. канд. тех. наук. Воронеж, 2002.
3. Куни Ф. М. Статистическая физика и термодинамика. М.: Наука, 1981.
4. Силкин В. П. Введение в кинетическую теорию газов. М.: Наука, 1971.
5. Ферцигер Дж., Капер Г. Математическая теория процессов переноса в газах. М.: Мир, 1976.
6. Гуров К. П. Феноменологическая термодинамика необратимых процессов. М.: Наука, 1978.
7. Де Грот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. М.: Мир, 1964.
8. Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. М.: Мир, 1976.
9. Пригожин И. Введение в термодинамику. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
10. Горелик А. Г., Амитин А. В. Десублимация в химической промышленности. М.: Химия, 1986.
11. Соловьев Г. С., Сапрыгин А. В., Голик В. М. и др. Определение коэффициента теплопроводности твердой фазы гексафторида урана // Тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. "Фторидные технологии". Томск: Изд-во ТПУ, 2009.
12. Амелин А. Г. Теоретические основы образования тумана в химических производствах. М.: Государственное науч.-тех. изд-во хим. лит., 1951.
13. Амелин А. Г. Теоретические основы образования тумана при образовании пара. Изд. 3-е, доп. и перераб. М.: Химия, 1972.
14. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.
15. Орлов А. А., Кошелев С. М., Вандышев В. И. и др. Математическое моделирование процесса десублимации UF_6 // Изв. Томского политех. ун-та. 2006. Т. 309, № 3. С. 89–92.

16. *Кац Дж., Рабинович Е.* Химия урана: уран как элемент, его бинарные соединения, гидраты окислов и оксигалогениды. М.: Изд-во иностр. лит., 1954.
17. *Зуев В. А., Орехов В. Т.* Гексафториды актиноидов. М.: Энергоатомиздат, 1991.
18. *Раев В. В., Сапрыгин А. В., Цедилкин А. П. и др.* Определение коэффициента теплопроводности твердой фазы гексафторида урана // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2011. Т. 8, № 4. С. 125—130.
19. *Вильнина А. В., Дядик В. Ф., Байдали С. А. и др.* Экспериментальное исследование процесса десублимации от длительности цикла захлаживания // *Изв. Томского политех. ун-та*. 2009. Т. 315, № 2. С. 91—93.
20. *Вильнина А. В., Ливенцов С. Н.* Адаптивный алгоритм управления узлом десублимации гексафторида урана // Там же. 2008. Т. 312, № 5. С. 133—136.
21. *Блинникова А. С., Вильнина А. В., Байдали С. А. и др.* Исследование режимов работы десублиматоров // *Сб. тр. юбилейной науч.-тех. конф. "Автоматизация и управление в промышленности, науке и образовании"*: тез. докл. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. С. 41—46.
22. *Байдали С. А., Вильнина А. В., Дядик В. Ф. и др.* Анализ влияния цикла захлаживания на основные показатели эффективности работы десублиматоров // *Тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. "Фторидные технологии"*. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. С. 70.
23. *Вильнина А. В.* Разработка системы автоматизированного управления узлом десублимации: дис. канд. тех. наук. Томск, 2008.
24. *Вариводова В. А., Кирилов В. Х.* Инееобразование на плоской поверхности // *Холодил. техника и технология: Респ. межвед. науч.-тех. сб.* 1986. Вып. 43. С. 91—96.
25. *Вариводова В. А.* Внешнее инееобразование на цилиндрической поверхности // Там же. 1987. Вып. 44. С. 77—82.
26. *Вариводова В. А.* Новая модель инееобразования, основанная на гипотезе о плотности инея // *Холодил. техника и технология: Респ. межвед. науч.-тех. сб.* 1987. Вып. 45. С. 47—52.
27. *Вариводова В. А., Кирилов В. Х.* Квазистационарное решение краевых задач образования инея и льда // Там же. 1988. Вып. 46. С. 53—58.
28. *Вариводова В. А.* Сопряженная краевая задача теплопроводности в условиях инееобразования, основанная на гипотезе о распределении плотности инея // Там же. Вып. 47. С. 85—92.
29. *Лелица А. Г., Кирилов В. Х., Вариводова В. А. и др.* Кинетика десублимации водяного пара на плоской поверхности в условиях вакуума // Там же. С. 92—94.
30. *Вариводова В. А., Кирилов В. Х.* Уравнение теплопроводности для радиального ребра с инеем. Решение краевой задачи для ребра прямоугольного профиля // Там же. 1989. Вып. 48. С. 26—31.
31. *Дульнев Г. Н., Новиков В. В.* Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991.
32. *Короткевич В. М., Лазарчук В. В.* Реализация программы "БОУ-НОУ" на СХК // *Изв. Томского политех. ун-та*. 2003. Т. 306, № 1. С. 93—100.
33. *Голик В. М., Голик С. В., Иванов С. Л. и др.* Разработка масс-спектрометрической с индуктивно-связанной методики анализа гексафторида урана с хроматографическим разделением урана и примесей на колонке со смолой UTEVA // *Аналитика и контроль*. 2011. Т. 15, № 2. С. 174—181.
34. *Волынец А. З., Сафонов В. К.* Распределение десублимата при движении пара между пластинами // *Инженерно-физический журнал*. 1973. Т. 24, № 1. С. 47—52.

Статья поступила в редакцию 16.05.14.