

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕСУБЛИМАЦИИ
ГЕКСАФТОРИДА УРАНА**

Р.В. Малюгин, А.Ф. Цимбалюк

Научный руководитель: профессор, д.т.н. А.А. Орлов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: malyugin@tpu.ru

**MATHEMATICAL MODELING OF URANIUM HEXAFLUORIDE DESUBLIMATION
PROCESS**

R.V. Malyugin, A.F. Tsimbalyuk

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.A. Orlov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: malyugin@tpu.ru

Annotation. A non-stationary mathematical model of desublimation UF_6 in vertical tanks considers the movement of gaseous uranium hexafluoride contains in the article. Results of calculation of time dependence of the linear velocity desublimation, the thickness of the resulting layer of the solid phase, the temperature distribution in the tank wall - desublimation layer, filling dynamics of vertical tank B-12 by solid UF_6 are presented. Calculations have shown that the 70% of B-12 tank is filled by desublimite UF_6 within 250 hours, which is in good agreement with the experimental data.

Для получения электроэнергии с помощью атомных станций в настоящее время используется уран, обогащенный по легкому изотопу (^{235}U) до 3-5% [1]. Обогащение урана происходит на разделительных предприятиях в каскадах газовых центрифуг. В качестве рабочего вещества используется газообразный гексафторид урана (UF_6). Обогащенный UF_6 переводят в UO_2 , из которого изготавливаются ТВЭЛы.

В настоящее время в связи со строительством новых АЭС в России и за рубежом возникает необходимость увеличения мощностей разделительных предприятий. Помимо модернизации основного технологического оборудования требуется также разработка и проектирование конденсационно-испарительных установок (КИУ) повышенной производительности; оптимизация режимов работы КИУ и усовершенствование их конструкции. Одним из перспективных путей решения этих задач является создание математических моделей процессов тепло- и массопереноса, протекающих в КИУ при сублимации и десублимации UF_6 . Данная работа посвящена математическому моделированию процесса десублимации UF_6 в вертикальные транспортные емкости.

При построении математической модели приняты следующие допущения: процесс десублимация происходит только на боковой и на донной части емкости; газообразный UF_6 не содержит примесей; газ считается политропным, вязкость и теплопроводность при расчете газовой фазы не учитываются; температура внешней поверхности стенки емкости считается постоянной; процесс десублимации газовой

фази визначається теплопроводом через стінку ємкості і шар твердого UF_6 ; температура фазового переходу рівна рівновесній температурі і визначається по тиску над шаром десублимату.

З урахуванням вказаних вище допущень рух газоподібного UF_6 в транспортній ємкості вважалося двовимірним осесиметричним і описувалося системою інтегральних рівнянь збереження маси, імпульсу і енергії:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \int_S r \rho dx dr + \oint_{\Gamma} (\rho u dr - \rho v dx) = 0, \\ \frac{d}{dt} \int_S r \rho u dx dr + \oint_{\Gamma} r \left[(\rho u^2 + p) dr - \rho u v dx \right] = 0, \\ \frac{d}{dt} \int_S \rho v dx dr + \oint_{\Gamma} \left[\rho u v dr - (\rho v^2 + p) dx \right] = \int_S p dx dr, \\ \frac{d}{dt} \int_S E dx dr + \oint_{\Gamma} \left[(E + p) u dr - (E + p) v dx \right] = 0, \\ E = \rho \left(e + \frac{u^2 + v^2}{2} \right), \quad e = \frac{p}{\rho(\gamma - 1)}, \end{cases} \quad (1)$$

де Γ – довільний замкнений контур, обмежуючий площинку S в площині змінних x, r – циліндричеської системи координат, початок якої розміщено на осі симетрії в вхідному перерізі; t – час; p – тиск; ρ – густина газу; e – удільна внутрішня енергія UF_6 ; E – повна енергія UF_6 ; γ – показник адиабати газу; u, v – проекції вектора швидкості на осі x, r відповідно.

З течією часу товщина шару десублимату збільшується, тому на границях області рішення, відповідних бічовій і донній частинам ємкості, задавалися умови рівності нормальної до поверхні ємкості швидкості газу і швидкості переміщення границі розділу фаз, з урахуванням відповідних потоків маси, імпульсу і енергії, відповідаючих за десублимацію UF_6 на стінку.

В зв'язі з тим, що враховувалася тільки градієнт температури, формований в напрямленні перпендикулярно теплообмінній поверхності, розрахунок теплового потоку через двохшарову систему «стінка-десублимат» вироблявся з використанням одномерного диференціального рівняння теплопроводності. Розрахунок температури в шарі твердого UF_6 здійснювався з використанням подвижної системи координат, зв'язаної з поверхнею розділу «стінка-десублимат» (розв'язувалася задача Стефана з подвижної границею фазового переходу):

$$(\rho c)_U l_w(t) \frac{\partial T}{\partial t} + \eta (\rho c)_U v_w(t) \frac{\partial T}{\partial \eta} = \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\lambda_U r}{l_w(t)} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \quad (2)$$

$$\eta = \frac{n - \delta}{l_w(t)}, \quad 0 \leq \eta \leq 1,$$

$$\rho_U v_w(t) L = \frac{\lambda_U r}{l_w(t)} \frac{\partial T}{\partial \eta}. \quad (3)$$

де c – удільна теплоємність, δ – товщина стінки ємкості, $l_w(t)$ – товщина шару десублимату, λ – коефіцієнт теплопроводності, T – абсолютна температура, n – нормальна координата, відраховувана від зовнішньої поверхні ємкості всередину, $v_w(t)$ – швидкість десублимації, η – безрозмірна координата, зв'язана з поверхнею розділу «стінка-десублимат», L – теплота десублимації. Індекс U стосується до твердого UF_6 .

Для чисельного рішення диференціальних рівнянь теплопроводності (2, 3) використовувався

итерационно-интерполяционный метод [2]. Система уравнений (1) приводилась к безразмерному виду и решалась численно с использованием метода С.К. Годунова [3].

С использованием описанной модели проведен расчет заполнения вертикальной емкости Б-12 до 70% от ее максимального объема. Скорость десублимации определялась с помощью аппроксимационной зависимости от толщины слоя десублимата и давления газа. На рис. 1 приведены временные зависимости изменения массы десублимирующегося в емкость Б-12 UF_6 и безразмерной скорости десублимации на внутренней поверхности донной части емкости.

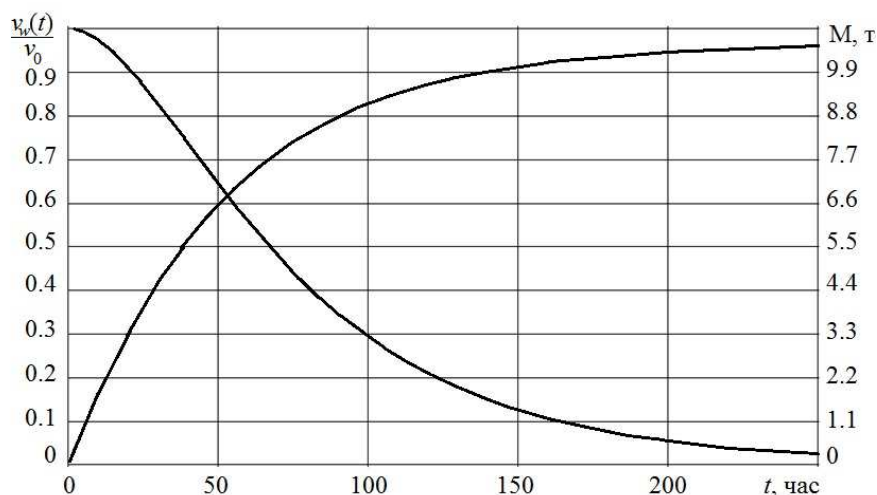


Рис. 1. Динамика заполнения емкости Б-12

Из рисунка видно, что емкость Б-12 заполняется десублиматом на 70% объема за 250 часов, что хорошо согласуется с экспериментальными данными по динамике десублимации в них газообразного UF_6 .

Таким образом, разработана и реализована нестационарная математическая модель десублимации UF_6 в вертикальной емкости, учитывающая наличие конвекции и десублимации UF_6 на донной стенке емкости. С использованием полученной математической модели произведен расчет временных зависимостей скорости десублимации, толщины и массы образующегося слоя твердой фазы и распределения температуры в системе стенка емкости – слой десублимата с учетом нестационарности, связанной с изменением значений теплоемкости, теплопроводности и плотности UF_6 от температуры.

Произведенный расчет динамики заполнения вертикальной емкости Б-12 твердым UF_6 показал, что представленная математическая модель адекватно описывает происходящие процессы тепло- и массопереноса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Edwards C., Oliever A. Uranium processing: A review of current methods and technology // Journal of Metals. – 2000. – Vol. 52. – P. 12–20.
2. Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н. и др. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2004. – 318 с.
3. Якимов А.С. Аналитический метод решения уравнений математической физики. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2010. – 197 с.