

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕСУБЛИМАЦИИ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА В ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ЕМКОСТИ

*А.А. Орлов, д.т.н., проф.,
М.В. Верлинский, студент гр. 0АМ01
Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30,
тел.(3822)-701-777 (доб. 5213)
E-mail: mvv17@tpu.ru*

Процесс десублимации UF_6 является неотъемлемой частью технологии обогащения урана. Потoki UF_6 на выходе из каскада газовых центрифуг, обогащенные и обедненные по изотопу ^{235}U десублимируются в транспортные емкости. На практике наибольшее распространение получили вертикальные погружные транспортные емкости без внутреннего оребрения, с горизонтальным и вертикальным оребрением, а также горизонтальные транспортные емкости без внутреннего оребрения, которые используются, в основном, для импорта/экспорта UF_6 [1, 2].

В настоящее время актуальным является проведение исследований процесса десублимации UF_6 в горизонтальные транспортные емкости. Наиболее перспективным способом решения подобного рода задач является использование математического моделирования, поскольку экспериментальный подход дорог и занимает много времени.

Объектом исследования являлась горизонтальная транспортная емкость (рисунок 1). Объем и геометрические размеры емкости задаются и могут быть различными. Охлаждение емкости происходит орошением ее внешней поверхности хладагентом (водой), подаваемым из трубы (1), расположенной на оси симметрии емкости, через форсунки. Хладагент в виде тонкой пленки стекает по боковым стенкам емкости, при этом частично испаряется. Под емкостью установлен поддон (3) для сбора стекающего хладагента.

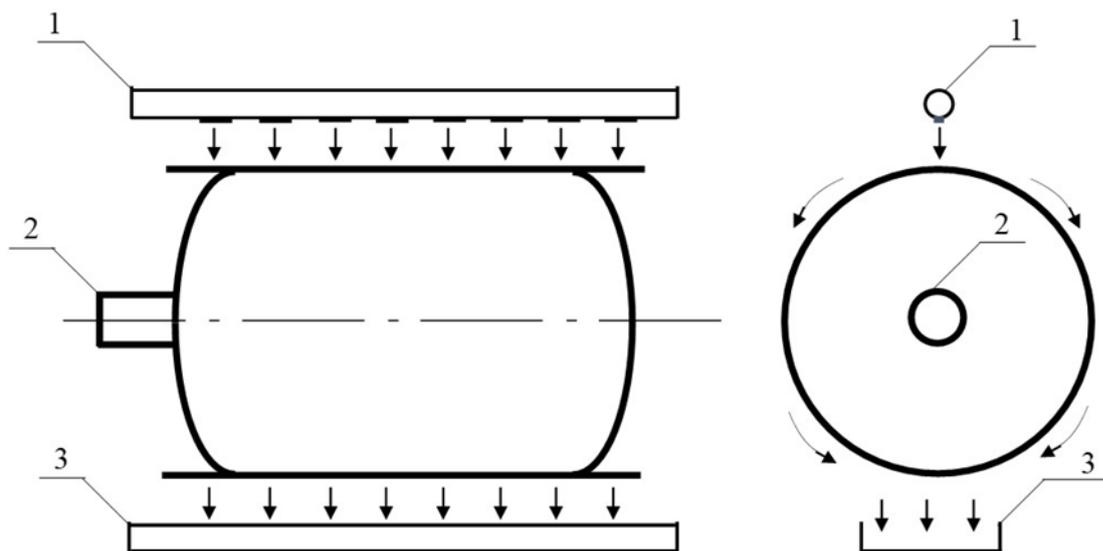


Рис. 1. Горизонтальная ёмкость.

В основу модели приняты следующие допущения:

1. Процесс десублимации UF_6 происходит на цилиндрической, орошаемой хладагентом поверхности емкости.

2. Десублимированный UF_6 в каждый момент времени представляет собой цилиндр с осевой симметрией, которая обусловлена равномерным распределением давления газообразного UF_6 внутри емкости, а также незначительным изменением температуры хладагента по мере обтекания им цилиндрической стенки емкости.

3. Температура наружной поверхности цилиндрической стенки емкости постоянна и равна температуре хладагента в рассматриваемый момент времени. Температура внутренней стенки десублимированного UF_6 равна температуре фазового перехода (десублимации) UF_6 для текущего давления в емкости.

4. Процесс десублимации UF_6 в емкости является квазистационарным, т.е. распределение температур линейно и слабо изменяется во времени.

Основное расчетное дифференциальное уравнение:

$$\frac{dx}{dt} = 0,5 \cdot \rho \cdot (T_2 - T_1) \cdot (R_2 - x) \cdot (r + 0,5c(T_2 - T_1))^{-1} \cdot \left(\lambda_1 \ln(R_1 R_2^{-1}) + \lambda_2 \ln(R_2 (R_2 - x)^{-1}) \right)^{-1}$$

где T_1 – температура внешней поверхности цилиндрической стенки емкости, равная температуре хладагента, °С; T_2 – температура фазового равновесия на границе десублимации UF_6 , °С; R_1 – внешний радиус цилиндрической части емкости, м; R_2 – внутренний радиус цилиндрической части емкости, м; λ_1 – теплопроводность твердого UF_6 , Дж·с⁻¹·м⁻¹·К⁻¹; λ_2 – теплопроводность стенки емкости, Дж·с⁻¹·м⁻¹·К⁻¹; x – толщина слоя десублимированного UF_6 , м; r – удельная теплота десублимации UF_6 , Дж·кг⁻¹; c – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж·кг⁻¹·К⁻¹; ρ – плотность твердого UF_6 , кг·м⁻³.

Для начального условия $t_0 = 0$, $x(t_0) = 0$ дифференциальное уравнение численно решено методом Рунге-Кутты 4-го порядка [3]. Для каждого значения толщины слоя десублимированного UF_6 x находим значение массы десублимированного UF_6 по формуле:

$$m = \rho \pi L (R_2^2 - (R_2 - x)^2)$$

Согласно правилам хранения/транспортировки UF_6 заполнение емкости необходимо проводить до 70% ее свободного объема. Следовательно, расчет останавливается при достижении массы десублимированного UF_6 $m = 0,7 \cdot \rho \cdot V$, где V – объем заполняемой емкости.

Математическая модель реализована в виде программы на языке Python 3.8 в среде PyCharm 2020.1.

Список литературы:

1. Orlov A A, Malyugin R V, Methods of Uranium Hexafluoride Purification – Advanced Materials Research: Radiation and nuclear techniques in material science Scientific Journal – 2015 – № 1084 – P. 46
2. Orlov A A, Malyugin R V Way to Obtain Uranium Hexafluoride – Advanced Materials Research: Radiation and nuclear techniques in material science Scientific Journal – 2015 – № 1084 – P. 338
3. Krainov A Yu, Moiseeva K M, Numerical solution methods boundary value problems for ordinary differential equations – Tomsk: STT, 2016