

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕСУБЛИМАЦИИ
ГАЗООБРАЗНОГО UF_6 В ЕМКОСТИ ОДНОГО КОЛЛЕКТОРА**

Малюгин Р.В., Цимбалюк А.Ф.

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

E-mail: malyugin@tpu.ru

Представлена нестационарная математическая модель процесса десублимации газообразного гексафторида урана в вертикальные цилиндрические емкости газового коллектора. При математическом моделировании процесса учтено движение газа внутри емкостей, эллиптичность торцевых стенок емкостей и подвижность границы фазового перехода.

Для получения электроэнергии с помощью атомных станций в настоящее время используется уран, обогащенный по легкому изотопу (^{235}U). При обогащении урана в качестве рабочего вещества используется газообразный гексафторид урана (UF_6). На выходе разделительного каскада получают два потока – обедненный и обогащенный по легкому изотопу. Обедненная фракция сразу десублимируется в специальные емкости и уже в твердом виде отправляется на склад для длительного хранения. Обогащенная фракция очищается от легких и тяжелых примесей, а затем отправляется в твердом виде на предприятия для перевода UF_6 в UO_2 и изготовления ТВЭЛов.

Происходящая в настоящее время модернизация разделительных предприятий требует, помимо замены основного технологического оборудования, решения ряда актуальных задач, которые включают разработку и проектирование конденсационно-испарительных установок (КИУ) повышенной производительности, оптимизацию режимов работы КИУ и усовершенствование их конструкции. Возможности применения экспериментальных подходов ограничены и требуют проведения длительных и дорогостоящих экспериментов на действующем оборудовании или на лабораторных установках, поэтому одним из перспективных путей решения описанных выше производственных 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 газообразного UF_6 в вертикальные транспортные емкости.

Существующие математические модели процесса десублимации UF_6 [1, 2] как правило, являются стационарными либо квазистационарными. Их общими недостатками являются отсутствие учета теплопереноса путем конвекции и трения газообразного UF_6 о слой десублимата во время его движения вдоль теплообменных стенок; десублимации на торцевых эллиптических стенках теплообменных емкостей; нестационарности процессов тепло- и массопереноса. Кроме того, все они созданы для единичных емкостей, в то время как на разделительном производстве емкости параллельно соединены в коллектор, в котором часть из них может работать какое то время одновременно.

В связи с этим целью данной работы являлось создание нестационарной математической модели десублимации UF_6 в коллекторе, состоящем из нескольких вертикальных емкостей, с учетом наличия в них конвекции и десублимации UF_6 на донной стенке емкости, а также эллиптичности верхней и нижней стенок емкости.

На первом этапе была создана математическая модель процесса десублимации UF_6 в единичную вертикальную емкость рис. 1а [3]. Математическая модель была разработана с учетом следующих допущений: все тепло, выделяющееся при фазовом переходе, отводится хладагентом через стенку емкости и слой десублимата; газообразный UF_6 не содержит примесей; тепловые процессы внутри рассматриваемой системы могут быть описаны в рамках традиционной теории теплопроводности; течение газа до входа в емкость считается изоэнтропическим, поэтому на срезе задаются значения полной энтальпии и энтропии; десублимация UF_6 на верхней эллиптической стенке емкости с патрубком не учитывается, поскольку она выступает из термостата, заполненного хладагентом, на остальных границах со стенкой задается условие десублимации; газ считается политропным, вязкостью и теплопроводностью при расчете газовой фазы пренебрегаем.

При математическом моделировании процессов тепло- и массопереноса, протекающих при десублимации газообразного UF_6 рассматривалась двухслойная система, где первым слоем является материал стенки емкости постоянной толщины, а вторым – слой десублимата, имеющий подвижную наружную границу раздела фаз. Для расчета теплового потока использовались одномерное дифференциальное уравнение теплопроводности для стенки емкости, слоя десублимата и интегральный закон сохранения энергии для проверки теплового баланса. Для численного решения уравнений теплопроводности был использован итерационно-интерполяционный метод [4]. Расчет температуры в слое твердого UF_6 производился с использованием подвижной системы координат, связанной с поверхностью раздела стенка-десублимат рис. 1б. Для определения скорости увеличения толщины слоя твердого гексафторида урана использовалось условие Стефана. В ходе решения указанных уравнений определялось распределение температуры в системе стенка-десублимат, вычислялась величина теплового потока и скорость десублимации гексафторида урана, после чего рассчитывалась толщина образовавшегося слоя твердой фазы.

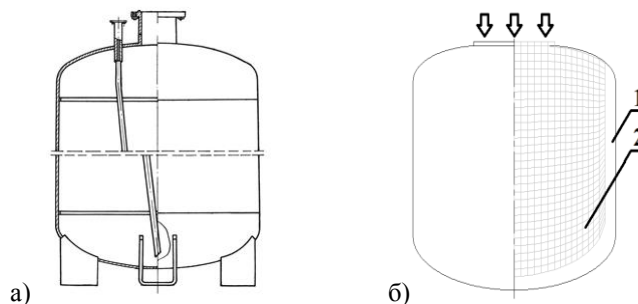


Рис. 1. Вертикальная емкость (а), расчетная область емкости (б)
1 – слой десублимата, 2 – газообразный UF_6

Движение газообразного UF_6 в емкости считалось двумерным осесимметричным и описывалось системой интегральных уравнений сохранения массы, импульса и энергии. Данная система уравнений была приведена к безразмерному виду, область решения нормировалась. Для численного решения системы уравнений газовой динамики был выбран классический метод SIMPLE [5] на подвижной сетке, который хорошо себя зарекомендовал для решения задач расчета дозвуковых внутренних течений [6].

Расчет процесса десублимации с использованием созданной модели проводился для случая наполнения емкостей Б-12 твердым гексафторидом урана до 70% от их максимального объема. В результате были получены зависимости изменения массы десублимата и безразмерной скорости десублимации от времени процесса (рис.2). Расчеты показали, что емкость Б-12 заполняется

десублиматом на 70% объема за 250 часов, что хорошо согласуется с экспериментальными данными по динамике десублимации в них газообразного гексафторида урана.

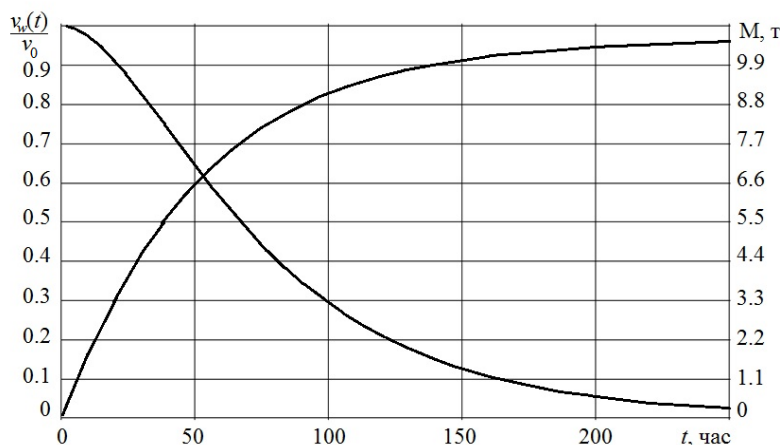


Рис. 2. Динамика заполнения единичной вертикальной емкости

На следующем этапе производился расчет коллектора. В начальный момент к коллектору подключаются емкости с некоторым остаточным давлением. В процессе их заполнения десублиматом за счет роста толщины слоя твердого UF_6 увеличивается термическое сопротивление системы стенка емкости – слой десублимата, уменьшается тепловой поток от газообразного UF_6 к хладагенту, вследствие чего происходит уменьшение скорости десублимации и повышение давления внутри емкости. От величины давления зависит значение температуры фазового перехода UF_6 из газообразного состояния в твердое. Температура, в свою очередь, влияет на значения плотности, теплопроводности и теплоемкости твердого UF_6 [7].

В момент, когда давление в первой емкости достигает критического значения, происходит подключение второй емкости, входящей в состав коллектора и так далее аналогичным образом до заполнения всего объема первой, а затем и последующих емкостей коллектора. Заполненная емкость сразу отсекается от коллектора и заменяется на пустую. Этот алгоритм был реализован в виде пакета прикладных программ с дружественным пользователю интерфейсом.

В результате нами разработана двумерная нестационарная математическая модель десублимации UF_6 в коллекторе, состоящем из нескольких емкостей, учитывающая наличие конвекции и десублимации UF_6 на донной стенке емкости, а также эллиптичность верхней и нижней стенок емкости, которая позволяет рассчитать коллектор любой производительности, состоящий из емкостей различных типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

7. Вильнина А.В., Дядик В.Ф., Байдали С.А. и др. Экспериментальное исследование процесса десублимации от длительности цикла захлаживания // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 2. – С. 91–93.
8. Губанов С.М., Крайнов А.Ю. Математическая модель и результаты численных расчетов охлаждения осадительных емкостей при десублимации потока UF_6 и легких примесей // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – № 4. – С. 56 – 65.
9. Орлов А.А., Цимбалюк А.Ф., Малюгин Р.В. Математическая модель процесса десублимации UF_6 в вертикальной емкости // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 2/2. – С. 14–20.
10. Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н. и др. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. – Томск: Изд-во ТГУ. 2004. – 320 с.
11. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – Washington D.C.: Hemisphere, 1980. – 205 p.
12. Лапин Ю.В., Стрелец М.Х. Внутренние течения газовых смесей. – М.: Наука, 1989. – 368 с.
13. Katz J.J., Rabinovich E. The chemistry of uranium. – New York: McGraw-Hill Book Co. Inc., 1951.