

УДК 532.5.013.2+66.011

**И.М. Васенин, А.Ю. Крайнов, А.А. Шахтин,  
Р.Л. Мазур, П.В. Зернаев, М.В. Чуканов**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ $UF_6$ НА ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СТАДИЯХ ПЕРЕРАБОТКИ**

Представлены математическая модель и результаты расчетов процесса перелива  $UF_6$  с легкими примесями при различных значениях величины свободного объема. Математическая модель основана на уравнениях Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости и законах сохранения массы и энергии для газа в свободном объеме. Получены распределения массы легких примесей, испарившихся в емкость и перелитых с жидкостью.

**Ключевые слова:** *гексафторид урана, примеси, теплоперенос, массоперенос.*

На современном этапе развития атомной энергетики существуют несколько методов очистки  $UF_6$  от примесей на заводах разделения изотопов. Широкое применение получили очистительные каскады, состоящие из блоков газодиффузионных машин. Ограниченное применение нашел метод очистки с использованием газовых центрифуг. Также хорошо изучен процесс ректификации.

Все перечисленные выше схемы очистки потока  $UF_6$  имеют те или иные существенные недостатки. В связи с постоянной необходимостью повышать качество продукции и снижать издержки было принято решение о разработке альтернативного метода очистки, который бы обеспечил приемлемую степень очистки при незначительных капитальных и эксплуатационных затратах.

В работе [1] оценивалась возможность очистки  $UF_6$  в жидкофазном состоянии от легколетучих примесей, особенно от HF. Наиболее подходящим для этих целей оказался процесс перелива  $UF_6$  из технологической емкости в транспортный контейнер. Перелив осуществляется при таких условиях, когда  $UF_6$  находится в жидкой фазе с газовой «шапкой».

В работе [2] получены уравнения, связывающие температуру и давление в баллоне с содержанием легких примесей в жидкой и в газовой фазе  $UF_6$ . Они указывают на значительное отклонение системы от закона Рауля, когда относительное содержание легких примесей в газовой фазе значительно больше, чем в жидкой. Поэтому можно предположить, что увеличение свободного объема технологического баллона приведет к уменьшению содержания HF в жидкости, сливаемой в транспортный контейнер. Технологический баллон имеет вид цилиндрического объема, заполненного вязкой жидкостью до высоты  $H$ . В дне объема в центре находится отверстие радиуса  $r_{out}$ , через которое осуществляется перелив в транспортный контейнер. Жидкость – смесь гексафторида урана и HF, при этом концентрация растворенного HF в  $UF_6$  небольшая. На поверхности жидкости происходит испарение компонентов смеси. Испарение компонентов жидкости приводит к возникновению в ней конвективного течения.

Математическое описание течения вязкой несжимаемой жидкости было представлено уравнениями Навье – Стокса в переменных вихрь-функция тока. Учет температурного расширения жидкости, находящейся в неизотермических услови-

ях, и изменения ее плотности при изменении концентрации растворенного компонента проводился в приближении Буссинеска [3].

Система уравнений, описывающая движение и тепло- и массоперенос в жидкости, записанная с учетом подвижной цилиндрической системы координат имеет вид

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{y_H^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{y}^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = \omega; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} - \bar{y} \frac{\nu_H}{y_H^2} \frac{\partial \omega}{\partial \bar{y}} + u \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\nu}{y_H} \frac{\partial \omega}{\partial \bar{y}} = \nu \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) + \frac{r}{y_H^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \bar{y}^2} - \frac{\omega}{r} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial r} g + g\beta \frac{\partial T}{\partial r}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \bar{y} \frac{\nu_H}{y_H^2} \frac{\partial c}{\partial \bar{y}} + u \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{\nu}{y_H} \frac{\partial c}{\partial \bar{y}} = D \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{r}{y_H^2} \frac{\partial^2 c}{\partial \bar{y}^2} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \bar{y} \frac{\nu_H}{y_H^2} \frac{\partial T}{\partial \bar{y}} + u \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\nu}{y_H} \frac{\partial T}{\partial \bar{y}} = a \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{r}{y_H^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \bar{y}^2} \right); \quad (4)$$

$$u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \bar{y}}, \quad \nu = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}. \quad (5)$$

Начальные условия:

$$\psi(r, y, 0) = 0, \quad \omega(r, y, 0) = 0, \quad \nu(r, y, 0) = 0, \quad T(r, y, 0) = T_0, \quad c(r, y, 0) = c_0. \quad (6)$$

Граничные условия:

$$\psi(0, y, t) = 0, \quad \psi(R, y, t) = G, \quad \psi(r, 0, t) = \begin{cases} 2\pi \int_0^{r_{\text{out}}} \nu(r, 0, t) r dr, & 0 < r < r_{\text{out}}, \\ G, & r_{\text{out}} < r < R; \end{cases}$$

$$\psi(r, H, t) = 2\pi \int_0^r \nu(r, H, t) r dr;$$

$$\omega(0, y, t) = 0, \quad \omega(R, y, t) = \frac{2(\Psi_w - \Psi)}{r \Delta r^2}, \quad \omega(r, 0, t) = \frac{2(\Psi_w - \Psi)}{r \Delta r^2}, \quad \omega(r, H, t) = 0;$$

$$u(0, y, t) = 0, \quad u(R, y, t) = 0, \quad u(r, 0, t) = 0, \quad \frac{\partial u(r, H, t)}{\partial y} = 0;$$

$$\frac{\partial \nu(0, y, t)}{\partial r} = 0, \quad \nu(R, y, t) = 0, \quad \nu(r, H, t) = \nu_{\text{нов}}, \quad \nu(r, 0, t) = \begin{cases} \nu_{\text{out}}, & 0 < r < r_{\text{out}}, \\ 0, & r_{\text{out}} < r < R; \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{\partial T(0, y, t)}{\partial r} = 0, \quad T(R, y, t) = At + T_0, \quad T(r, 0, t) = At + T_0, \quad -\lambda \frac{\partial T(r, H, t)}{\partial y} = J_{\text{UF}_6} Q / S;$$

$$\frac{\partial c(0, y, t)}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial c(R, y, t)}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial c(r, 0, t)}{\partial y} = 0, \quad -D \frac{\partial c(r, H, t)}{\partial y} = \nu_0 c(r, H, t);$$

$$H = y_H(t) = H_0 - \nu_H t.$$

где  $t$  – время;  $A$  – некоторая константа;  $r, \bar{y}$  – координаты;  $y_H$  – координата поверхности жидкости;  $\psi$  – функция тока;  $\omega$  – вихрь;  $u, \nu$  – компоненты вектора ско-

рости вдоль осей  $r$ ,  $y$  соответственно;  $v_H$  – скорость движения поверхности жидкости;  $\rho$  – плотность смеси, которая определяется из концентрации компонент смеси;  $T$  – температура;  $c$  – концентрация растворенного вещества;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $D$  – коэффициент диффузии;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\beta$  – коэффициент температурного расширения;  $\beta$  – коэффициент массотдачи;  $R$  – радиус емкости;  $H$  – высота уровня жидкости в емкости;  $r_{out}$  – радиус сливного отверстия;  $v_0$  – скорость испарения жидкости;  $J_{UF_6}$  – массовый поток  $UF_6$  из жидкости в газ;  $Q$  – теплота фазового перехода для  $UF_6$ ;  $S$  – площадь свободной поверхности. Индексы «0» и «w» соответствуют начальным условиям и значениям на стенке соответственно.

Математическое описание состояния газовой фазы осуществляется с помощью следующей системы уравнений, которые представляют собой законы сохранения массы и энергии:

$$\frac{d(\rho_{UF_6} V)}{dt} = J_{UF_6}; \quad (8)$$

$$\rho_{UF_6} V \frac{dc_{HF}}{dt} = J_{HF} - c_{HF} V \frac{d\rho_{UF_6}}{dt} - c_{HF} \rho_{UF_6} v_H S, \quad (9)$$

$$\rho_{UF_6} V \frac{d(c_v T)}{dt} = (c_p T_l J_{UF_6} + S_a \alpha (T_w - T)) - P \frac{dV}{dt} - c_v T V \frac{d\rho_{UF_6}}{dt} - c_v T \rho_{UF_6} v_H S, \quad (10)$$

где  $\rho_{UF_6}$  – плотность  $UF_6$ ;  $c_{HF}$  – весовая концентрация HF;  $T$  – температура газа;  $T_w$  – температура стенок емкости;  $T_l$  – температура жидкости на границе раздела фаз;  $V$  – объем газа;  $J_{HF}$  – массовый поток HF;  $S$  – площадь свободной поверхности;  $S_a$  – общая площадь стенок емкости, контактируемых с газом;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $c_p$ ,  $c_v$  – удельные теплоемкости.

Для проведения численного моделирования система уравнений (1) – (7) решалась методом Патанкара [4]. Движение свободной поверхности учитывалось преобразованием  $\bar{y} = y/y_H(t)$ . Предполагалось, что в начале слива  $UF_6$  из технологического баллона легкие примеси распределены в объеме  $UF_6$  равномерно.

Для численного расчета условно принимались следующие условия: время перелива – 10 часов; объем емкости – 2,5 м<sup>3</sup>; 3,0 м<sup>3</sup>; 4,0 м<sup>3</sup>; масса смеси  $UF_6$  и HF в баллоне в начале перелива – 7 т; масса жидкой фазы смеси  $UF_6$  и HF в конце перелива – 58,9 кг; масса HF в баллоне – 2,2 кг; температура в начале перелива – 83 °С; температура в конце перелива – 91...93 °С.

В емкости 2,5 м<sup>3</sup> перед переливом в начальный момент времени газовая фаза занимает объем равный 0,61 м<sup>3</sup>, в котором содержится 0,56 кг HF (1,97 % вес.). Остальной объем (1,89 м<sup>3</sup>) занимает жидкость. Содержание HF в жидкости составляет 1,64 кг (0,023 % вес.). При температуре 83 °С пар смеси создает давление равное 2913 мм рт.ст., плотность газа составляет 46,22 кг/м<sup>3</sup>. Расчет показал, что после десяти часов перелива масса HF в жидкой фазе составила 0,0069 кг (0,0123 % вес.). Перелитая смесь содержит 6823,25 кг  $UF_6$  и 1,33 кг HF (0,02 % вес.). Объем газовой фазы увеличился до 2,48 м<sup>3</sup>, давление газа при температуре 92,41 °С составило 3049 мм рт.ст., при этом плотность стала равной 47,14 кг/м<sup>3</sup>. В газе содержание HF составило 0,73 кг (0,62 % вес.).

Аналогичным образом был смоделирован перелив емкостей объемом  $3,0 \text{ м}^3$  и  $4,0 \text{ м}^3$ . Из результатов моделирования с различными значениями объема емкости (см. табл. 1, 2) можно заметить, что увеличение исходного свободного объема ( $2,5 \text{ м}^3$ ) на 20 % приводит к уменьшению массы HF, оставшейся в жидкой фазе на 23 %. При этом содержание HF в газовой фазе увеличилось на 56 %. Важным показателем очистки является количество HF, слитое в транспортный контейнер. С увеличением свободного объема масса слитого HF сократилась на 26 %. При увеличении свободного объема на 60 % в транспортный контейнер переливается на 95 % меньше HF, а в газовую фазу HF испаряется на 164 % больше. В связи с этим, можно сделать вывод об эффективности увеличения свободного объема с целью улучшить очистку  $\text{UF}_6$  при его переливе в транспортный контейнер.

Таблица 1

## Параметры жидкой фазы

Объем баллона, $\text{м}^3$	2,5		3,0		4,0	
	0	10	0	10	0	10
Время, ч	0	10	0	10	0	10
Масса HF, кг	1,64	0,0069	1,227	0,0053	0,0885	0,0004
Масса слитого HF	0	1,331	0	0,99	0	0,0719
Масса испарившегося HF, кг	0	0,177	0	0,1315	0	0,0094
Концентрация оставшегося HF, % вес.	0,0231	0,0116	0,0172	0,0089	0,0012	0,00068
Концентрация слитого HF, % вес.	0	0,0214	0	0,0159	0	0,00116
Масса слитого $\text{UF}_6$ , кг	0	6823,25	0	6799,68	0	6752,54
Погрешность, %	7,936		8,054		7,655	

Таблица 2

## Параметры газовой фазы

Объем баллона, $\text{м}^3$	2,5		3,0		4,0	
	0	10	0	10	0	10
Время, ч	0	10	0	10	0	10
Давление $\text{UF}_6$ , мм рт.ст	2913	3049	2913	3077	2913	3186
Плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$	46,22	47,14	46,22	47,75	46,22	49,44
Масса HF, кг	0,56	0,73	1,004	1,123	1,919	1,928
Концентрация HF, % вес.	1,97	0,6263	1,97	0,7903	1,97	0,9789

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Васенин И.М., Крайнов А.Ю., Шахтин А.А. и др. Математическая модель и результаты численных расчетов перелива  $\text{UF}_6$  в присутствии микроколичеств легких примесей // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2010. № 2(10). С. 53–59.
2. Васенин И.М., Крайнов А.Ю., Мазур Р.Л. и др. Определение степени ассоциации малых количеств фтористого водорода в системе HF –  $\text{UF}_6$  // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52. № 7/2. С. 44–48.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

Статья принята в печать 16.09.2010г.

Vasenin I.M., Krainov A.Yu., Shakhitin A.A., Mazur R.L., Zernaev P.V., Chukanov M.V. RESEARCH OF THE POSSIBILITY TO INCREASE THE DEGREE OF  $\text{UF}_6$  PURIFICATION AT INTERMEDIATE STAGES OF PROCESSING. A mathematical model and results of numerical calculations for the process of  $\text{UF}_6$  transfusion with light impurities for different values of

the free volume have been presented. The mathematical model is based on the Navier-Stokes equations for viscous incompressible fluid and laws of conservation of mass and energy for gas within a free volume. Distributions of the mass of light impurities evaporated into a vessel and transfused with the liquid have been obtained.

Keywords: uranium hexafluoride, impurities, heat transfer, mass transfer

*VASENIN Igor' Mikhailovich* (Tomsk State University). E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

*KRAINOV Aleksei Yur'evich* (Tomsk State University). E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

*SHAKHTIN Andrey Anatolyevich* (Tomsk State University). E-mail: shahtin@sibmail.com

*MAZUR Roman Leonidovich* (JSC Siberia Chemical Complex). E-mail: vestnik\_tgu\_mm@math.tsu.ru

*ZERNAEV Petr Vasil'evich* (JSC Siberia Chemical Complex). E-mail: zernaevp@mail.ru

*CHUKANOV Mikhail Viktorovich* (JSC Siberia Chemical Complex). E-mail: chukanov2008@yandex.ru