

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ДЕСУБЛИМАЦИИ И ЕЁ АПРОБАЦИЯ ДЛЯ МНОГОКАМЕРНОГО АППАРАТА

И. Ю. Русаков, В. Л. Софронов, В. Н. Брендаков

В настоящей работе проведены изыскания по разработке конструкции ядерно-безопасного десублиматора для конденсации паров высокообогащённого гексафторида урана из парогазовой смеси и изучение процесса десублимации этого продукта в новой предложенной конструкции аппарата на математической модели. Разработанный десублиматор представляет собой вертикальный кольцевой аппарат с обогреваемыми стенками, внутренняя полость которого разделена поперечными перегородками на ряд последовательно сообщающихся камер. Разработанные авторами физическая и математическая модели для процесса десублимации в предложенном десублиматоре рассматривают сопряжённую задачу гидродинамики и теплообмена, решение которой позволяет при заданных граничных условиях рассчитывать картины линий тока парогазовой смеси и поля температур в каждой из камер десублиматора. Результатом расчёта является десублиматор, исключаящий потери целевого продукта в виде аэрозолей, тем более недопустимые для радиационно-опасных веществ, к которым относится гексафторид урана.

Ключевые слова: гексафторид урана, поверхностная десублимация, объёмная десублимация, десублиматор, физическая модель, математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы сублимации и десублимации (конденсации) веществ используются для разделения и сбора целевых продуктов [1-3]. Эти процессы разделяются на процессы, протекающие на поверхности стенок и в объёме. В реальных аппаратах оба процесса протекают одновременно, но в зависимости от конструкции аппарата и режима работы оборудования основным видом десублимации является только один из перечисленных, а второй – только сопутствующим. При этом сопутствующий процесс десублимации обычно ухудшает показатели основного типа десублимации и, как следствие, всего процесса в целом.

При поверхностной десублимации в качестве основной целевой продукт в основной массе десублимируется на охлаждаемой поверхности, а часть продукта конденсируется в объёме аппарата в виде аэрозолей в количестве, пропорциональном парциальному давлению этого продукта [3]. Суммарное количество аэрозолей и газовой фазы определяет проскок рассматриваемого продукта через аппарат, т. е. качество его улавливания.

Существует большое количество разновидностей аппаратов-конденсаторов [2, 4-7], выбор и применение которых определяется масштабом и особенностями производства и характеристиками целевого продукта и пароползуновский вестник № 4 2018

газовой смеси (ПГС) в целом. Наиболее простыми типами десублиматора являются аппараты с цилиндрической охлаждаемой стенкой и с трубками Фильда, с гофрированной и оребрённой теплообменной поверхностью.

В атомной промышленности наиболее распространён способ поверхностной десублимации при извлечении гексафторида урана (ГФУ) из ПГС, в которой кроме ГФУ присутствуют другие летучие продукты реакции: кислород, фтороводород, фториды и оксифториды примесных элементов (Pu, F, N, V, Mo, W, Cr, B, Si, P). Потери целевого продукта в виде аэрозолей тем более недопустимы для радиационно-опасных веществ, к которым относится гексафторид урана. Исследования десублимации на реальном продукте является задачей достаточно трудоёмкой ввиду специфики производства и самого ГФУ, поэтому дать оценку эффективности работы десублиматора рациональнее посредством математического моделирования.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ДЕСУБЛИМАТОРА

Наиболее эффективным способом десублимации является такой, при котором в условиях изменяющегося режима десублимации из-за нарастания слоя десублимата на

охлаждаемой стенке удалось бы избежать процесса появления аэрозолей и контролировать образование и толщину слоя десублимата, обеспечивая максимальное заполнение аппарата.

Для улавливания продукта, выделенного в объёме, можно использовать циклоны, скрубберы или фильтры, а для улавливания недесублимированных паров – дополнительные (контрольные) десублиматоры. Однако в условиях атомного производства технологически возможно использовать только контрольный десублиматор, который устанавливают после «основного» десублиматора, из которого продукт периодически извлекают для дальнейшей переработки, и он не относится к потерям.

С учётом имеющегося опыта нами было предложено «объединить» основной и контрольные десублиматоры в одном корпусе аппарата. Таким образом появилась конструкция многокамерного десублиматора с «тёплой» стенкой [8], схема которого показана на рисунке 1.

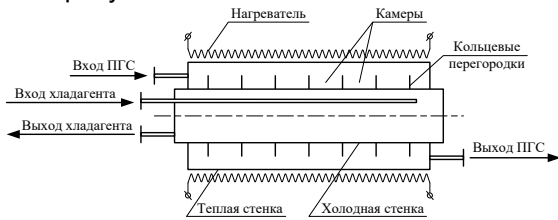
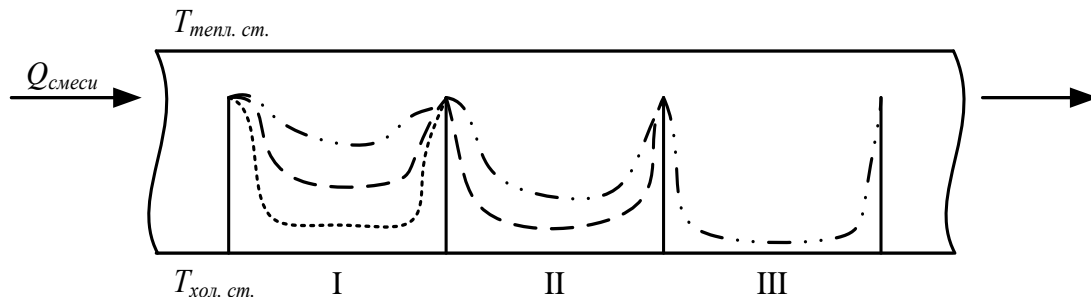


Рисунок 1 – Схема многокамерного десублиматора с «тёплой» стенкой

В таком аппарате десублимация целевого продукта будет происходить преимущественно на холодной цилиндрической стенке между кольцевыми перегородками в нескольких последовательно расположенных кольцевых камерах, где формируется динамический фронт десублимации. По мере заполнения



линия – заполнение камеры I в начальный момент времени десублимации;
 линия - · - · - – образование слоя десублимата в камере II по мере заполнения камеры I;
 линия — · · — – последующее заполнение камеры III

Рисунок 2 – Распределение десублимата по камерам десублиматора

первых камер фронт перемещается к выходу из аппарата (рисунок 2). При этом механизм заполнения камер десублиматора следующий. В начальный момент времени десублимация продукта происходит преимущественно в первой камере (линия). По мере заполнения камеры I начинается образование слоя десублимата в камере II (линия - · - · -). Причем в этот период в камере II слой формируется за счёт проскока аэрозолей из камеры I, то есть камера II при этом выполняет функцию контрольной. При дальнейшем протекании процесса появляется десублимат и в камере III (линия — · · —).

Десублиматор предложенной конструкции обладает рядом преимуществ:

- обеспечивает постоянную производительность на период заполнения всех камер, за исключением двух последних (контрольных);
- минимизирует аэрозольный проскок целевого продукта из аппарата;
- гарантирует прохождение парогазовой смеси вдоль обогреваемой стенки;
- позволяет снизить затраты хладагента на десублимацию за счёт исключения потерь холода в окружающую среду.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЕЁ ОПРОБАЦИЯ

Во время работы аппарата в нём имеют место процессы теплообмена и массообмена (выделения твёрдой фазы), ламинарного и турбулентно-ламинарного (в разных зонах) течения газовой среды переменной массы, нарастание слоя десублимата на стенке, изменение теплофизических параметров теплообмена внутри секций и условий десублимации, а также заполнение аппарата продуктом.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ДЕСУБЛИМАЦИИ И ЕЁ АПРОБАЦИЯ ДЛЯ МНОГОКАМЕРНОГО АППАРАТА

По мере увеличения толщины слоя продукта в секциях изменяется соотношение поверхностной и объёмной десублимаций.

Каждый из перечисленных процессов имеет описание в технической литературе [3, 9], однако их полное комплексное описание и совместное рассмотрение представляется довольно сложным и трудоёмким. Учитывая, что многокамерный десублиматор представляет собой набор последовательно расположенных камер, в каждой из которых происходит поверхностная десублимация, а образующиеся аэрозоли повторно сублимируются и их пары конденсируются в следующих по ходу тока камерах, можно ограничиться только рассмотрением сопряжённой тепловой и гидродинамической задач в одной камере десублиматора. Решение задачи возможно для заданных радиальных размеров десублиматора D_0 , D и длины камеры L (рисунок 3).

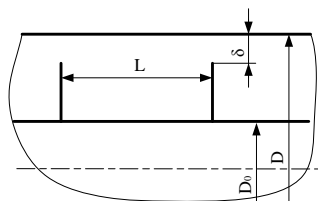


Рисунок 3 – Схема камеры десублиматора

Содержание ГФУ в ПГС в каждой камере пропорционально его парциальному давлению. С учетом этого возможно определить число камер, исключаящее выгод ГФУ из аппарата.

Все физические процессы, происходящие в камере аппарата, описываются системой дифференциальных уравнений с частными производными, включающей уравнение неразрывности и уравнения Новье-Стокса [10]. Получить их решение можно только для тривиальных простых случаев течения. Поэтому для наших условий задачу решаем численно.

Для обезразмеривания уравнений выбираем характерные скорость и размер. В нашем случае это среднерасходная скорость U_0 во входном зазоре δ (рисунок 3) и приведённый диаметр D_n живого сечения кольца. В результате получаем безразмерный критерий, определяющий относительное значение вязких и инерционных эффектов, называемый числом Рейнольдса $Re = U_0 \cdot D_n / \nu$, где ν – кинематическая вязкость ПГС. В случае осесимметричного течения удобно перейти к новым зависимым переменным «завихрённость Ω – функция тока ψ », в результате чего из рассмотрения исключается градиент давле-

ния. Этот искусственный математический приём позволяет существенно упростить схему расчёта.

Наличие в десублиматоре перегородок и узких зазоров для прохождения ПГС предполагает, даже несмотря на относительно малые скорости, развитое турбулентное течение. Моделирование турбулентности проведём известным способом. Для этого актуальные значения компонент скорости представим в виде $U = u + u'$, где u – осреднённое по временному промежутку значение, u' – пульсационная составляющая. После подстановки таких значений и последующего осреднения по времени получаем уравнения, в которые кроме осреднённых значений зависимых переменных входят корреляции пульсаций компонент скорости. Эти корреляции и определяют природу дополнительных турбулентных напряжений, возникающих в потоке. Используя обобщённую гипотезу Буссинекса, введём понятие турбулентной вязкости. Существует большое число моделей турбулентности [11], однако для инженерных расчётов наиболее оптимальными по сложности и точности расчёта принято считать модели, в которых используется система из двух уравнений переносного типа, записанных для характеристик турбулентности. Исходя из этого, была выбрана следующая схема.

Расчёт гидродинамики в рабочем объёме камеры проводили на основе системы полных стационарных осесимметричных осреднённых дифференциальных уравнений Новье-Стокса эллиптического типа, записанных в переменных завихрённость Ω , функция тока ψ . Для замыкания системы уравнений использовали двухпараметрическую «k- ω » модель турбулентности Уилкокса [12]. Все уравнения записывали в цилиндрической системе координат, где r , z – радиальная и аксиальная координаты, соответственно. Исходную систему уравнений в консервативном дивергентном и безвременном виде записали следующим образом:

- уравнение переноса завихрённости Ω , полученное из уравнений движения путём исключения градиента давления

$$\begin{aligned} Re \cdot r \cdot \left[u_r \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial r} + u_z \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[r \cdot (1 + \nu_r) \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial r} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[r \cdot (1 + \nu_z) \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial z} \right] = \\ = \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \Omega \cdot \frac{\partial}{\partial r} [r \cdot (1 + \nu_r)] \right\} + r \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\Omega \cdot \frac{\partial \nu_r}{\partial z} \right) + 2 \cdot \frac{\partial^2 \nu_r}{\partial z^2} \cdot \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} [\Omega \cdot (1 + \nu_r)] + \\ + 2 \cdot \frac{\partial^2 \nu_z}{\partial r \partial z} \cdot \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) - 2 \cdot \frac{\partial^2 \nu_z}{\partial r^2} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial z}; \end{aligned} \quad (1)$$

- уравнение Пуассона для определения функции тока ψ , полученное из уравнения неразрывности

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \Omega \cdot r^2 + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad (2)$$

где

$$\Omega = \frac{1}{r} \cdot \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r} \right),$$

$$u_r = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z},$$

$$u_z = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r},$$

$$v_t = \text{Re} \cdot \frac{k}{\omega};$$

- уравнение переноса кинетической энергии турбулентных пульсаций k .

$$\begin{aligned} \text{Re} \cdot r \cdot \left[u_r \cdot \frac{\partial k}{\partial r} + u_z \cdot \frac{\partial k}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[r \cdot (1 + \sigma \cdot v_t) \frac{\partial k}{\partial r} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[r \cdot (1 + \sigma \cdot v_t) \frac{\partial k}{\partial z} \right] = \\ = r \cdot \text{Gen} - \frac{2}{r} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot k + \frac{v_t}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) - \text{Re} \cdot r \cdot C_\mu \cdot k \cdot \omega \end{aligned} \quad (3)$$

где k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций;

ω – удельная скорость диссипации кинетической энергии турбулентных пульсаций;

- уравнение переноса удельной скорости диссипации ω

$$\begin{aligned} \text{Re} \cdot r \cdot \left[u_r \cdot \frac{\partial \omega}{\partial r} + u_z \cdot \frac{\partial \omega}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[r \cdot (1 + \sigma \cdot v_t) \frac{\partial \omega}{\partial r} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[r \cdot (1 + \sigma \cdot v_t) \frac{\partial \omega}{\partial z} \right] = \\ = r \cdot \frac{\omega}{k} \cdot (C_1 \cdot \text{Gen} - C_2 \cdot \text{Re} \cdot k \cdot \omega), \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\text{Gen} = v_t \cdot \left\{ \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right)^2 + 2 \cdot \left[\left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 \right] \right\}$$

$$\sigma = 0,5; C_\mu = 0,09;$$

$$C_1 = \frac{C_2}{C_\mu} - \frac{\sigma \cdot \chi^2}{\sqrt{C_\mu}}; C_2 = \frac{5}{6} \cdot C_\mu; \chi = 0,4;$$

В уравнениях (1-4) использованы следующие константы и их обозначения:

- Ω – завихрённость;
- ψ – функция тока;
- v_t – коэффициент турбулентной вязкости;
- σ , C_μ , C_1 , C_2 – модельные константы.

Систему дифференциальных уравнений (1-4) решали численно методом конечных разностей. Получаемые конечно-разностные аналоги приводили к итерационной формуле Либмана, которые решали с применением метода подгонки. Для получения монотонной сходимости к решению использовали последовательную нижнюю релаксацию для всех искомых функций, кроме функции тока. Для функции тока использовали верхнюю релаксацию, что повышает скорость сходимости к решению.

В качестве граничных условий на твёрдых поверхностях использовали условие

152

прилипания и непроницаемости смеси через поверхность. Значение удельной скорости диссипации, ω_w , на стенке определяли из условия

$$\omega_w = \frac{6}{\text{Re} \cdot C_2 \cdot r^2}$$

Для завихрённости Ω_w на стенках применяли условие Тома [13], которое для нашего случая можно записать в виде

$$\Omega_w = \frac{2 \cdot (\psi_{w-1} - \psi_w)}{(r \cdot \Delta r)^2}$$

где ψ_w , ψ_{w-1} – значения функций тока на стенке и в соседнем со стенкой узле разностной сетки, соответственно.

В выходном сечении рассматриваемой области использовали мягкое условие установления $\partial f / \partial z = 0$, записываемое для всех зависимых переменных. На входной границе задавали равномерные или постоянные значения искомых переменных.

Поле температуры в рассматриваемой области определяли с использованием уравнения переноса теплоты, которое в безразмерном виде для избыточной температуры $\Theta = (T - T_{хол}) / (T_{тепл} - T_{хол})$, где T , $T_{тепл}$, $T_{хол}$ – температура текущая, тёплой и холодной стенки, соответственно, можно записать в виде

$$\begin{aligned} \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot r \cdot \left[u_r \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial r} + u_z \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right] = \\ \frac{\partial}{\partial r} \left[r \cdot \left(1 + v_t \cdot \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_t} \right) \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[r \cdot \left(1 + v_t \cdot \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_t} \right) \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right] \end{aligned}$$

где Pr – критерий Прандтля;

$$\text{Pr}_t = 0,7-1,0.$$

Численную реализацию программы построили на языке Pascal, графическое оформление результатов расчётов осуществляли с использованием пакета Surfer-32.

Расчёт по разработанной программе проводили для десублимации высокообогащённого гексафторида урана из ПГС со следующими исходными данными:

- расход ПГС – 4,0 кг/ч;
- производительность по ГФУ – 3,0 кг/ч;
- температура тёплой стенки – 60 °С;
- температура холодной стенки – минус 90 °С;
- наружный диаметр холодной стенки, D_0 – 320 мм;
- внутренний диаметр тёплой стенки, D – 400 мм.

Результаты решения системы уравнений (1-4) графически представлены на рисунках 4-6.

На рисунке 4 показано распределение
ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2018

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ДЕСУБЛИМАЦИИ И ЕЁ АПРОБАЦИЯ ДЛЯ МНОГОКАМЕРНОГО АППАРАТА

линий тока ПГС в камере с постоянной длиной камеры $L = 0,25 \cdot D_0$ и переменным зазором δ : $\delta = 0,02 \cdot D_0$ (рисунок 4, а), $\delta = 0,04 \cdot D_0$ (рисунок 4, б), $\delta = 0,05 \cdot D_0$ (рисунок 4, в).

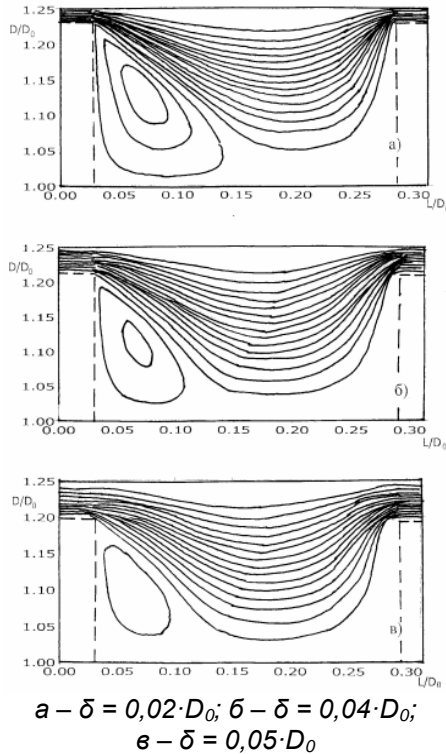


Рисунок 4 – Линии тока ПГС в камере при постоянной длине камеры L и переменном зазоре δ

Из рисунка 4 следует, что при увеличении зазора δ течение ПГС смещается к периферии аппарата, т. е. к тёплой стенке. При этом степень десублимации ГФУ в камерах снижается, а фронт конденсации растягивается по длине десублиматора. Поэтому величина этого зазора должна быть минимальной.

На рисунке 5 показано распределение линий тока ПГС в камере с постоянным зазором $\delta = 0,04 \cdot D_0$ при переменной длине камеры L : $L = 0,125 \cdot D_0$ (рисунок 5, а), $L = 0,25 \cdot D_0$ (рисунок 5, б), $L = 0,375 \cdot D_0$ (рисунок 5, в).

Из рисунка 5 следует, что при увеличении длины камеры увеличивается глубина проникновения ПГС в камеру в направлении к холодной стенке и при $L > 0,375 \cdot D_0$ течение ПГС выравнивается. Поэтому эту длину камеры можно принять как оптимальную.

Рассматривая распределение температуры ПГС в камере при оптимальных соотношениях геометрических параметров камеры δ/D_0 и L/D_0 (рисунок 6), видно, что поле температуры в камере в этих условиях ($\delta =$

$0,02 \cdot D_0$, $L = 0,25 \cdot D_0$) в достаточной степени выровнено и условия десублимации стабилизированы (рисунок 6, а). Увеличение зазора δ до $0,04 \cdot D_0$ (рисунок 6, б) приводит к неравномерности поля температуры.

На рисунке 6 на линиях распределения температур цифрами обозначены температуры: 0,2 – минус 60 °С; 0,4 – минус 30 °С; 0,6 – 0 °С; 0,8 – 30 °С. Линии без обозначений, расположенные рядом, показывают отличие температуры на 7,5 градуса.

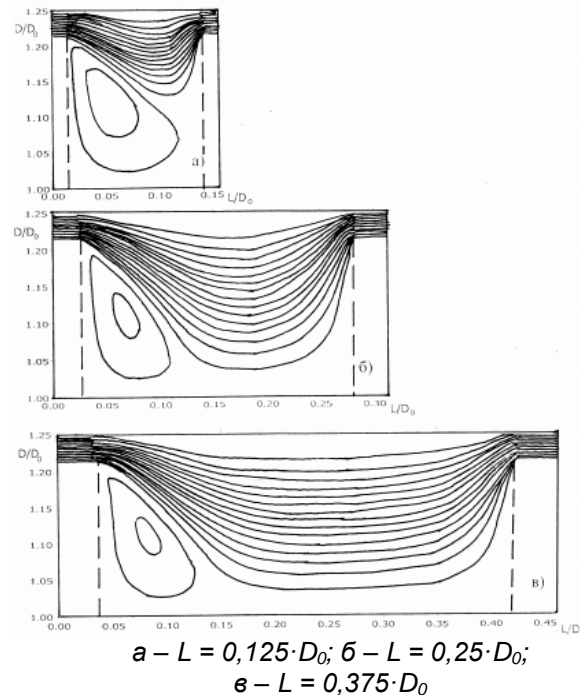


Рисунок 5 – Линии тока ПГС в камере при постоянном зазоре δ и переменной длине камеры L

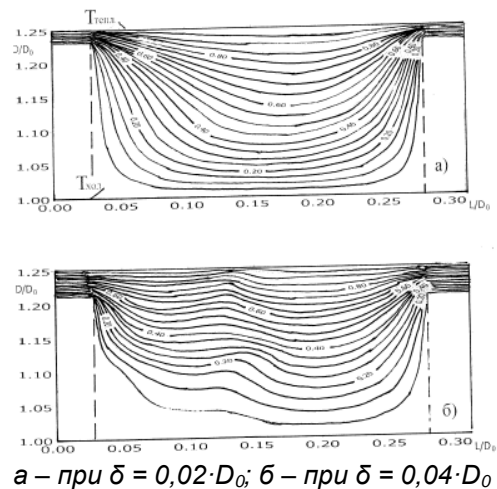


Рисунок 6 – Линии распределения температур в камере при $L = 0,25 \cdot D_0$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены изыскания по разработке конструкции десублиматора для конденсации высокообогащённого гексафторида урана из парогазовой смеси. Предложена конструкция многокамерного десублиматора с «тёплой» стенкой соответствующая исходным требованиям: исключение уноса аэрозолей ГФУ при контролируемой заполняемости аппарата. Разработана математическая модель десублимационного процесса применительно к многокамерному десублиматору, которая позволяет рассчитывать оптимальные параметры аппарата. Применительно к десублимации ГФУ получены графические изображения линий тока ПГС и полей температур в десублимационной камере аппарата в зависимости от её геометрических соотношений внутренних элементов.

Десублиматор соответствует правилам ядерной безопасности, конструкция аппарата защищена патентом РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шумский, К.П. Вакуумные аппараты и приборы химического машиностроения / К.П. Шумский. – М.: Машиностроение, 1974. – 576 с.
2. Горелик, А.Г. Десублимация в химической промышленности / А.Г. Горелик, А.В. Амитин. – М.: Химия, 1986. – 272 с. (Процессы и аппараты в химической и нефтехимической технологии).
3. Амелин, А.Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара / А.Г. Амелин. – М.: Химия, 1972. – 304 с.
4. Русаков, И.Ю. Сублимационно-десублимационные процессы для фторидных технологий и их аппаратурное оформление : монография / И.Ю. Русаков, А.С. Буйновский, В.Л. Софронов. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ. – 2015. – 230с.
5. SU 551033, МПК В01D 7/02, F28D11/06. Сублимационный конденсатор / О.Г. Молостов (СССР). – Заявл. 09.11.71, опубл. 25.05.77. Бюл. №11.
6. SU 1057058, МПК В01D 7/02. Десублиматор / В.А. Барков (СССР). – Заявл. 07.07.1981, опубл. 30.11.83. Бюл. №44.
7. RU 2271849, МПК В01D 7/02. Десублиматор / Г.И. Гриневиц, В.П. Прохоров, М.Г. Макаренко (RU). – Заявл. 08.07.2004, опубл. 20.03.2006. Бюл. №8.

8. RU 2244582, МПК В01D 7/02, В01D 59/08. Сублимационный аппарат / И.Ю. Русаков, А.А. Гуцин, В.В. Лазарчук, В.А. Хохлов, Б.П. Белозёров. – заявл. 26.03.01 ; опубл. 20.02.03, Бюл. № 2.
9. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию [пер. с англ.] / П. Райст. – М.: Мир, 1987. – 280 с.
10. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – изд. 6-е. – М.: Наука, 1987. – 824 с.
11. Методы расчёта турбулентных течений : сборник [пер. с англ. В. И. Пономарева, Л. К. Эрдмана / под ред. В. Колльман] / Дж. Ламли, Ж. Матье, Д. Жандель [и др.]. – М.: Мир, 1984. – 463 с.
12. Уилкоккс, Д.К. Уточнение уравнения для масштаба турбулентности в перспективных моделях турбулентности / Д.К. Уилкоккс // Аэрокосмическая техника. – 1989. - № 11. – С. 30-46.
13. Том, А. Числовые расчёты полей в технике и физике : [пер. с англ.] / А. Том, С.Д. Эйплт. – М-Л.: Энергия, 1964. – 208 с.

Русаков Игорь Юрьевич – к.т.н., доцент кафедры Машины и аппараты химических и ядерных производств Северского технологического института – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (СТИ НИЯУ МИФИ), г. Северск, тел.: 8-(3823)780-173, IYRusakov@mephi.ru.

Софронов Владимир Леонидович – д.т.н., профессор кафедры Химия и технология материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (СТИ НИЯУ МИФИ), г. Северск, тел.: 8-(3823)780-218, VLSoifronov@mephi.ru.

Брендаков Владимир Николаевич – д. физ.-мат.н., заведующий кафедрой Высшая математика и информационные технологии Северского технологического института - филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (СТИ НИЯУ МИФИ), г. Северск, тел.: 8-(3823)780-188, e-mail: VNBrendakov@mephi.ru.