

separation processes occurring in GC cascade for the MCIM separation. Earlier we had done verification of developed mathematical model as an example silicon and germanium isotope separation. Isotope separation mode in GC cascade is preceded by its filling with process gas. So far a modeling of filling cascade was not carried out.

The results of research filling GC cascade for nickel isotope separation by feed flow input to different stages is shown in this article. According to analysis of research results nickel isotope concentrations on light and heavy fraction flows after filling cascade depend on feed stage number. The research have indicated that there is optimal feed stage number for each nickel isotope when isotope concentration in light or heavy fraction flows of cascade takes on maximal value after filling cascade with process gas. Feed stage number optimization lets to decrease duration of further nonstationary process of cascade start-up (establishment of stationary isotope concentrations).

## СВОЙСТВА ИЗОТОПНОЙ СМЕСИ И ИХ ИЗМЕНЕНИЕ В РАЗДЕЛИТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

Ушаков А.А.<sup>1</sup>

Научный руководитель: Орлов А.А.<sup>2</sup>, д.т.н., профессор

<sup>1</sup>Акционерное общество «Производственное объединение «Электрохимический завод»,  
663690, г. Зеленогорск Красноярского края, ул. Первая промышленная, 1

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: ushakovaa2015@sibmail.com

Для использования в полной мере свойств нужного (целевого) изотопа необходимо осуществить процесс разделения изотопной смеси, состоящей из изотопов одного химического элемента. Одной из основных характеристик изотопного состава является концентрация целевого изотопа. При этом в некоторых случаях также имеет значение концентрация других изотопов смеси. Например, в международном научном проекте GERDA использовался германий, к изотопному составу которого предъявлялись следующие требования:  $^{76}\text{Ge}$  – не менее 86%,  $^{70}\text{Ge}$  – не более 0,01%. Помимо этого, особым требованиям по изотопному составу отвечал поликристаллический кремний, который использовался в международных научных проектах «Килограмм-2» и «Килограмм-3» для уточнения числа Авогадро и создания нового прототипа эталона массы (килограмма). Используемый в проекте кремний содержал изотоп Si-28 с концентрацией не менее 99,997%, а относительное содержание изотопов Si-29 к Si-30 не превышало 5. Исходя из этого, ценность получаемого в результате проведения разделительного процесса изотопно-модифицированного вещества (изотопной смеси) в достаточной мере не может быть описана только концентрацией целевого изотопа. Для смеси, состоящей из двух компонентов (изотопов), в теории и практике разделения используется понятие потенциала разделения, который в свою очередь является функцией от концентрации одного из компонентов смеси. Потенциал разделения используется для определения ценности получаемой в процессе разделения двухкомпонентной изотопной смеси косвенным путем в результате определения затрат работы разделения оборудования в единицах работы разделения. Для смеси, которая состоит из более чем двух компонентов, предложены различные формулировки и способы расчета потенциала разделения. Однако все они носят частный характер, ни один из предложенных вариантов потенциала разделения многокомпонентной изотопной смеси не является общепризнанным и не может быть использован для оценки затрат работы разделения оборудования и определения ценности получаемой многокомпонентной изотопной смеси.

В данной работе рассмотрены свойства многокомпонентной изотопной смеси, предложены оригинальные  $p$ -параметр и  $d$ -параметр, с помощью которых можно определить ее ценность, а также рассмотрено изменение свойств изотопной смеси в разделительном элементе. Показано, что для моноизотопной смеси, когда концентрация одного из изотопов близка к 100%, величины предложенных параметров близки к нулю и в процессе разделения также не происходит их изменение (эффект разделения близок к нулю). Для изотопной смеси с симметричным составом, когда имеют место равные друг относительно друга концентрации компонентов, массовые числа которых отличаются от средневзвешенное массового числа смеси на одно и то же значение по модулю,  $d$ -параметр принимает максимальное значение. При пропускании такой изотопной смеси через разделительный элемент достигается максимальное изменение концентраций компонентов смеси. Результаты исследований могут быть использованы для дальнейшего изучения закономерностей изменения состава изотопной смеси в разделительном каскаде.

## РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ ГЕРМАНИЯ В КАСКАДЕ ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ

Шинкевич Р.А., Орлов А.А.

Томский политехнический университет, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: ShinkevichRA@yandex.ru

Для исследования закономерностей нестационарного разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг при заполнении его рабочим веществом и накоплении изотопов до стационарных значений при практически неизменных гидравлических параметрах каскадов была использована математическая модель [1].

В процессе исследования проводилось численное моделирование нестационарного процесса разделения изотопов германия в каскаде газовых центрифуг постоянной ширины при его заполнении рабочим веществом, и определялась динамика концентрации его изотопов в потоках легкой и тяжелой фракций каскада.

В результате исследования показано, что в процессе заполнения происходит разделение изотопов германия. После заполнения каскада изотопы германия распределяются по ступеням каскада в соответствии с их массовыми числами. Наибольшее изменение концентрации изотопов германия имеет место на конечных ступенях каскада, наименьшее – вблизи ступени подачи потока питания. Результаты численного моделирования разделения изотопов германия хорошо согласуются с данными других авторов для случая, когда гидравлические параметры каскада соответствуют стационарным. Характер изменения концентрации изотопов германия в ходе нестационарного процесса зависит от начального состояния каскада.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов А. А., Ушаков А. А., Совач В. П. Математическая модель нестационарных гидравлических процессов, протекающих в каскаде газовых центрифуг при разделении многокомпонентных изотопных смесей. Альтернативная энергетика и экология. 2015. Т. 23, № 187. С. 45–50.

### **ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ОТВЕРСТИЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РЕБРАХ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОГРУЖНОЙ ЕМКОСТИ НА ДИНАМИКУ ЕЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ДЕСУБЛИМИРОВАННЫМ UF<sub>6</sub>**

Балаев Д.Б.

Научный руководитель: Орлов А.А., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: balaev\_daniil@mail.ru

Данная работа посвящена исследованию возможности повышения производительности вертикальной погружной емкости объемом 0,06 м<sup>3</sup> с горизонтальным оребрением. Проведенные ранее расчеты показали, что для заполнения емкости до 70% свободного объема без «перемерзания» верхнего ребра и обеспечения максимальной средней производительности 4,64·10<sup>-3</sup> кг/с диаметр центральных отверстий в ребрах должен быть 64·10<sup>-3</sup> м.

Нами рассмотрен случай, когда центральные отверстия в ребрах имеют различный диаметр. Верхнее ребро также имеет центральное отверстие диаметром 64·10<sup>-3</sup> м, а в нижнем ребре диаметр отверстия уменьшается с 64·10<sup>-3</sup> м до 1,0·10<sup>-3</sup> м с шагом 1·10<sup>-3</sup> м. Диаметр остальных отверстий уменьшается таким образом, что от верхнего до нижнего ребра они образуют усеченный конус. Критерием ограничения диаметра отверстий в ребрах емкости являлось «перемерзание» на любом ребре.

Показано, что, максимальная средняя производительность емкости наблюдается при диаметре центрального отверстия в нижнем ребре 36·10<sup>-3</sup> м и составляет 5,07·10<sup>-3</sup> кг/с. Сравнение показывает, что средняя производительность емкости при расположении центральных отверстий в виде усеченного конуса на 9,27% выше, чем в случае когда диаметр всех отверстий одинаков. Это объясняется тем, что площадь теплообменной поверхности ребер емкости также увеличивается.

### **ДИНАМИКА ЗАПОЛНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОГРУЖНОЙ ЕМКОСТИ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ РЕБРАМИ ДЕСУБЛИМИРОВАННЫМ UF<sub>6</sub>**

Турбина И.А.

Научный руководитель: А.А. Орлов, д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: iat22@tpu.ru

В работе исследована возможность повышения производительности вертикальной погружной емкости объемом 0,06 м<sup>3</sup> с горизонтальным оребрением. Рассмотрен случай, когда центральные отверстия в ребрах имеют различный диаметр. Верхнее (первое) ребро имеет отверстие диаметром 64·10<sup>-3</sup> м. Диаметр отверстия второго ребра уменьшался шагом 1·10<sup>-3</sup> м до его «перемерзания». Определено его максимальное значение до момента «перемерзания». При этом диаметры отверстий остальных ребер были равны этому максимальному значению. Затем уменьшался диаметр отверстия третьего ребра до момента его «перемерзания», причем отверстия в трех верхних ребрах образовывали усеченный конус, а в остальных – цилиндр. Аналогично изменялись диаметры отверстий в ребрах с четвертого по тринадцатое, пока они не образуют усеченный конус. В результате определена оптимальная