

Д.Н. ДЖУЛЯ, С.В. БОГОВАЛОВ, И.В. ТРОНИН

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОЛНАМИ В СВЕРХСИЛЬНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПОЛЯХ

Разделение волнами в газовых центрифугах (ГЦ) происходит за счёт двух основных механизмов - бародиффузии и радиальных колебаний газа в волне [1]. Сделана аналитическая оценка разделения изотопной смеси UF_6 в ГЦ за счёт обоих механизмов в безотборном режиме ГЦ для различных скоростей вращения ГЦ и частоты волны.

D. N. DZHULYA, S.V. BOGOVALOV, I.V. TRONIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

ANALYTICAL EVALUATION OF ISOTOPE SEPARATION BY WAVES IN SUPERSTRONG CENTRIFUGAL FIELDS

Separation by waves in gas centrifuge (GC) occurs due to two main mechanisms - barodiffusion and radial vibrations of the gas in the wave [1]. An analytical assessment of the separation of the UF_6 isotope mixture in GC is made due to both mechanisms in the non-selective GC mode for different GC rotation speeds and wave frequencies.

Повышение разделительной способности газовых центрифуг (далее ГЦ) является основной задачей теоретических работ по разделению изотопов в ГЦ. Оптимальная разделительная способность ГЦ сильнее всего зависит от скорости вращения ротора [2] $\sim V^2$, что подтверждается численным моделированием разделения в противоточных и прямоточных ГЦ [3-5].

Однако, сегодня технологии близки к пределу увеличения скорости вращения ротора ГЦ. Поэтому представляют интерес исследования, направленные на увеличение разделительной способности ГЦ за счёт оптимизации стационарного течения газа. [3,6] При этом роль нестационарных процессов остается в стороне от рассмотрения.

В ГЦ распространяются вдоль ротора волны, генерируемые газоотборниками. Наши исследования этих волн [7,8,9] привели к открытию нетривиальной акустической волны, которая распространяется со скоростью звука строго вдоль оси вращения ротора. Эта волна - аналог волны Лэмба в стратифицированной среде [10]. Она обладает интересными для физики разделения свойствами: большой, по сравнению с другими семействами волн длиной затухания, сравнимой с длиной ГЦ, а так же её энергия сконцентрирована около стенки ротора ГЦ в слое где происходит основное разделение.

Наличие волны неизбежно приводит к дополнительному разделению газа за счёт двух основных механизмов - бародиффузионного и радиальной конвекции [1]. Бародиффузионный механизм разделения обусловлен возникающей разницей между распределением давления газа в волне и распределением давления в стационарном газе. За счёт их разницы и наличия аксиальных колебаний газа возникает аксиальный поток легкого компонента газовой смеси в направлении противоположном направлению распространению волны.

Из-за вязкости и сжимаемости газа возникают также радиальные колебания газа, которые из-за наличия радиального градиента концентрации создают радиальные колебания концентрации газа, которые за счёт аксиальных колебаний газа переносятся вдоль оси и возникает аксиальный поток легкого компонента. Мы приводим в этой работе аналитические оценки эффекта разделения изотопов за счет этих двух механизмов.

Список литературы

1. Джуля Д. Н., Боговалов С. В., Тронин И. В. "Новые механизмы разделения газовых смесей в сверхсильных центробежных полях под воздействием волн", Многофазные системы, 2023. –Т. 18. – № 4. – с. 320–322.
2. I. Andronov, G. G.Yu., Y. Vyazovetskiy, A. Senchenkov, S. Senchenkov, comparative technical and economic characteristics of gas centrifuges of various types, Proceedings of the 4th All-Russian conference "Physicochemical processes in the selection of atoms and molecules" (in russian) (1999) 71.
3. S. V. Bogovalov, V. D. Borman, I. V. Tronin, and V. N. Tronin, "Optimized separative power of hyperspeed iguassu gas centrifuge: Dependence on the rotor diameter and velocity," Nuclear Science and Engineering, vol. 194, no. 12, pp. 1105–1115, 2020.
4. S. Bogovalov, V. Borman, Separative power of an optimised concurrent gas centrifuge, Nuclear Engineering and Technology 48 (3) (2016) 719-726. doi:<https://doi.org/10.1016/j.net.2016.01.024>.
5. Bogovalov, S.V., Dzhulya, D.N. & Tronin, I.V. Separative Power of an Optimized Direct-Flow Gas Centrifuge at Low Rotational Speeds. J Eng Phys Thermophy 98, 1526–1531 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10891-025-03231-x>
6. Dzhulya, D.N., Bogovalov, S.V. & Tronin, I.V. Increasing the Separative Power of a Gas Centrifuge. Phys. Atom. Nuclei (2025). <https://doi.org/10.1134/S1063778825090121>
7. Bogovalov S. V., Kislov V. A., Tronin I. V. Theor. Comput. Fluid Dyn. 2015. Vol. 29. Pp. 111–125.
8. Bogovalov S. V., Kislov V. A., Tronin I. V. Theor. Comput. Fluid Dyn. 2019. Vol. 33. Pp. 21–35.
9. Bogovalov, S.V., Dzhulya, D.N., Kislov, V.A. & Tronin, I.V. Waves in Gas Centrifuges. J Eng Phys Thermophy 98, 1509–1517 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10891-025-03229-5>
10. Lamb H. On atmospheric oscillations. Proc. R. Soc. Lond. 1910. A84. Pp. 551–572.