



## Новые механизмы разделения газовых смесей в сверхсильных центробежных полях под воздействием волн

Джуля Д.Н., Боговалов С.В., Тронин И.В.

НИЯУ МИФИ, Кафедра Молекулярной физики, Москва

В данной работе проведено исследование разделения бинарной изотопной газовой смеси в сильном центробежном поле под воздействием плоской акустической волны. Во вращающемся газе, разделение звуковыми волнами может происходить не только за счёт термодиффузии, как в обычной трубке, но и за счёт других механизмов. Одним из них является бародиффузия за счёт возмущения давления в волне. Возмущение давления в волне, распространяющейся вдоль оси вращения, имеет иную экспоненциальную зависимость, чем давление невозмущенного газа. Из-за этого возникает возмущение концентрации газовой смеси. Другой механизм разделения возникает из-за радиальных колебаний газа на фоне радиальных градиентов концентрации. В этой работе рассмотрен бародиффузионный механизм разделения. Получены аналитические выражения для аксиальной скорости и возмущения концентрации газа в волне, определена зависимость аксиального градиента концентрации в стационарном случае от частоты волны.

### Введение

В газовой центрифуге (ГЦ) волны генерируются естественным образом газоотборниками. Эти волны могут в несколько раз увеличивать поток отбора по сравнению со стационарным случаем [1]. Известно, что волны могут приводить к разделению газовых смесей [2]. В сверхсильных центробежных полях возникают новые специфические механизмы разделения под воздействием волн. Было проведено исследование плоских волн в таких системах в случае отсутствия диссипации. Получены дисперсионные соотношения для таких волн [3]

и обнаружена акустическая волна, существование которой не тривиально во вращающемся газе тем, что в ней отсутствуют радиальные колебания. Для этой волны получено выражение для коэффициента поглощения за счёт вязкости и теплопроводности газа [4]. Из оценок, можно сказать, что это единственная волна, которая не затухает на длине волны газа, длина затухания для  $UF_6$  составляет порядка 1 м, что сопоставимо с высотой ГЦ Игуасу. В этих условиях акустические волны могут влиять на сам процесс разделения.

Уравнение на возмущение концентрации лёгкого компонента газовой смеси  $\delta$  относительно концентрации  $C_0$  в отсутствие волны в центробежном поле в первом порядке возмущения соглас-

© Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН  
© Институт проблем механики им А.Ю. Ишлинского РАН  
© Джуля Денис Николаевич, [denis.dzhulya@mail.ru](mailto:denis.dzhulya@mail.ru)  
© Боговалов Сергей Владимирович, [svbogovalov@mephi.ru](mailto:svbogovalov@mephi.ru)  
© Тронин Иван Владимирович, [IVTronin@mephi.ru](mailto:IVTronin@mephi.ru)

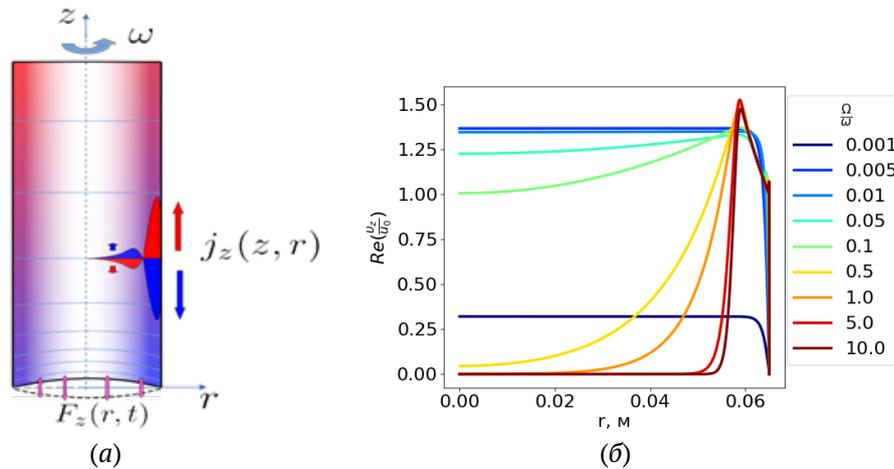


Рис. 1. (а) Схема процесса разделения в ГЦ плоской акустической волной; (б) Распределения безразмерной аксиальной скорости вдоль радиуса ГЦ для различных отношений частот  $\Omega/\omega$

но [5] имеет вид:

$$\rho_0 \frac{\partial \delta C}{\partial t} - \rho_0 D \nabla \delta C =$$

$$= \rho_0 D \left( \nabla \frac{k_T}{T} \nabla T + \nabla \frac{k_P}{P} \nabla P \right) - \rho_0 v_r \frac{dC_0}{dr}.$$

Здесь  $\rho_0$ ,  $C_0$  — плотность газа и концентрация лёгкого компонента смеси в отсутствии волн,  $k_P$ ,  $k_T$  — коэффициенты баро- и термо- диффузии,  $D$  — коэффициент диффузии газа,  $v_r$  — радиальная скорость колебаний газа,  $T$ ,  $P$  — температура и давление газа. Из этого уравнения видно, что изменение концентрации будет происходить за счёт трёх механизмов: из-за радиальных градиентов температуры, вызывающих радиальную термодиффузию газа; из-за различий между радиальными градиентами давления в волне и в невозмущённом волной газе, вызывающих дополнительную бародиффузию газа; и из-за радиальных колебаний газа, возникающих в вязком слое и приводящих к радиальному переносу лёгкого компонента смеси из-за радиального градиента концентрации. Термодиффузионный механизм присутствует и в не вращающемся газе [2], бародиффузия и радиальный перенос возникают из-за вращения газа. В данной работе рассмотрим механизм разделения возникающий за счёт бародиффузии. Исследованию влияния радиальных колебаний на разделение будет посвящена следующая работа.

## Постановка задачи

Рассмотрим вращающуюся бинарную газовую изотопную смесь с частотой вращения  $\omega$ . В ней распространяется плоская монохроматическая волна

с частотой  $\Omega$  и волновым вектором  $k$  направленным вдоль оси вращения ГЦ. Из-за бародиффузионного слагаемого вдоль радиуса ГЦ возникнет возмущение концентрации лёгкого компонента смеси  $\delta C$ . Это приведёт к аксиальному потоку массы лёгкого компонента, который в стационарном случае уравновешен аксиальной диффузией газа. Нам нужно получить оценку для аксиального градиента концентрации во втором порядке малости по амплитуде возмущения в волне.

## Основные уравнения и результаты

Если предположить, как это сделано в [2] и [5], что здесь возмущение давления не сильно отличается от возмущения давления в случае газа без диссипации [3], то тогда можно получить уравнения на аксиальную скорость газа  $v_z$  и на возмущение концентрации  $\delta C$  из уравнений газодинамики в первом порядке по возмущению.

Можно выделить несколько характерных масштабов длины  $\ell$  — масштаб изменения плотности газа в ГЦ,  $\delta_v$ ,  $\delta_D$ ,  $\delta_\chi$  — ширины пограничного слоя вязкости, диффузии и теплопроводности,  $\lambda = 2\pi c/\Omega$  — длина волны и  $l_\eta$  — масштаб толщины слоя газа в пристеночной области. Для наших условий наблюдается иерархия масштабов:  $\delta_v, \delta_D, \delta_\chi \lesssim \ell \ll l_\eta$ ,  $\delta \ll \lambda$ . В приближении пограничного слоя уравнения на  $\delta C$  и  $v_z$  можно решить независимо.

Полученные зависимости  $v_z$  и  $\delta C$  от радиальной координаты  $r$ , представлены на Рис. 1(б), 3(б). Возмущение концентрации происходит в пограничном слое около стенки на масштабе  $\delta_D$  и на расстоянии  $l_\eta$  от стенки возникает её рост, амплитуда  $v_z$  при уменьшении частоты волны уменьшается.

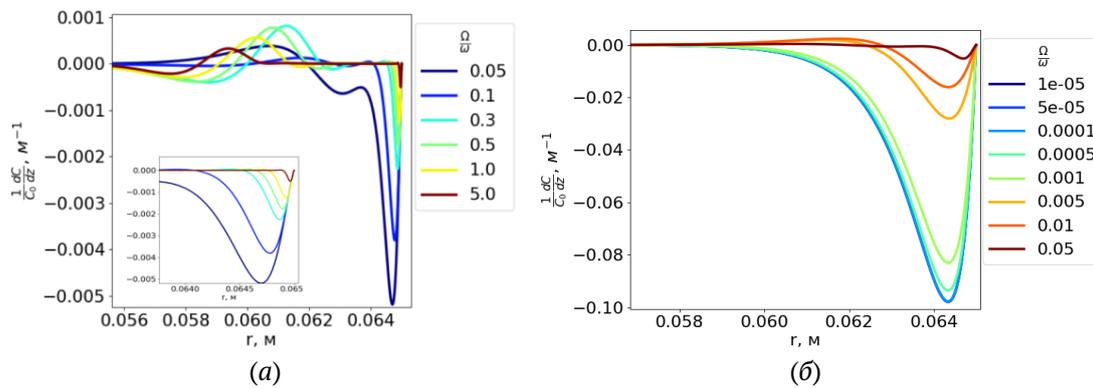


Рис. 2. Распределение аксиальный градиент концентрации легкого компонента газовой смеси  $\text{UF}_6$  вдоль радиуса, создаваемого возмущением давления акустической волны для больших частот (а) и малых частот (б) при частоте вращения ГЦ  $\omega = 2\pi \cdot 1700 \text{ сек}^{-1}$  и амплитуде колебаний  $u/c = 10^{-1}$

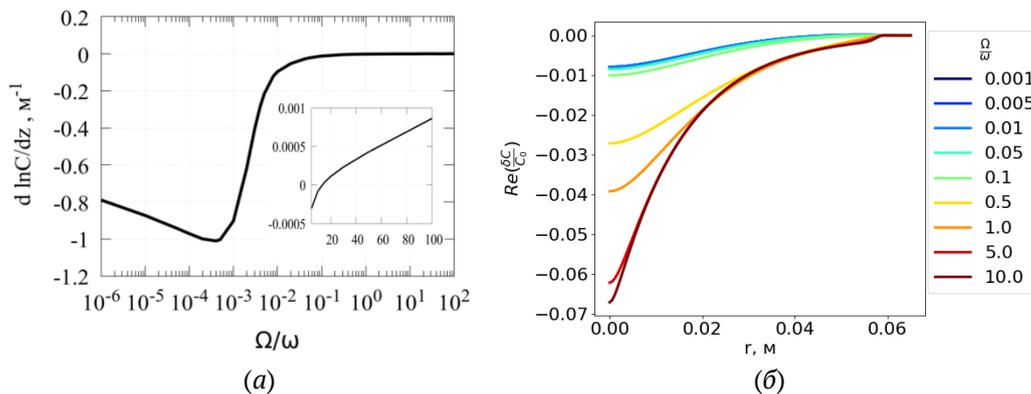


Рис. 3. (а) Средний аксиальный градиент концентрации лёгкого компонента газовой смеси  $\text{UF}_6$  создаваемый возмущением давления акустической волны в зависимости от отношения частоты колебаний волны к частоте вращения ГЦ  $\omega = 2\pi \cdot 1700 \text{ сек}^{-1}$  при амплитуде колебаний  $u/c = 10^{-1}$ ; (б) Возмущение концентрации лёгкого компонента газовой смеси  $\text{UF}_6$   $\delta C$ , создаваемое возмущением давления акустической волны в зависимости от радиальной переменной

На Рис. 2 представлены распределения локально-го аксиального градиента концентрации лёгкого компонента смеси для разных частот волны.

## Заключение

В данной работе проведено исследование разделения газовой смеси акустической волной в сверхсильных центробежных полях, обнаружены новые механизмы, приводящие к разделению, рассмотрен бародиффузионный механизм разделения и получена зависимость разделения от частоты звуковой волны.

## Список литературы

- [1] Богвалов С.В., Кислов В.А., Тронин И.В. Влияние волн на циркуляцию в газовой центрифуге Игуасу // Проблемы математической и теоретической физики и математическое моделирование. 2016. С. 25–27.
- [2] Swift G., Spoor P. Thermal diffusion and mixture separation in the acoustic boundary layer // The Journal of the Acoustical Society of America. 1999. V. 106(4). P. 1794–1800.
- [3] Bogovalov S., Kislov V., Tronin I. Waves in strong centrifugal fields: dissipationless gas // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. 2015. V. 29(1). P. 111–125.
- [4] Bogovalov S., Kislov V., Tronin I. Waves in strong centrifugal field: dissipative gas // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. 2019. V. 33(1). P. 21–35.
- [5] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. ГРФМЛ. 2000. С. 735.