



Волны в сверхсильных центробежных полях

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

НИЯУ МИФИ, Москва

В докладе представлены исследования волновых процессов в газе в сверхсильных центробежных полях, достигающих $10^6 g$. Такие условия реализуются в газовых центрифугах для разделения изотопов. Получен полный спектр волн, состоящий из пяти мод. Обсуждаются связь этих волн с внутренними волнами в гравитационном поле. Есть общие черты и существенные различия. Особый интерес представляют обнаруженные нами чисто акустические волны, продольно поляризованные и распространяющиеся строго вдоль оси вращения во всем диапазоне частот. Плотность энергии этих волн концентрируется вблизи стенок ротора. Эти волны имеют наименьшее затухание по сравнению со всеми остальными типами волн. Даются оценки декремента затухания этих волн. Обсуждается возможное влияние этих волн на динамику газа и на процесс разделения бинарных смесей изотопов в газовых центрифугах.

Генерация волн в газовых центрифугах

Схема газовой центрифуги, используемой для разделения изотопов представлена на Рис. 1 [1]. Она состоит из быстро вращающегося ротора, заполненного газом с атомным весом = 352 а.е. В ротор входит 3 трубки. Одна используется для подачи газа, и две трубки (газоотборники) используются для отбора как обогащенной смеси по целевому компоненту, так и обедненной.

Газ в роторе вращается со скоростью около 800 м/сек. Обсуждаются конструкции со скоростью вращения газа выше 1000 м/сек [2]. При скорости звука в рабочем газе около 87 м/сек мы имеем гиперзвуковое вращение газа с числом Маха выше 7. При

столкновении газа с газоотборниками возникают сильные ударные волны, которые затухая превращаются в волны малой амплитуды, распространяющиеся вдоль ротора. На Рис. 2 показано течение газа в газовой центрифуге, полученное нами в результате трехмерного компьютерного моделирования [3].

Хорошо видно, что генерация волн в газовой центрифуге является неизбежным следствием ее конструкции. Волны генерируются во всех ГЦ, но их роль в динамике газа и в процессе разделения газовой смеси до сих пор не выяснена и это является причиной интереса нашей группы из НИЯУ МИФИ к волновым явлениям в сильном центробежном поле. Волны в ГЦ генерируются и распространяются в весьма экстремальных условиях. Рабочий газ в ГЦ прижат к стенкам ротора центробежным полем с ускорением около $10^6 g$. В результате, газ сосредоточен вблизи стенок ротора в слое толщиной менее 1 см при комнатных температурах. Весь остальной объем заполнен вакуумом. Чудовищное центробежное поле, огромные радиальные гради-

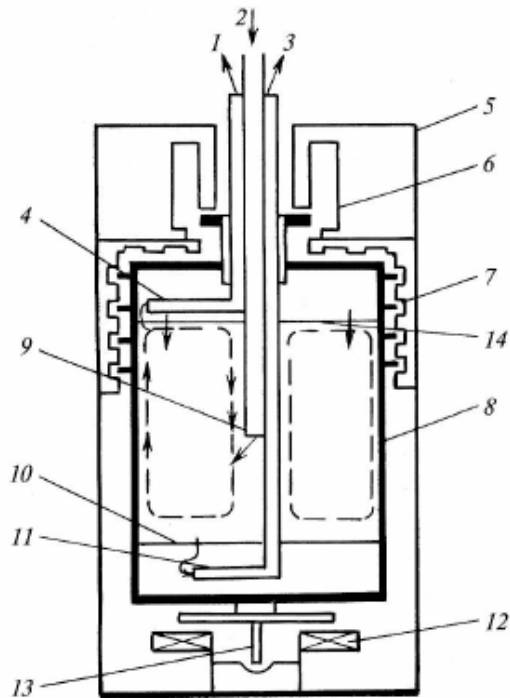


Рис. 1. Схема газовой центрифуги из [1]

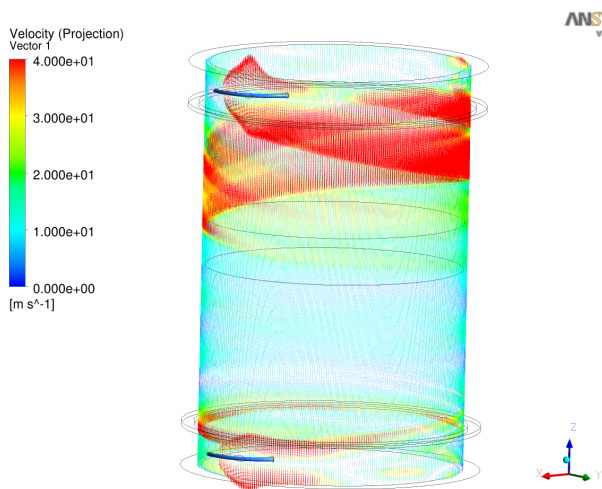


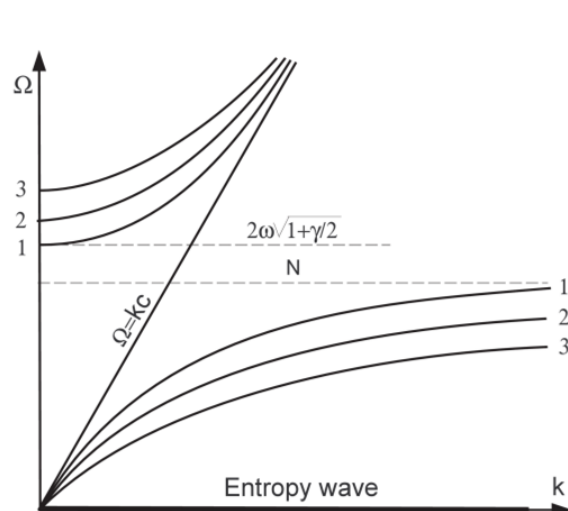
Рис. 2. Распределение проекции скорости газа на ось вращения в ГЦ по результатам компьютерного 3D моделирования [3], показывающего генерацию волн

енты плотности и давления, а также Кориолисовы силы приводят к весьма экзотическим свойствам волн в таких условиях, которые имеют как общие черты с волнами в гравитационных полях, так и существенные отличия.

Волны в приближении идеальной жидкости

В первую очередь нас интересует закон дисперсии волн, которые распространяются в указанных выше условиях. Для этого, нами аналитически была решена задача о динамике возмущений во вращающемся газе в приближении идеальной жидкости [4], а затем были учтены диссипативные процессы [5]. Обнаружено существование 5-ти типов волн. Закон дисперсии этих волн схематически показан на Рис. 3.

Мы разделили все волны на волны верхнего и нижнего семейства в зависимости от их поляризации и закона дисперсии. Волны верхнего семейства лежат выше прямой линии $\Omega = kc$. Волны нижнего семейства, являющиеся аналогом внутренних волн или волн плавучести, расположены ниже этой линии. Новым результатом является обнаружение, что линия $\Omega = kc$ также описывает закон дисперсии реальных волн, которые могут распространяться во вращающемся газе. Это обычные акустические волны с продольной поляризацией, распространяющиеся строго вдоль оси вращения. Существование таких волн не тривиально. На по-

Рис. 3. Закон дисперсии волн в сильном центробежном поле. Волны верхнего семейства лежат на линии $\Omega = kc$ и выше. Волны нижнего семейства лежат ниже этой линии. Энтропийные волны (толстая линия) расположены на оси абсцисс рисунка

верхностный взгляд кажется, что существование таких волн в центробежном поле невозможно. Распространение продольной волны сопровождается изменением плотности газа. При этом меняется сила плавучести и сила инерции элемента жидкости. Неизбежно должна возникать радиальная компонента скорости из-за разбалансировки радиальных сил, а вместе с ней должна возникать азимутальная скорость из-за силы Кориолиса. Но в акустической волне этого не происходит, поскольку температура в волне меняется так, что каждый фрагмент газа остается в равновесии по радиусу. Особенностью этой волны является то, что энергия волны сконцентрирована вблизи стенки ротора, где затухание будет минимальным, а значит волна может распространяться в роторе на довольно большие расстояния. Это представляет интерес для физики разделения изотопов, поскольку такие волны могут управлять медленным аксиальным циркуляционным движением газа.

Интересным является то, что энтропийная волна остается в центробежном поле покоящейся волной в отличие от энтропийной волны в гравитационном поле, где энтропийная волна трансформируется в одну из бегущих волн.

Резюмируя все сказанное, в центробежном поле волны разбиваются на три типа. По две бегущих волны верхнего и нижнего семейств и одна покоящаяся энтропийная волна. Всего 5 типов волн. Акустическая волна относится к верхнему семейству по свойствам поляризации и закону дисперсии. Частоты всех волн верхнего семейства асимптотически приближаются к частоте акустической волны в пределе больших волновых чисел.

Список литературы

- [1] Борисевич В.Д., Борман В.Д., Сулаберидзе Г.А., Тихомиров А.В., Токманцев В.И. Физические основы разделения изотопов в газовой центрифуге // М.: Издательский дом МЭИ. 2011, С. 55.
- [2] Bogovalov S.V., Borman V.D., Tronin I.V., Tronin V.N. Optimized Separative Power of Hyperspeed Iguassu Gas Centrifuge: Dependence on the Rotor Diameter and Velocity // Nuclear science and engineering. 2020. V. 194(12), p. 1105–1115.
- [3] Borman V.D., Bogovalov S.V., Borisevich V.D., Tronin I.V., Tronin V.N. The computer simulation of 3d gas dynamics in a gas centrifuge // Journal of Physics: Conference Series 2016, V.751, p. 012017.
- [4] Bogovalov S.V., Kislov V.A., Tronin I.V. Waves in strong centrifugal fields: dissipationless gas // Theor. Comput. Fluid Dyn. 2015, V.29 (1-2), p.111–125.
- [5] Bogovalov S.V., Kislov V.A., Tronin I.V. Waves in strong centrifugal field: dissipative gas // Theor. Comput. Fluid Dyn. 2019, V.33(1), p. 21–35.