

эффектом и протекает через взаимодействие с диссоциированными атомами азота. Вытеснение более электроотрицательного кислорода молекулярным азотом согласно расчетам изменения термодинамического потенциала ΔG не реализуется даже при достижении температуры плавления оксида алюминия.

Расчетное значение константы скорости каталитической рекомбинации K_w для лейкосапфира в воздушной плазме составило 32 ± 5 м/с, а в среде плазмы азота – всего лишь $7 \pm 1,5$ м/с. Объяснить полученный результат непросто. Можно предположить, что азот рекомбинирует в газовой фазе и поверхность оксида алюминия не контактирует с атомарным азотом. Но тогда в этом случае невозможно обосновать процесс азотирования, который возможен только в случае адсорбции атомарного азота на поверхности оксида алюминия.

Полученные результаты позволяют сделать заключение, что основной вклад в аэрогазодинамический нагрев поверхности лейкосапфира в среде плазмы воздуха обеспечивает 18 об. % кислорода. При этом доля азота в 4 раза выше, чем кислорода, а энергия диссоциации связи азот – азот составляет 942 кДж/моль, что почти в 2 раза выше, чем у связи кислород – кислород – 494 кДж/моль. Тем не менее в потоке диссоциированного азота температура на поверхности лейкосапфира не поднимается выше 1900 °С.

Процесс аэрогазодинамического обтекания поверхности диссоциированным потоком сопровождается абляцией, адсорбцией и абсорбцией. Соответственно, теплофизические свойства поверхности непрерывно изменяются, поэтому квазистационарные условия в процессе эксперимента не реализуются. Это обстоятельство в значительной степени искажает результаты тепловых расчетов и, следовательно, значения величины K_w . Поэтому полученное значение K_w в плазме азота необходимо корректировать с учетом процесса азотирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00352.

Список литературы

- 1 Исследование взаимодействия монокристаллического лейкосапфира с высокоскоростными диссоциированными потоками газов / В. А. Погодин [и др.] // СТИН. – 2023. – № 10. – С. 8–11.
- 2 Исследование скорости каталитической рекомбинации в зависимости от состава плазмообразующего газа / В. А. Погодин [и др.] // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Т. 1 им. А. Г. Горшкова : материалы XXIX Междунар. симпозиума, г. Кремёнки, 15–19 мая 2023 г. – М. : ООО «ТРП», 2023. – С. 172–174.
- 3 Исследование каталитической активности образцов поликристаллических и монокристаллических керамик / А. Н. Астапов // Авиация и космонавтика : тезисы докладов 21 Междунар. конф., Москва, 21–25 ноября 2022 г. – М. : Перо, 2022. – С. 439 – 440.
- 4 Астапов, А. Н. Получение жаростойких покрытий по безобжиговой шликерной технологии / А. Н. Астапов, В. С. Терентьева // Электromеталлургия. – Ч. I. – 2019. – № 3. – С. 24–33. – DOI : 10.31044/1684-5781-2019-0-3-24-33.
- 5 Астапов, А. Н. Получение жаростойких покрытий по безобжиговой шликерной технологии / А. Н. Астапов, В. С. Терентьева // Электromеталлургия. Ч. II – 2019. – № 4. – С. 15–24. DOI : 10.31044/1684-5781-2019-0-4-15-24.

УДК 517.958

К МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСКА НА НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОМ ПОДВЕСЕ С ВЯЗКОЙ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТЬЮ ПРИ ПОЛЗУЩЕМ ЕЕ ДВИЖЕНИИ

В. С. ПОПОВ

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,
Институт проблем точной механики и управления – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского
центра «Саратовский научный центр Российской академии наук»*

А. А. ПОПОВА

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,
Российская Федерация*

В современном транспортном и строительном комплексе широко используются различные технические системы и изделия, в состав которых входят упруго закрепленные жесткие элементы кон-

струкций, взаимодействующие с жидкостью или газом. Поэтому для разработки адекватных математических моделей таких изделий крайне важным являются создание фундаментального задела в области постановки и решения задач аэрогидроупругости [1–3]. Известны работы, в которых рассмотрено взаимодействие несжимаемой вязкой жидкости с упруго закрепленными жесткими стенками каналов [4–7]. В [4] рассмотрен случай линейно-упругого подвеса стенки узкого клиновидного канала при ползущем движении жидкости в нем, а в [5] исследован случай линейно-упруго подвеса торцевой стенки узкого канала с параллельными стенками. Аналогичные задачи для случаев когда упругий подвес имеет кубическую нелинейность рассмотрены в [6, 7]. Известны работы [8, 9] о взаимодействии сжимаемой вязкой жидкости (газа) с жесткими стенками узких каналов. Однако исследования, в которых учитывались нелинейные свойства упругого подвеса стенок таких каналов по литературе источникам неизвестны.

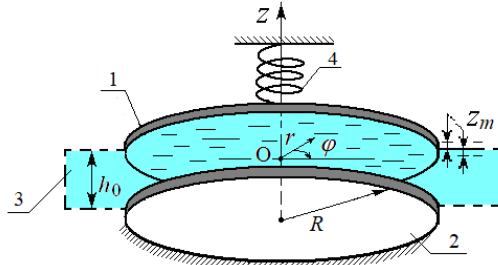


Рисунок 1 – Упруго подвешенный диск, со слоем вязкой сжимаемой жидкости:
1 – диск, имеющий нелинейно-упругий подвес с мягкой кубической нелинейностью;
2 – неподвижный жесткий диск; 3 – пульсирующий слой вязкой сжимаемой жидкости

Рассмотрим упруго подвешенный диск (рисунок 1). Он является верхней стенкой узкого канала радиуса R . Нижняя стенка канала считается абсолютно жесткой и неподвижной. В канале находится вязкая сжимаемая жидкость, движение которой в силу узости канала исследуем как ползущее. На

торце канала задана пульсация давления p_1 на уровне постоянного давления p_0 , принимаемого за начало отсчета. Канал и жидкость в нем находятся в изотермическом состоянии и вязкость жидкости постоянна. В невозмущенном состоянии расстояние между стенками h_0 . Изучаем осесимметричную задачу, вводя цилиндрическую систему координат с началом в центре нижней стенки. Рассматриваем установившиеся нелинейные колебания диска с амплитудой $z_m \ll h_0$.

Уравнение движения диска запишем как [6, 7]

$$m \frac{d^2 z_1}{dt^2} + n_{lin} z_1 - n_{cyb} z_1^3 = -2\pi \int_0^R q_n \Big|_{z=h_0+z_1} r dr, \quad q_n = -p + 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} - \left(\frac{2}{3} \mu - \mu' \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r v_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right). \quad (1)$$

Здесь $z_1 = z_m f(\theta t)$ – закон движения диска, θ , m – характерная частота его нелинейных колебаний и масса; t – время; n_{lin} – коэффициент жесткости линейной составляющей реакции подвеса, n_{cyb} – коэффициент жесткости кубической составляющей реакции подвеса, т. к. рассматриваем мягкую нелинейность, то полагаем $n_{cyb} > 0$; p – давление; v_z – проекция скорости жидкости на ось z ; v_r – проекция скорости жидкости на ось r ; μ , μ' – динамическая и объемная вязкость.

Уравнения динамики вязкой сжимаемой жидкости запишем как [10]

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} \right) + \left(\mu' + \frac{1}{3} \mu \right) \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \left(\mu' + \frac{1}{3} \mu \right) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r p v_r) + \frac{\partial}{\partial z} (p v_z) = 0,$$

граничные условия для (2) имеют вид

$$v_r = 0, \quad v_z = \frac{dz_1}{dt} \quad \text{при} \quad z = h_0 + z_1, \quad (3)$$

$$v_r = 0, \quad v_z = 0 \quad \text{при} \quad z = 0,$$

$$p = p_1(\omega t) \text{ при } r = R, \quad (4)$$

$$p_1 = p_m \sin \omega t,$$

где ρ – плотность жидкости, изменяющаяся по баротропному закону; ω , p_m – частота и амплитуда пульсации давления на торце.

Сформулированная математическая модель (1)–(4) исследовалась методом возмущений. Асимптотический анализ дал линеаризованную задачу динамики жидкости и из ее решения методом итераций [6] найден закон изменения давления. После этого решалось уравнение (1) методом гармонического баланса и определены основной нелинейный отклик диска и соответствующая ему фазовая характеристика. Эти характеристики представляют собой неявные функции амплитуды и частоты колебаний, но их возможно исследовать численно по аналогии с [6, 7].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание по теме 122030100145-3).

Список литературы

- 1 Аэрогидроупругость конструкций / А. Г. Горшков [и др.]. – М. : Физматлит, 2000. – 592 с.
- 2 Вельмисов, П. А. Об одном классе начально-краевых задач в аэрогидроупругости / П. А. Вельмисов, Ю. А. Тамарова, Ю. В. Покладова // Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры. – 2022. – Т. 204. – С. 16–26.
- 3 Païdoussis M. P. Fluid-structure Interactions: Cross-Flow-Induced Instabilities. New York: Cambridge University Press, 2010. – 414 p.
- 4 Могилевич, Л. И. Продольные и поперечные колебания упругозакрепленной стенки клиновидного канала, установленного на вибрирующем основании / Л. И. Могилевич, В. С. Попов, А. А. Попова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 3. – С. 28–36.
- 5 Попов, В. С. Моделирование взаимодействия стенки канала с упругозакрепленным торцевым уплотнением / В. С. Попов, А. А. Попова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2020. – Т. 12. – № 2. – С. 387–400.
- 6 Попов, В. С. Моделирование гидроупругих колебаний стенки канала, имеющей нелинейно-упругую опору / В. С. Попов, А. А. Попова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2022. – Т. 14. – № 1. – С. 79–92.
- 7 Modeling nonlinear hydroelastic response for the endwall of the plane channel due to its upper-wall vibrations / M. Barulina [et al.] // Mathematics. – 2022. – Vol. 10. – Art. no. 3844.
- 8 Константиnescу, В. Н. Газовая смазка / В. Н. Константиnescу. – М. : Машиностроение, 1968. – 718 с.
- 9 Турчак, Л. И. Математическое моделирование проблем газовой смазки / Л. И. Турчак, В. П. Шидловский // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2011. – Т. 51. – № 2. – С. 329–348.
- 10 Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.

УДК 517.958

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛОЯ ВЯЗКОГО ГАЗА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В УЗКОЙ ЩЕЛИ, С ЕЕ СТЕНКОЙ, ИМЕЮЩЕЙ ПОДВЕС С МЯГКОЙ КУБИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

В. С. ПОПОВ, М. В. ПОПОВА, Д. В. КОНДРАТОВ Т. С. КОНДРАТОВА
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,
Российская Федерация

При разработке и исследовании различных изделий современного транспортного комплекса, включающих в свой состав жесткие элементы с упругими связями или упругоподатливые элементы, контактирующие с жидкостью или газом, требуется привлечение подходов теории гидроаэроупругости [1, 2]. Например, с такими ситуациями приходится сталкиваться в демпферах колебаний, датчиках гидросистем, гидро- и газоопорах [3, 4]. В [5] исследовано взаимодействие несжимаемой вязкой жидкости в узком клиновидном канале с его жесткой стенкой на линейно-упругом подвесе. В [6, 7] разработаны модели взаимодействия вязкой несжимаемой жидкости с торцевой [6] и нижней [7] стенками, имеющими линейно-упругий подвес, узкой щели, которую она заполняет. В [8, 9] рассмотрены аналогичные задачи, когда стенка канала имеет подвес с кубической нелинейностью [8] или представляет собой пластину на нелинейно-упругом основании [9]. Однако в работах, которые указаны выше за рамками исследований, остался случай сжимаемого вязкого газа, взаимодействующего нелинейно-упругозакрепленной стенкой канала.