

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАЗВУКОВОГО БУРА С БИЕНИЯМИ ДЛЯ ПЛАНЕТАРНОГО БУРЕНИЯ ГРУНТА

С.Г. Некрасов¹, nekrasovsg@susu.ru

С.В. Перминов², info@medpribor.net

А.А. Малозёмов¹, malozemovaa@susu.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² АО «Медприбор», Челябинск, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются практические и теоретические вопросы улучшения эксплуатационных характеристик ультразвукового бура для проведения планетарного бурения грунта на небесных телах. Особенность конструкции бура заключается в наличии взаимосвязанных зон трения между его сопряженными элементами, при этом в зависимости от условий эксплуатации один вид трения может переходить в другой, меняя параметры его работы, например, частотный диапазон биений рабочего инструмента. Цель работы состоит в исследовании трибологических свойств ультразвукового бура и оценки их влияния на эксплуатационные характеристики устройства, включая частотные характеристики.

Рассмотрены технические решения как отечественных, так и зарубежных авторов, выбран прототип. Проведен анализ работ по исследованию ультразвукового бура и выявлено, что изложенные в них материалы не содержат сведений о его трибологических свойствах. В теоретической части данной статьи использованы математические модели, основанные на положениях гидродинамической теории смазки подшипников скольжения, виброореологических закономерностях поведения тел трения. Используются методы математической физики, гидромеханики, классической механики и теории подобия.

Результаты заключаются в том, что представлены трибологические характеристики ультразвукового бура, из которых также видны его частотные характеристики. Показано, что конструкция ультразвукового бура, по сути, не отличается от конструкции вибронесущего газового подвеса, при этом их частотные диапазоны работы примыкают друг к другу. Проведено параметрическое исследование и получены интегральные трибологические характеристики устройства. Показано, что частотный параметр (критерий подобия задачи) позволяет определить частотную границу между режимами биений и подвеса через параметры среды в слое – плотность, вязкость, частота вибрации и другие. Предложено аналитическое условие перехода от режима подвеса к режиму биений рабочего тела, которое существенно зависит от формы колебаний рабочего наконечника. Исследована равномерная, зонтичная и форма колебаний с одной узловой окружностью Т-образного наконечника, показывающая эффективность зонтичных колебаний.

В модель подвеса введена характеристика газосодержания, непрерывно описывающая состояние среды от жидкости до чистого газа. Влияние атмосферы планеты учитывается через параметр газосодержания, учет которого в расчетах показывает, что при увеличении жидкой составляющей интегральные характеристики и частотный параметр подвеса существенно возрастают, тем самым, оказывая влияние и на характеристики работы бура.

Ключевые слова: ультразвук, концентратор колебаний, бурение, биение тела, атмосфера планеты, трение, виброопора, форма колебаний, подвес

Для цитирования: Некрасов С.Г., Перминов С.В., Малозёмов А.А. Трибологические свойства ультразвукового бура с биениями для планетарного бурения грунта // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2026. Т. 26, № 3. С. 30–44. DOI: 10.14529/engin260303

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF AN ULTRASONIC DRILL WITH BEATING FOR PLANETARY SOIL DRILLING

S.G. Nekrasov¹, nekrasovsg@susu.ru
S.V. Perminov², info@medpribor.net
A.A. Malozemov¹, malozemovaa@susu.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Medpribor, JSC, Chelyabinsk, Russia

Abstract. This article examines practical and theoretical issues regarding the improvement of the operational characteristics of an ultrasonic drill designed for planetary soil drilling on celestial bodies. A distinctive feature of the drill's design is the presence of interconnected friction zones between its mating elements; depending on operating conditions, one type of friction can transition into another, thereby altering operational parameters – such as the frequency range of the working tool's oscillations (beating). The study aims to investigate the tribological properties of the ultrasonic drill and assess their impact on the device's operational performance, including its frequency characteristics.

Technical solutions proposed by both domestic and foreign authors were reviewed, and a prototype was selected. An analysis of existing research on ultrasonic drills revealed a lack of data regarding their tribological properties. The theoretical section of the article employs mathematical models based on the hydrodynamic theory of sliding-bearing lubrication and the vibro-rheological behavior of friction bodies. Methods from mathematical physics, fluid mechanics, classical mechanics, and similarity theory were utilized.

The study presents the tribological characteristics of the ultrasonic drill, which also reveal its frequency characteristics. It is demonstrated that the design of the ultrasonic drill is essentially identical to that of a vibration-supported gas suspension system, with their operating frequency ranges lying in close proximity. A parametric study was conducted to derive the device's integral tribological characteristics. It is shown that a frequency parameter (a similarity criterion for the problem) allows for the determination of the frequency boundary between the suspension and beating regimes based on medium parameters within the layer – such as density, viscosity, and vibration frequency. An analytical condition is proposed for the transition from the suspension regime to the working body's beating regime; this condition depends significantly on the vibration mode of the working tip. The uniform, umbrella-like, and single-nodal-circle vibration modes of a T-shaped tip have been investigated, demonstrating the effectiveness of umbrella-like vibrations.

A gas content characteristic – continuously describing the medium's state from liquid to pure gas – has been incorporated into the suspension model. The influence of the planetary atmosphere is accounted for via this gas content parameter; calculations show that as the liquid component increases, the suspension's integral characteristics and frequency parameter rise significantly, thereby affecting the drill's operating performance.

Keywords: ultrasound, vibration concentrator, drilling, body beating, planetary atmosphere, friction, vibration support, vibration mode, suspension

For citation: Nekrasov S.G., Perminov S.V., Malozemov A.A. Tribological properties of an ultrasonic drill with beating for planetary soil drilling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2026:26(3):30–44. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin260303

Введение

Данная работа касается конструкции ультразвукового (УЗ) бура (рис. 1, патент US 7156189 B1 [1]), выбранного в этой работе прототипом, которая является развитием ряда патентов, например патента US 6968910 B2 [2]. В этом патенте используется два свободных тела 11 и 9 (см. рис. 1), осуществляющих биения по биты 15, контактирующему с грунтом, причем при наличии осевого пригруза в положительном направлении бурения D1 работает одно свободное тело

11, контактирующее с концом (Т-образный наконечник) УЗ волновода 7 и забивающее буровой бит 15 в грунт, а при небольшом вытягивающем усилии на буровую головку начинает действовать свободное тело 9, выбивающее буровой бит из грунта (см. описание патента).

Данная конструкция представляет собой, по сути, комбинацию взаимосвязанных зон трения между, например, УЗ волноводом-концентратором (ВК) 7 и направляющей бита 15, имеющих большую протяженность. Кроме того, упругое пуассоновское взаимодействие колебаний волновода 7 в осевом и радиальном направлении приведет к появлению радиальных колебаний. Все это снижает «эффективный коэффициент трения при вибрации» между сопряженными поверхностями, приводит к притирке и в дальнейшем к частичному износу контактирующих поверхностей, что изменит трибологические свойства бура.

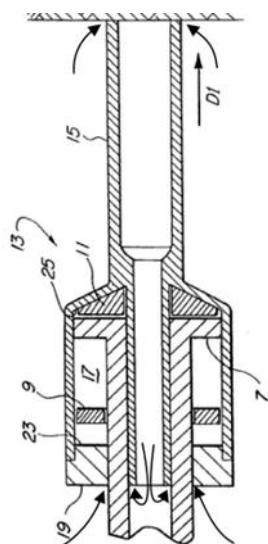


Рис. 1. Конструктивная схема бурового бита по патенту US 7156189 B1

Fig. 1. Design diagram of a drill bit according to US patent 7156189 B1

При некотором значении частоты вибрации и других параметров будут созданы условия для появления газового слоя [3] как между боковыми поверхностями направляющей бита 15 и волноводом 7 (без вращения их поверхностей), так и между торцовыми поверхностями наконечника ВК и свободными телами 9 и 11. Дело в том, что с ростом частоты колебаний ВК возрастают силы вязкого трения, останавливающие поперечное движение среды в зазоре между наконечником ВК и свободным телом, в то время как в направлении нормальном зазору среда периодически сжимается (поршневой эффект). В результате это приводит к появлению сжимаемой газовой пленки и, как следствие, левитации свободного тела.

Проведенный анализ литературных источников показывает, что трибологические свойства конструкции бура не исследованы как в работах зарубежных, так отечественных авторов. Однако понимание трибологических свойств данного устройства, когда оно находится в сложнейших условиях эксплуатации за миллионы километров от Земли, при этом биение свободного тела может перейти в его левитацию, а недостаточное трение о грунт может вызвать неуравновешенный отскок бура, делает поставленную в статье задачу актуальной. Этот вывод подтверждает, на наш взгляд, неудачу с бурением миссии InSight, которая была

направлена на изучение теплового состояния марсианских недр, в процессе которой бур столкнулся со слоем дюрикрата [4] – пластом сцементированного песка, что вызывало его увеличенный

отскок из-за недостатка трения о стенки скважины.

Чтобы уравновесить отдачу, была использована роботизированная рука (Instrument Deployment Arm, рис. 2), которая помогла заглубить бур на глубину ниже уровня грунта на 2–3 см, и далее ее возможности закончились.

Следует отметить, что в устройстве бура миссии InSight привод выполнен уже на двигателе постоянного тока [5–7], но это не говорит о том, что возможности пьезопривода исчерпаны, а лишь говорит о том, что процессы в этом устройстве гораздо сложнее, чем в двигателе постоянного тока. Об этом мы и говорим в данной работе.

Отдельно стоит задача о предсказании поведения подобных устройств на других небесных телах, таких как состоящая из углекислого газа плотная атмосфера Венеры. Условия для биений свободных тел будут разными на Земле, Марсе, Меркурии и особенно в атмосфере Ве-

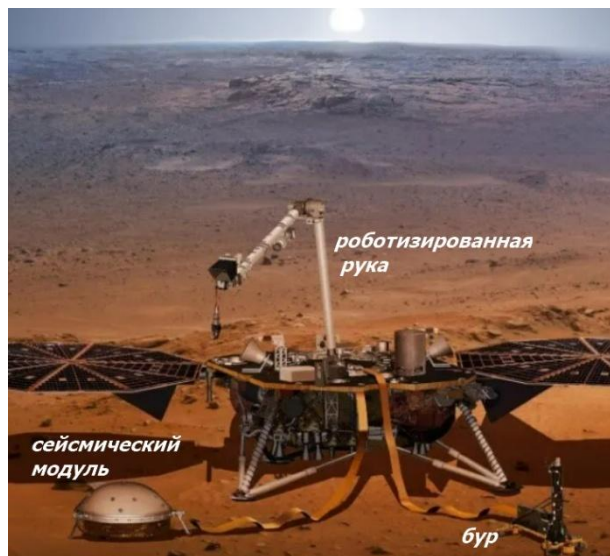


Рис. 2. Ультразвуковой бур миссии InSight на Марсе: аппарат InSight развернут на Марсе (NASA)

Fig. 2. NASA's InSight mission's ultrasonic drill on Mars: InSight lander deployed on Mars (NASA)

неры, при этом надо иметь в виду, что изолировать полностью от внешней среды элементы конструкции бура невозможно из-за самого принципа его работы, связанного с подвижным характером сопряжений (см. стрелки для связи с атмосферой на рис. 1) и долгого времени бурения.

1. Об эффективных коэффициентах сухого трения при вибрационном воздействии и других виброэффектах (обзор)

Прежде чем сделать небольшой обзор по касающейся этой тематики литературе, нам необходимо ввести в рассмотрение некоторые простые определения. Проще всего это сделать на модели трения твердого тела на плоскости при вибрационном воздействии на него [8].

Если твердое тело прижато к шероховатой плоскости силой N и на него вдоль плоскости (рис. 3) действует сила S , а также продольная гармоническая сила $\Phi = \Phi_0 \sin \omega t$, тогда для того чтобы тело начало двигаться, необходима сила $S = f_1 N - \Phi_0$ (f_1 – коэффициент трения покоя), и будет казаться, что коэффициент трения покоя по отношению к медленной силе S уменьшился, приняв значение

$$f_1^{\parallel} = \frac{S^{\parallel}}{N} = f_1 \left(1 - \frac{\Phi_0}{N}\right). \quad (1)$$

Аналогично при действии силы Φ перпендикулярно плоскости, для того чтобы тело начало двигаться вдоль плоскости, необходимо чтобы $S = f_1(N - \Phi_0)$, и эффективный коэффициент трения покоя будет равен

$$f_1^{\perp} = \frac{S^{\perp}}{N} = f_1 \left(1 - \frac{\Phi_0}{f_1 N}\right) = f_1 \left(1 - \frac{w}{f_1}\right), \quad (2)$$

где $w = \Phi_0/N$ – коэффициент перегрузки.

Формулы справедливы и в случае, когда плоскость совершает вибрацию, при этом

$$w = m A \omega^2 / N \quad \text{или} \quad w = A \omega^2 / g \quad \text{при} \quad N = mg. \quad (3)$$

Коэффициенты в формулах (1), (2), называемые *эффективными коэффициентами трения*

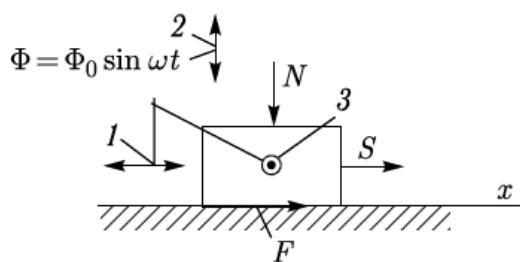


Рис. 3. Схема взаимодействия тела на плоскости [8]
с внешними силами

Fig. 3. Diagram of interaction of a body on a plane [8]
with external forces

при вибрации [8], справедливы до тех пор, пока они положительны, а при больших значениях параметра перегрузки w происходит уже изменение характера сил трения. Если, наконец, коэффициент трения стал равен нулю, то это можно интерпретировать, например так, что тело левитирует относительно поверхности.

Применительно к конструкции бура на рис. 1 такое явление проявляется в том, что внутренняя боковая поверхность концентратора 7 становится смазанной (псевдооживление поверхности) от действия продольной вибрации и вибрации, направленной перпендикулярно боковой поверхности за счет пуассоновской связи. Аналогичная

картина будет наблюдаться и на поверхности наконечника 7 волновода-концентратора (ВК) с вибрацией, перпендикулярной поверхности свободного тела 11 (см. рис. 1). При этом первое, что делает свободное тело с ростом амплитуды колебаний при выполнении условия $w = 0$, – это не биение, а это левитация над поверхностью концентратора. Реализуется вибронесущая газовая опора (ВНГО).

Существует множество работ по этой теме, начиная с работ С.А. Шейнберга [9], В.Н. Константиnescу [3], С.Н. Пэна [10], А.Г. Бургвица и Г.А. Завьялова [11], давших теоретическое и экспериментальное обоснование этого направления, и кончая работами С.Г. Дадаева и В.А. Биушкина [12], Р.-М.В. Канапеноса [13], Л.А. Поляковой и П.Е. Молотова [14], Н.А. Пашниной [15], касающимися вопросов динамики вибронесущих опор, влияния неравномерности форм колебаний, изучения расхода газа в зазоре, в осевых капиллярах и др.

Ультразвуковыми полуволновыми концентраторами для создания ВНГО начали заниматься не очень давно из-за их малой площади активной поверхности и, предположительно, малой несущей способности, и связано это направление было в основном с потребностями медицины. Первое успешное применение ультразвукового концентратора для создания ВНГО отражено в

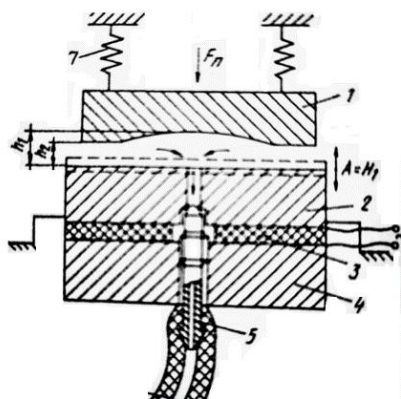


Рис. 4. Конструктивная схема
ультразвукового компрессора
по патенту RU 2121612 C1

Fig. 4. Structural diagram of an ultra-
sonic compressor according
to patent RU 2121612 C1

патенте RU 2121612 C1. Здесь свободное тело 1 на подпружиненном подвесе было профилировано небольшой выемкой в средней части зазора (рис. 4), параметры которой были количественно определены в патенте. За счет выемки осуществлялось неравномерное сдавливание газового слоя и в зазоре образовывался перепад давлений с градиентом от периферии к центру, а следовательно, и расход газа в этом же направлении. Нетрудно видеть, что конструкции подвеса свободных тел 11 на рис. 1 и 1 на рис. 4 полностью совпадают, но работают они в разных режимах – режиме биения и режиме левитации тела соответственно.

На базе такой же конструкции было реализовано устройст-

во для создания биений алюминиевого твердого тела, размещенного основанием в окрестности узловой плоскости, которое касалось края концевой массы 2 «условного» концентратора 2, 3, 4 (см. рис. 4) и использовалось для разбрызгивания медицинского раствора. Данная установка не пошла в серий-

ное производство ЗАО НПО «Медприбор» из-за своей невысокой надежности и отсутствия медицинского эффекта при низкочастотной кавитации жидкости, а вот компрессор до сих пор используется из-за своей бесшумности, малых габаритов и сравнительно высокой производительности.

Необходимо отметить труды сотрудников ЗАО НПО «Медприбор» (с 2017 года АО «Медприбор») В.И. Поклонского (руководитель), С.В. Перминова (главный инженер, ведущий конструктор), С.Г. Некрасова (заместитель по научной работе), А.С. Кислова (инженер-конструктор), приложивших много усилий для разработки, запуска в серийное производство новых образцов надежной ультразвуковой техники и вывода данных изделий на рынок.

Идея использования биений свободного тела с использованием пьезокерамического привода как наименее энергоемкого при бурении планетарного грунта появилась на рубеже 2000 годов и была связана с миссиями на Марс [16]. После завершения миссии InSight наметилась новая тенденция в поиске более эффективных решений как на основе пьезопривода [17], так и других видов двигателей и рабочего инструмента [18]. В частности, в работе [17] представлена разработка нового ультразвукового бура с использованием гибридного режима продольных колебаний и изгиба, что существенно повышает его производительность. В статье [18] показаны результаты моделирования силового режущего диска в составе «горной» пилы для захвата и отбора проб при исследовании астероидов. Меняется по разным причинам и объект исследования – Луна [19], что, в частности, удовлетворяет требованиям экономичности планируемых полетов. В этой же статье [19] рассмотрено новое ультразвуковое продольно-сдвиговое колебание инструмента для лунного грунта на ледяных полюсах спутника.

2. Необходимые теоретические сведения и постановка задачи

Здесь мы рассмотрим трибологические свойства бура на рис. 1 не в режиме биений, а при левитации свободного тела над поверхностью наконечника ВК. Учитывая, что, как уже говорилось выше, конструкции подвеса свободного тела в обоих режимах одинаковы, надо найти условия перехода из одного режима в другой, чтобы с его помощью устранить нарушение работоспособности бура при непредвиденном переходе в режим левитации.

Чтобы описать трибологические свойства бура и, в частности, его газового слоя при левитации, нам необходимо ввести некоторые положения и допущения, чтобы ограничить тем самым пространство обсуждаемых здесь величин. Полагаем, что зазор между свободным телом и наконечником ВК достаточно тонкий, чтобы в рассмотрении можно было ограничиться малыми числами Рейнольдса и плоским течением двухфазной среды. Приняты также допущения, обычные для теории гидродинамической смазки подшипников скольжения [3, 10, 11], в частности, пренебрегаем массовыми и инерционными силами, эффектом взаимодействия между вязкостью и сжимаемостью. Тогда уравнения движения Прандтля можно использовать в усеченной форме уравнений Рейнольдса.

Рассмотрение уравнений Рейнольдса совместно с уравнением неразрывности приводит нас уже к другой задаче – решению нелинейного уравнения для газовой смазки, которая в частных случаях не составляет численной проблемы и решается, например, методом «прогонки». Однако в общем случае требуется или использование специализированных пакетов программ, или, как в нашем случае, собственная разработка, так как зазор является переменной функцией координат и времени, что делает численную задачу трехточечной системой уравнений с переменными коэффициентами. Это требует исследования сходимости задачи, чтобы обеспечить затем настройку параметров численной модели, которая решается на установление переходного процесса (выбор шагов по времени и координатам, выбор параметров интерполяции, введение в модель искусственной вязкости и др.) для каждого варианта исследования. Использован интегро-интерполяционный метод (конечных объемов), подробно останавливаться на котором, с учетом целей данной статьи, нет смысла [15].

Для описания двухфазной газожидкостной среды можно использовать следующие феноменологические зависимости:

– плотность среды

$$\rho = \rho_1 + \alpha_1(\rho_0 - \rho_1), \quad (4)$$

где ρ_0 и ρ_1 – плотности газа и жидкости;

– вязкость среды

$$\mu = \mu_1 + \alpha_2(\mu_0 - \mu_1), \quad (5)$$

где μ_0 и μ_1 – вязкости газа и жидкости;

– зависимость между плотностью и давлением P

$$\rho = kP^{\alpha_3}, \quad (6)$$

где α_1 , α_2 , α_3 – параметры газосодержания, близкие друг другу ($\approx \alpha$) и определенные в каждом случае по данным эксперимента. Представленные зависимости описывают непрерывным образом состояние среды от жидкости ($\alpha > 0$) до газа ($\alpha = 1$).

Условием образования «поршневого» эффекта и газового слоя в зазоре является значение частотного параметра Λ_ν (параметр сжимаемости) [3, 10, 11]:

$$\Lambda_\nu = \frac{12\mu\nu_0 R^2}{P_0 \delta^2} \geq 10, \quad (7)$$

где μ – динамическая вязкость слоя (5), ν_0 – номинальная частота колебаний волновода-концентратора, R – характерный поперечный размер (радиус) наконечника, P_0 – окружающее давление, δ – номинальная величина зазора между свободным телом и наконечником при подвесе тела на газовом слое.

Нас будут интересовать статические и динамические характеристики слоя газа при осесимметричной вибрации, возникающие при воздействии свободного тела на наконечник ВК. Статические характеристики:

$$F_z = \frac{\Phi_z}{\pi P_0 (R_2^2 - R_1^2)} = \frac{2}{1 - \chi^2} \left(\int_\chi^1 \bar{P}_0(r) r dr - z \int_\chi^1 \bar{P}_z(r) r dr \right). \quad (8)$$

Обозначим

$$F_{z0} = \frac{2}{1 - \chi^2} \int_\chi^1 \bar{P}_0 r dr \quad (9)$$

– безразмерная несущая способность при номинальном зазоре δ ;

$$C_z = \frac{2}{1 - \chi^2} \int_\chi^1 \bar{P}_z r dr \quad (10)$$

– осевая жесткость двухфазного слоя, характеризующая изменение несущей способности при изменении зазора на малую величину z . Здесь Φ_z – сила, действующая со стороны свободного тела, R_1 и R_2 – внешний и внутренний радиус (радиус отверстия R_2 совпадает с радиусом нако-

нечника ВК УЗ бура); $\bar{P}_0 = P/P_0$ и $\bar{P}_z = P_z/P_0$ – безразмерные давления в слое, $\chi = R_2/R_1$, $r = r^*/R_1$ (r^* и θ – полярные координаты на поверхности наконечника ВК).

Реакция слоя является периодической функцией времени, которая может быть представлена тригонометрическим рядом Фурье с частотами, кратными резонансной частоте ВК. Тогда нулевой член разложения функции давления определяет несущую способность газового слоя.

Определяющее значение имеет также первый член разложения – синхронная реакция смазочного слоя. Она может быть представлена в виде суммы синфазной P_c и квадратурной P_k составляющих давлений:

$$\tilde{P}(r, \tau) = [P_c(r) + jP_k(r)] \cos \tau, \quad (11)$$

где

$$P_c(r) = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} P(r, \tau) \cos \tau d\tau, \quad P_k(r) = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} P(r, \tau) \sin \tau d\tau, \quad (12)$$

причем синфазная составляющая синхронной реакции является, по сути, упругой восстанавливающей силой F_c на ВК со стороны газового слоя. Квадратурная составляющая определяет силу F_k , демпфирующую колебания ВК. На больших частотах демпфирующая реакция слоя мала и может проявляться только в краевых зонах, однако вопрос о том, следует или не следует пренебрегать квадратурной составляющей давлений, должен решаться при сопоставлении с диссипативными факторами ВК при решении упруго-гидродинамической (УГД) задачи. Для высокочастотных ВК квадратурная составляющая давлений может определять как статическое, так и динамическое поведение свободного тела как при левитации, так и при его биениях.

Будем определять знак синфазной и квадратурной составляющей давлений, исходя из энергетических соображений, и, в частности, будем считать их положительными, если они совпадают со знаком прогиба, и наоборот:

$$F_c = \frac{2}{1 - \chi^2} \int_0^1 P_c(r) \text{sign}[w_0(\bar{r})] r dr, \quad F_k = \frac{2}{1 - \chi^2} \int_0^1 P_k(r) \text{sign}[w_0(\bar{r})] r dr, \quad (13)$$

где $w_0(\bar{r})$ – функция, определяющая форму колебаний поверхности наконечника, при этом безразмерная функция зазора приближенно описывается следующим образом:

$$H(r, \tau) = 1 + z + r\gamma \cos \theta + [A_1 \cos(\bar{r}) + A_2] \cos \tau = 1 + z + r\gamma \cos \theta + w_0(\bar{r}) \cos(\tau), \quad (14)$$

где $z = z^*/\delta$, $\gamma = \gamma^*/(R_2\delta)$, $w_0 = w_0^*/\delta$, $A_2 = A_2^*/\delta$, $A_1 = A_1^*/\delta$, $\tau = \nu t$ – безразмерное время, ν – круговая частота, $r = r^*/R_2$, а переменные, помеченные звездочкой здесь и выше, представляют собой аналогичные безразмерным уже размерные величины (рис. 5), угловой перекося свободного тела далее не будем рассматривать из-за конструктивных ограничений на него (см. рис. 1). A_1 и A_2 – безразмерные амплитуды, описывающие форму осесимметричных колебаний поверхности диска.

В качестве осесимметричных форм колебаний обычно используются плоская вибрация, «зонтичные» колебания (диски средней толщины) и тонкие диски, имеющие осесимметричную форму колебаний с одной и более узловыми окружностями. В соответствии с вышеуказанными случаями приближенно выразим вспомогательные амплитуды A_1 и A_2 через значения безразмерных краевых амплитуд H_1 и H_2 :

$$\begin{aligned} A_1 &= 0, A_2 = H_2, \text{ при } N = 1; \\ A_1 &= H_1 - H_2, A_2 = H_2, \text{ при } N = 2; \\ A_1 &= 0,5(H_1 - H_2), A_2 = 0,5(H_1 + H_2), \text{ при } N = 3. \end{aligned} \quad (15)$$

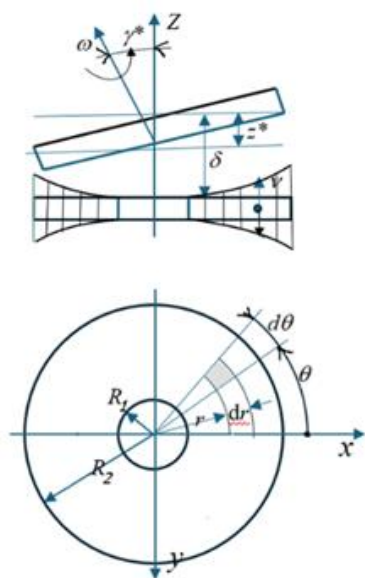


Рис. 5. Геометрические параметры зазора опоры

Fig. 5. Geometric parameters of the support gap

Для аналитического описания таких колебаний введен также безразмерный радиус по формуле

$$\bar{r} = \frac{(r^* - R_1)}{(R_2 - R_1)} \frac{\pi}{2} (N - 1), N = 1, 2, 3. \quad (16)$$

Уточним, что H_1 – амплитуда колебаний в центре диска при $r^* = R_1$, а H_2 – амплитуда колебаний на периферии диска при $r^* = R_2$, $r^* \in [R_1, R_2]$.

Требуется определить частотные свойства подвеса свободного тела как зависимости положения асимптотической границы вышеуказанных статических и динамических характеристик от частотного параметра Λ_v .

3. Результаты расчетов

Рассмотрим сначала статическую реакцию газового слоя на внешнюю нагрузку.

Были численно получены интегральные характеристики газового слоя с равномерными колебаниями (плоская вибрация наконечника) и с осесимметричными формами колебаний, определяемые выражениями (15) при $N = 2$ и $N = 3$. Зависимости несущей способности подвеса с газовым слоем от частотного параметра Λ_v представлены на рис. 6 для форм колебаний с равномерным сдавливанием слоя (кривая 1 при $N = 1$ и $H_2 = 0,5$), зонтичная форма колебаний (кривая 2 при $N = 2$ с краевыми амплитудами $H_1 = 0$ и $H_2 = 0,5$) и одной узловой окружностью (кривая 3 при $N = 3$, $H_1 = H_2 = 0,5$) (рис. 6).

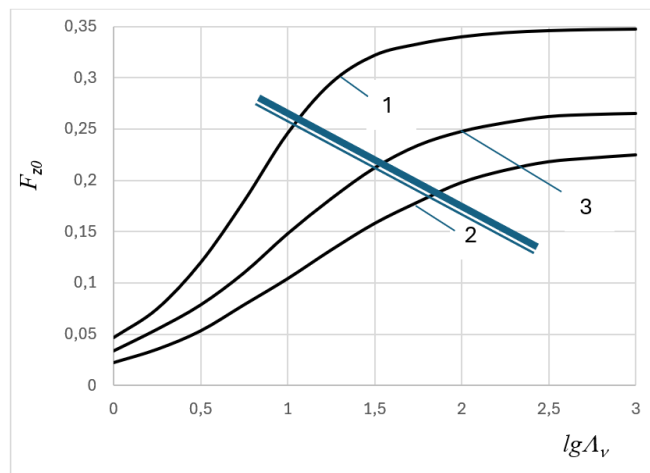


Рис. 6. Зависимость для форм колебаний:
1 – при $N = 1$ и $H_2 = 0,5$; 2 – при $N = 2$ с $H_1 = 0$ и $H_2 = 0,5$;
3 – при $N = 3$, $H_1 = H_2 = 0,5$

Fig. 6. Dependence for vibration modes: 1 – for $N = 1$
and $H_2 = 0,5$; 2 – for $N = 2$ with $H_1 = 0$ and $H_2 = 0,5$;
3 – for $N = 3$, $H_1 = H_2 = 0,5$

При равных краевых амплитудах $H_2 = 0,5$ (кривые 1 и 2) несущая способность слоя при зонтичной форме колебаний в полтора раза меньше, чем у опоры с равномерной формой колебаний (здесь не учитывается вибрация основания, т. е. наконечника ВК). Кроме того, для кривой 2 выход в зону асимптотического насыщения происходит при значениях частотного параметра в 2 раза больших, чем в случае равномерного сдавливания слоя. Затянутый выход в зону насыщения наблюдается и для других сложных форм колебаний, при этом с усложнением формы колебаний (кривая 3) величина несущей способности несколько увеличивается. Это говорит о том, что статические характеристики существенно зависят от Λ_v при разных формах колебаний. Двойная линия определяет границу асимптотического поведения подвеса в зависимости от частотного параметра Λ_v .

Физическая интерпретация этого эффекта в том, что неравномерное распределение амплитуд колебаний приводит к тому, что эквивалентная площадь опорной поверхности в 1,5...2 раза меньше реальной площади, а значит, уменьшается ее эквивалентный радиус. Поэтому примерно в полтора–два раза падает несущая способность слоя и уменьшается фактическая величина Λ_v , которая пропорциональна квадрату радиуса наконечника ВК.

На рис. 7 представлены характеристики собственных форм колебаний наконечника концентратора ВК, рассчитанного на частоту 27 500 Гц с начальным радиусом наконечника 2 мм и радиусом отверстия $\chi = 1$ мм. В зависимости от увеличения добавочного радиуса dR , при постоянной толщине $dh = 1$ мм, частота собственных колебаний падает, а краевые безразмерные амплитуды H_1 и H_2 одновременно растут до значений $dR = 3,5$ мм, при этом основной рост наблюдается у амплитуды H_2 . Зонтичные формы наблюдаются до $dR = 5,5$ мм и частоты 18 500 Гц, после которой зонтичная форма переходит в форму с меридианными узловыми линиями на частотах 8500 Гц и ниже без образования осесимметричных форм. Других форм колебаний в указанном

диапазоне частот не выявлено. Такой переход связан с тем, что концентратор с ростом dR удаляется от своей начальной частоты, вибрирует уже на комбинационных частотах и, в конце концов, «повисает» в полюсе диска достаточно тяжелым грузом, чтобы обеспечить там принудительное наличие узла колебаний.

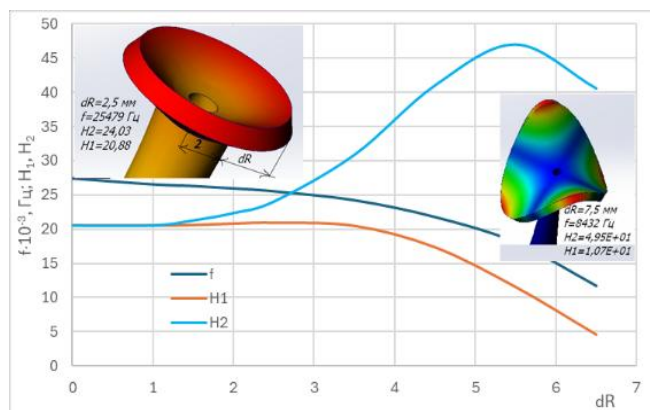


Рис. 7. Характеристики зонтичных форм колебаний наконечника волновода-концентратора

Fig. 7. Characteristics of umbrella-shaped oscillation modes of the waveguide concentrator tip

несущая способность в случае открытого центра падает с величины 0,309 до 0,247 при той же амплитуде вибрации на краю и в центре и следует ожидать расширение по частоте зоны биений (см. рис. 6).

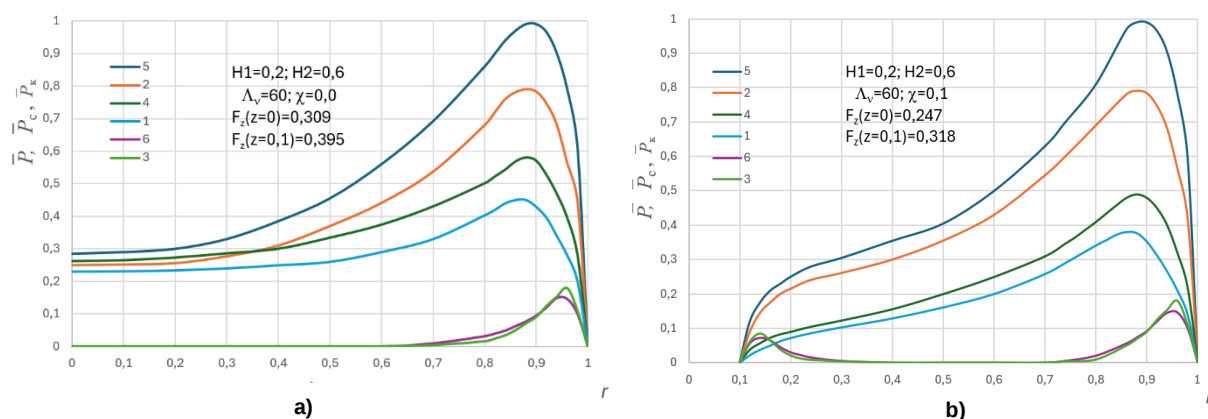


Рис. 8. Распределение средних за период колебаний давлений в зазоре подвеса при зонтичной форме колебаний при $\chi = 0$ (a) и $\chi = 1$ (b)

Fig. 8. Distribution of average pressure oscillations in the suspension gap over the period of the umbrella-shaped oscillations at $\chi = 0$ (a) and $\chi = 1$ (b)

Главное преимущество зонтичных форм колебаний – это неравномерность и возрастание амплитуды на внешнем радиусе R_2 , что позволяет реализовать осесимметричный удар свободного тела по краю с существенно увеличенной амплитудой H_2 и повысить интенсивность биений.

3.1. Надежность работы

Возникает вопрос, существует ли условие, определяющее максимальное увеличение габаритов Т-образной части концентратора? Исследования на основе УГД задачи, проведенные ранее, показывают [20], что эффективная надежная работа при различных видах нагружения будет, если в зазоре «раскачать» как можно большую, приведенную к концу наконечника ВК инерционную массу, которую обычно находят из условия равенства кинетической энергии ближней к наконечнику полуволновой части ВК и кинетической энергии наконечника с искомой массой.

Рассмотрим теперь реакцию газового слоя для зонтичных форм колебаний. На рис. 8 представлено распределение средних по времени давлений статической реакции газового слоя $\bar{P}$ (зависимости 1 и 4), синхронной реакции слоя – синфазной $\bar{P}_c$ (зависимости 2 и 5) и квадратурной $\bar{P}_k$ (зависимости 3 и 6) составляющих, при этом каждая пара зависимостей содержит распределения давлений в несмещенном (зависимости 1, 2, 3) и смещенном на величину z положении (4, 5, 6), что дает возможность определить статическую жесткость слоя непосредственно по графикам. Очевидно, что форма распределения давлений соответствует форме зонтичных колебаний наконечника, при этом безразмерная

Это и отвечает на поставленный вопрос, так как обратная реакция на ВК всегда обратно пропорциональна этой массе и это значит, что масса свободного тела должна быть существенно меньше приведенной массы концентратора. Это же касается и режима биений как одного из видов нагрузки на ВК.

Нагружение концентратора можно реализовать различными способами:

- собственно нагружением за счет увеличения внешней силы;
- уменьшением амплитуды вынуждающего воздействия (уменьшением напряжения питания) на концентратор;
- повышением добротности концентратора.

В режиме подвеса ВНГО, когда изменяющаяся нагрузка действует постоянно на ВК, велика роль автоподстройки частоты ВК и выбора необходимой мощности привода. В режиме биений, когда частота биений может быть в 5–7 раз меньше частоты колебаний ВК и нагрузка со стороны свободного тела идет прерывисто, можно, на наш взгляд, обойтись без автоподстройки частоты, выбрав, например, режим максимально потребляемой мощности.

3.2. Условие перехода

Важным является условие перехода из режима подвеса к режиму биений свободного тела. Для этого предлагается исключить появление газового слоя путем инверсии критерия образования слоя для параметра Λ_v (7) в следующем виде:

$$\Lambda_v^* = \frac{\mu v_0 R^2}{P_0 A^2} \leq 3, \quad (17)$$

где A – амплитуда колебаний наконечника ВК при его равномерной вибрации. Введение амплитуды колебаний необходимо, так как в момент отрыва свободного тела от газового слоя существование зазора подвеса прекращается, но остается его размерная копия – амплитуда колебаний, которая в момент отрыва равна примерно половине зазора. Для неравномерных форм колебаний наконечника ВК границу перехода следует определять, исходя из полученных в этой работе графических зависимостей для несущей способности слоя.

В граничном режиме работы подвеса при работе с равномерной вибрацией при значениях Λ_v ниже двойной линии на рис. 6, достаточно или увеличить амплитуду колебаний A , или уменьшить радиус наконечника ВК, чтобы выполнилось условие (17) и подвес перешел в режим биений. Переходу в режим биений свободного тела также способствует уменьшение вязкости, повышение давления окружающей среды и снижение частоты вибрации ВК.

Если наконечник ВК имеет большую площадь поверхности, то перевести подвес в режим биений можно, задействовав некоторую часть его площади с радиусом, удовлетворяющей условию (17), при этом масса свободного тела в этом случае должна быть меньше приведенной к месту контакта массы концентратора, что следует из изложенных выше условий его надежной работы.

Чтобы более полно представить картину интегральных свойств газового подвеса, рассмотрим зависимости F_z , F_c и F_k от частотного параметра Λ_v при равномерной вибрации (рис. 9). Зависимость F_c имеет вид кривой с асимптотическим насыщением и повторяет по частоте вид зависимости несущей способности от Λ_v . В области малых значений Λ_v , сила F_k проявляется чистым линейным демпфированием колебаний наконечника ВК. С дальнейшим увеличением частоты колебаний эта зависимость становится нелинейной, слой запирается и $F_k \rightarrow 0$. Частотные зоны от 2 до 10 Λ_v во всем диапазоне амплитуд вибраций являются зонами перехода от подвеса к биениям свободного тела. Значение 0 Λ_v недопустимо, так как это вырожденный случай отсутствия колебаний на устройстве.

Ограничений на существование подвеса «сверху» по частоте нет, поэтому и говорить о возможности появления биений свободного тела (при той же геометрии подвеса при биениях и левитации) в зонах с большими Λ_v тоже нет необходимости из-за его запираения. Например, при попытке создать биения путем быстрого вытягивания свободного тела из сформированного зазора мы почувствуем его неупругое сопротивление, так как в ответ на увеличение зазора возрастет квадратурная составляющая. Статическая жесткость слоя определяет его упругое сопротивление, как и в обычной пружине.

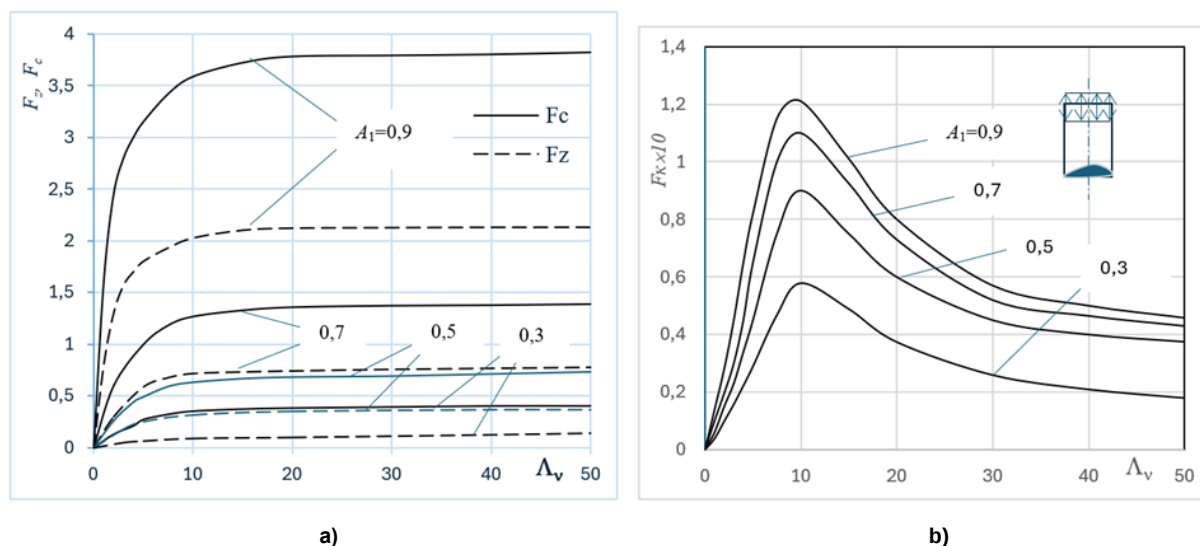


Рис. 9. Несущая способность (F_z), интегральные синфазная (F_c) и квадратурная (F_k) составляющие давлений при равномерной форме колебаний наконечника ВК ($A_1 = H_2$, $\chi = 0,1$, $\alpha = 1$) в зависимости от Λ_v
Fig. 9. The bearing capacity of the layer (F_z), the integral in-phase (F_c) and quadrature (F_k) components of the pressures with a uniform oscillation form of the waveguide concentrator tip ($A_1 = H_2$, $\chi = 0.1$, $\alpha = 1$) depending on Λ_v

4. Влияние газосодержания

Влияние содержания газа α в зазоре подвеса на его интегральные характеристики для равномерного сдвигания слоя ($H_2 = 0,5$) показано на рис. 10. Характерным является существенное увеличение значений этих характеристик при уменьшении α и смещение зоны их асимптотического поведения в сторону увеличенных значений параметра Λ_v . Меньшие значения параметра газосодержания не рассчитывались из-за вычислительных трудностей (необходимо менять модель задачи), но тенденция в их развитии показывает, что интегральные характеристики будут возрастать. Очевидно, что потребляемая пьезопроводом мощность также будет увеличиваться.

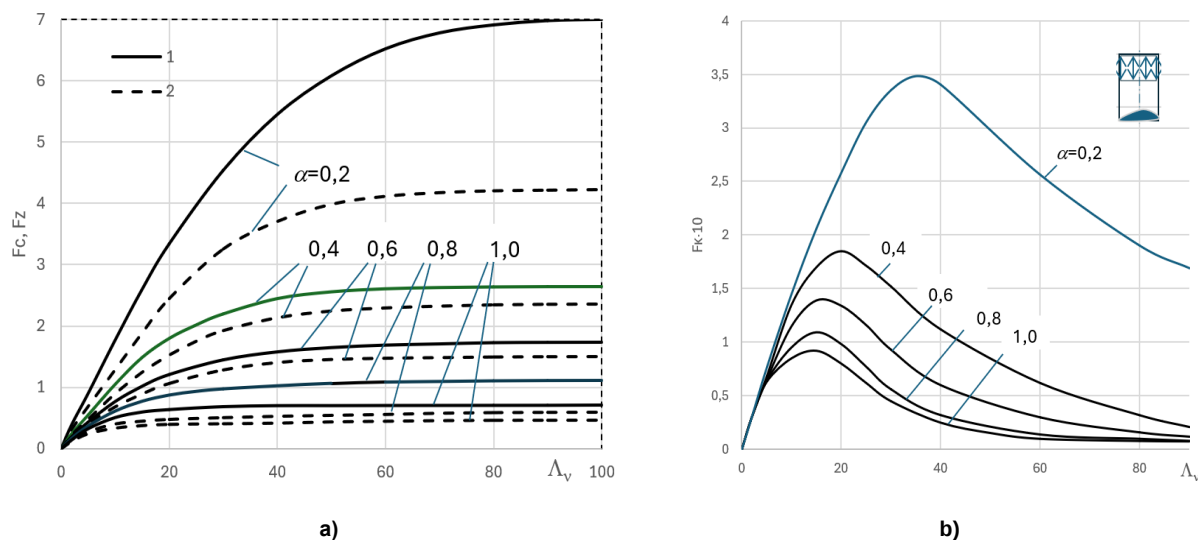


Рис. 10. Интегральные характеристики подвеса: а) несущая способность F_z (2), синфазная F_c (1); б) квадратурная F_k составляющая давлений при плоской вибрации ВК ($H_2 = 0,5$; $\chi = 0,1$) от Λ_v при разном газосодержании α
Fig. 10. Integral characteristics of the suspension: а) bearing capacity F_z (2), in-phase F_c (1); б) quadrature F_k component of pressure during plane vibration of the waveguide concentrator ($H_2 = 0.5$; $\chi = 0.1$) from Λ_v at different gas content α

В целом эффект от уменьшения газосодержания в слое положителен, так как приводит к увеличению интегральных характеристик газового слоя в режиме подвеса и увеличению граничной величины частотного параметра. Например, при $\alpha = 0,2$, несущая способность подвеса в 12 раз больше, а величина Λ_v более чем в 9 раз превышает обычные значения и приведет к увеличению частотного диапазона биений.

Вернемся к поставленному в начале статьи вопросу о том, будет ли работать рассматриваемый бур на Венере. Для начала надо ответить на вопрос об источнике энергии для него, так как использование солнечных батарей на поверхности невозможно из-за облачности. По аналогии с земными проектами [21] можно допустить создание компактной орбитальной энергетической станции с расположением ее на орбите Венеры и передачей солнечной энергии на поверхность, например, в коротковолновом СВЧ-диапазоне. Однако надежное прохождение этих волн через облака с серной кислотой маловероятно.

Нижние слои атмосферы на Венере представляют собой полужидкий-полугазообразный океан [22], а на поверхности, где и надо бурить грунт, атмосферное давление составляет 92,1 бара при температуре 467 °С. Из-за этого углекислый газ является уже сверхкритической жидкостью, для которой исчезает различие между жидкой и газовой фазой, при этом плотность близка к плотности жидкой фазы, а вязкость очень мала.

Значение частотного параметра Λ_v на Венере на 2 порядка меньше земных значений, и, в добавок, непонятно, является ли сверхкритическая жидкость сжимаемой, поэтому работа подвеса, рассчитанного по земным методикам, будет невозможна. Биения свободного тела, а значит, и работа бура в условиях высокой плотности жидкой фазы также весьма проблематичны. Отчасти спасает то, что сверхкритические жидкости применяются в земных условиях в качестве заменителей органических растворителей в лабораторных и промышленных процессах, поэтому необходим эксперимент с ними для проверки работоспособности бура. Столь необычная среда может потребовать корректировки условия (17), что нетрудно сделать калибровкой в сверхкритической жидкости путем, например, увеличения амплитуды колебаний устройства до выполнения условия перехода.

Выводы

В работе исследованы трибологические характеристики ультразвукового бура от трения пока до левитации и биений свободного тела, которые взаимосвязаны и последовательно переходят с ростом амплитуды на другой уровень.

Были представлены основные интегральные характеристики подвеса свободного тела – несущая способность, синхронная реакция и проведен анализ этих характеристик для равномерных колебаний, зонтичных и форм колебаний с одной узловой окружностью. Показано, что граничное значение частотного параметра Λ_v отвечает условию (7) только для равномерных колебаний преобразователя и смещается в сторону больших значений для сложных форм колебаний. Это поведение частотного параметра определяет как частотные характеристики режима биений, так и режима подвеса.

Предложено условие перехода из режима подвеса к режиму биений свободного тела для равномерных форм колебаний наконечника ВК по формуле

$$\Lambda_v^* = \frac{\mu \nu_0 R^2}{P_0 A^2} \leq 3,$$

где μ – вязкость слоя, ν_0 – номинальная частота колебаний волновода-концентратора; R – характерный поперечный размер (радиус) наконечника; P_0 – окружающее давление; A – амплитуда колебаний. Для неравномерных форм колебаний границу перехода следует определять, исходя из полученных в работе частотных зависимостей интегральных характеристик.

Влияние снижения газосодержания α сводится к увеличению значений интегральных характеристик в газовом слое подвеса и смещению выхода в зону асимптотического насыщения этих зависимостей при гораздо больших значениях Λ_v . Например, при $\alpha = 0,2$ несущая способность подвеса в 12 раз больше, а величина Λ_v более чем в 9 раз превышает обычные значения при $\alpha = 1$, что существенно расширяет частотный диапазон биений.

Список литературы

1. Bar-Cohen Y., Sherrit S., Self mountable and extractable ultrasonic/sonic anchor. Pat. US 7156189 B1, 2007.
2. Bar-Cohen Y., Sherrit S., Dolgin B., Bao X. Ultrasonic/sonic mechanism of deep drilling (USMOD) Pat. US № 6968910 B2, 2005.
3. Константиnescу В.Н. Газовая смазка. М.: Машиностроение, 1968. 718 с.
4. Сайт 4. NASA. InSight Mission. URL: <https://science.nasa.gov/mission/insight/> (дата обращения: 28.08.2026).
5. Wippermann T., Hudson T.L., Spohn T. et al. Penetration and performance testing of the HP³ Mole for the InSight Mars mission // Planetary and Space Science. 2020. Vol. 180. Article 104780. DOI: 10.1016/j.pss.2019.104780.
6. Spohn T., Grott M., Smrekar S.E., Knollenberg J. et al. The Heat Flow and Physical Properties Package (HP³) for the InSight Mission // Space Science Reviews. 2018. Vol. 214, no. 6. Article 96. DOI: 10.1007/s11214-018-0531-4.
7. Spohn T., Smrekar S.E., Hudson T.L., Grott M. et al. The Heat Flow and Physical Properties Package HP³ on InSight – First Results // 9th International Conference on Mars. Pasadena: Lunar and Planetary Institute, 2019. Abstract #6163.
8. Блехман И.И. Вибрационная механика и вибрационная реология (теория и приложения). М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. 752 с.
9. Шейнберг С.А. Газовая смазка подшипников скольжения // Трение и износ в машинах. Т. 8. М., 1953. С. 107–204.
10. Pan C.H. On asymptotic analysis of gas squeeze-film bearing // Journal of Lubrication Technology. Transactions of the ASME. Series F. 1967. Vol. 89, no. 3. P. 245–253.
11. Бургвиц А. Г., Завьялов Г. А. Приближенное интегрирование уравнения Прандтля неустановившегося движения газовой смазки // Машиноведение. 1966. № 3. С. 92–101.
12. Биушкин В. А., Дадаев С. Г., Завьялов Г. А. Исследование подвеса в опорах с колеблющимися стенками на подвижном основании // Проблемы развития газовой смазки. Ч. 1. М., 1972. С. 18–25.
13. Канапенас Р.-М. В. Виброопоры. Вильнюс: Мокслас, 1984. 208 с.
14. Полякова Л. А., Молотов П. Е. Исследование несущей способности вибронесущего подвеса с неравномерным сдавливанием пленки // Известия вузов СССР. Приборостроение. 1984. № 1. С. 5–17.
15. Некрасов С.Г., Пашнина Н.А. Влияние профилирования на характеристики течения газа в тонких зазорах с вибрацией // Трение и износ. 2010. Т. 31, № 3. С. 237–248.
16. Sherrit S., Bar-Cohen Y., Dolgin B. Modeling of horns for sonic/ultrasonic applications // Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. 1999. Vol. 1. P. 647–651. DOI: 10.1109/ULTSYM.1999.849482.
17. Xintian T., Yingxiang L., Shengjun S., Weishan C., Xinda Q. Development of a novel ultrasonic drill using longitudinal-bending hybrid mode // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 7362–7370.
18. Jun Z., Chengcheng D., Aiguo S. Force modeling of the cutting disc in rock sawing for anchoring and sampling in asteroid exploration // IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2017. P. 2142–2147.
19. Yinchao W., Hang J. et al. A novel ultrasonic longitudinal-torsional compound vibration lunar soil water ice drill // Journal of Physics: Conference Series. 2025. Vol. 3024. Article 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/3024/1/012010.
20. Некрасов С.Г., Перминов С.В. Модель вибратора для проектирования вибромашин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2021. Т. 21, № 4. С. 15–25. DOI: 10.14529/engin210402.
21. Николаева Ю.С. Семь космических проектов, нацеленных на передачу энергии на Землю. URL: <https://naked-science.ru/community/1143336> (дата обращения: 28.07.2026).
22. Нижняя атмосфера Венеры – сверхкритическая жидкость: по показаниям советского зонда «Венера-2» // Habr. URL: <https://habr.com/ru/articles/405137> (дата обращения: 10.08.2026).

References

1. Bar-Cohen Y., Sherit S. *Self mountable and extractable ultrasonic/sonic anchor*. Patent US 7156189 B1, 2007.
2. Bar-Cohen Y., Sherit S., Dolgin B., Bao X. *Ultrasonic/sonic mechanism of deep drilling (USMOD)*. Patent US 6968910 B2, 2005.
3. Konstantinesku V.N. *Gazovaya smazka* [Gas lubrication]. Moscow, 1968. 718 p.
4. NASA. *InSight Mission*. URL: <https://science.nasa.gov/mission/insight/> (accessed 28 Aug. 2026).
5. Wippermann T., Hudson T.L., Spohn T. et al. Penetration and performance testing of the HP³ Mole for the InSight Mars mission. *Planetary and Space Science*. 2020. Vol. 180. Article 104780. DOI: 10.1016/j.pss.2019.104780.
6. Spohn T., Grott M., Smrekar S.E., Knollenberg J. et al. The Heat Flow and Physical Properties Package (HP³) for the InSight Mission. *Space Science Reviews*. 2018. Vol. 214, no. 6. Article 96. DOI: 10.1007/s11214-018-0531-4.
7. Spohn T., Smrekar S.E., Hudson T.L., Grott M. et al. The Heat Flow and Physical Properties Package HP³ on InSight – First Results. *9th International Conference on Mars*. Pasadena: Lunar and Planetary Institute, 2019. Abstract #6163.
8. Blekhman I.I. *Vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya reologiya (teoriya i prilozheniya)* [Vibrational mechanics and vibrational rheology (theory and applications)]. Moscow, 2018. 752 p.
9. Sheinberg S.A. *Gazovaya smazka podshipnikov skol'zheniya* [Gas Lubrication of Sliding Bearings]. *Friction and Wear in Machines*. Vol. 8. Moscow, 1953, pp. 107–204. (In Russ.)
10. Pan C.H. On Asymptotic Analysis of Gas Squeeze-Film Bearing. *Journal of Lubrication Technology. Transactions of the ASME. Series F*, 1967, vol. 89, no. 3, pp. 245–253.
11. Burgvits A.G., Zav'yalov G.A. Approximate Integration of the Prandtl Equation for Unsteady Motion of Gas Lubrication. *Mashinovedenie*, 1966, no. 3, pp. 92–101. (In Russ.)
12. Bioushkin V.A., Dadaev S.G., Zav'yalov G.A. Issledovanie podvesa v oporakh s koleblyushchimisya stenkami na podvizhnom osnovanii [Investigation of Suspension in Bearings with Oscillating Walls on a Moving Base]. *Problems of the Development of Gas Lubrication*. Part 1. Moscow, 1972, pp. 18–25. (In Russ.)
13. Kanapenas R.-M.V. *Vibroopory* [Vibro-supports]. Vilnius, 1984. 208 p.
14. Polyakova L.A., Molotov P.E. Investigation of the Load-Carrying Capacity of a Vibration-Carrying Suspension with Uneven Compression of the Film. *Proceedings of Higher Educational Institutions of the USSR. Instrument Engineering*, 1984, no. 1, pp. 5–17. (In Russ.)
15. Nekrasov S.G., Pashnina N.A. Influence of Profiling on the Characteristics of Gas Flow in Thin Gaps with Vibration. *Friction and Wear*, 2010, vol. 31, no. 3, pp. 237–248. (In Russ.)
16. Sherit S., Bar-Cohen Y., Dolgin B. Modeling of Horns for Sonic/Ultrasonic Applications. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 1999, vol. 1, pp. 647–651. DOI: 10.1109/ULTSYM.1999.849482.
17. Xintian T., Yingxiang L., Shengjun S., Weishan C., Xinda Q. Development of a Novel Ultrasonic Drill Using Longitudinal-Bending Hybrid Mode. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 7362–7370.
18. Jun Z., Chengcheng D., Aiguo S. Force Modeling of the Cutting Disc in Rock Sawing for Anchoring and Sampling in Asteroid Exploration. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2017, pp. 2142–2147.
19. Yinchao W., Hang J. et al. A Novel Ultrasonic Longitudinal-Torsional Compound Vibration Lunar Soil Water Ice Drill. *Journal of Physics: Conference Series*, 2025, vol. 3024, article 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/3024/1/012010.
20. Nekrasov S.G., Perminov S.V. Model of a Vibrator for Designing Vibration Machines. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Mechanical Engineering"*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 15–25. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin210402.
21. Nikolaeva Yu.S. *Sem' kosmicheskikh proektov, natselennykh na peredachu energii na Zemlyu* [Seven Space Projects Aimed at Transmitting Energy to Earth]. URL: <https://naked-science.ru/community/1143336> (accessed 28 Jul. 2026). (In Russ.)
22. According to the Readings of the Soviet Vega-2 Probe, Scientists Concluded that the Lower Atmosphere of Venus is a Supercritical Fluid. *Habr*. URL: <https://habr.com/ru/articles/405137> (accessed 10 Aug. 2026). (In Russ.)

Информация об авторах

Некрасов Сергей Геннадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; nekrasovsg@susu.ru

Перминов Сергей Васильевич, главный инженер АО «Медприбор», Челябинск, Россия; info@medpribor.net

Малозёмов Андрей Адиевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории исследований моторно-трансмиссионного блока автомобильной, дорожно-строительной и специальной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; malozemovaa@susu.ru

Information about the authors

Sergey G. Nekrasov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; nekrasovsg@susu.ru

Sergey V. Perminov, chief engineer of Medpribor, JSC, Chelyabinsk, Russia; info@medpribor.net

Andrey A. Malozemov, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher at the Laboratory for Research of the motor transmission unit of Automotive, Road Construction and Special Equipment, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; malozemovaa@susu.ru

Статья поступила в редакцию 31.08.2026; принята к публикации 03.09.2026.

The article was submitted 31.08.2026; accepted for publication 03.09.2026