

## ПРЕДКРИТИЧЕСКАЯ ТЕРМОАКУСТИКА В ГЕЛИИ

*К. О. Кешишев, В. И. Марченко\*, Е. Р. Подоляк*

*Институт физических проблем им. П. Л. Капицы Российской академии наук  
117334, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 10 сентября 2021 г.,  
после переработки 10 сентября 2021 г.  
Принята к публикации 10 сентября 2021 г.

Исследована эволюция основной моды акустических колебаний в резонаторе, заполненном газообразным гелием, при погружении его в транспортный дьюар. Обнаружено критическое поведение параметра затухания при приближении к уровню, ниже которого возникает термоакустическая неустойчивость.

DOI: 10.31857/S0044451021120142

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В различных установках, где существует значительный перепад температуры в газе, при соответствующей геометрии может возникать термоакустическая неустойчивость [1, 2], приводящая зачастую к большим спонтанным колебаниям давления [3–5].

Обычно экспериментальные исследования термоакустики сводятся к наблюдению самого факта наличия или отсутствия спонтанных колебаний в тех или иных условиях [6–11]. Однако, согласно существующим теоретическим представлениям об этой неустойчивости [12], имеется принципиальная возможность исследования особенности поведения устойчивого состояния системы при приближении к точке возникновения колебаний.

Термоакустическая неустойчивость по сути ничем не отличается от турбулентной неустойчивости в гидродинамике. Действительно, ламинарное течение жидкости является решением уравнений гидродинамики в конкретной заданной геометрии грани. Стационарное состояние какой-либо тепловой или низкотемпературной установки также должно являться решением уравнений теплопереноса и газодинамики. В простейшей постановке задачи речь может идти, например, о решении уравнения теплопроводности в покоящемся газе. Стационарные решения остаются формально верными при произвольных значениях потока массы  $J$  и потока тепловой энергии  $Q$ . Они, однако, могут потерять устойчивость по мере изменения внешних условий, и тог-

да будет реализоваться другое решение, в общем случае — нестационарное.

Известно лишь одно точное решение задачи о потере устойчивости ламинарного течения в щели [13]. Во всех остальных случаях, как в турбулентности, так и в термоакустике, граница устойчивости стационарного состояния определяется лишь в том или ином приближении<sup>1)</sup>. Обычно даже подлежащее исследованию на устойчивость состояние невозможно представить как результат последовательного решения уравнений гидродинамики. Единственное исключение — задача о бенаровской конвекционной неустойчивости неподвижной жидкости (см. § 57 в [14]).

Согласно Ландау [15], общий сценарий возникновения неустойчивости стационарного состояния жидкости сводится к следующему: любая мода колебаний плотности, скорости (и температуры) при сколь угодно малой амплитуде характеризуется зависимостью от времени вида  $\exp(i\omega t - \gamma t)$ , причем параметр затухания  $\gamma$  у всех мод положителен. Если при изменении внешних условий у какой-то из мод параметр  $\gamma$  уменьшается и меняет знак, то возникает спонтанное колебание. При этом возможны два случая развития неустойчивости — мягкое самовозбуждение или жесткое самовозбуждение (supercritical and subcritical bifurcations). В первом случае возникает колебание на частоте критической моды с амплитудой, нарастающей от нуля

<sup>1)</sup> Отметим, впрочем, что и решение в [13] получено при существенных упрощениях — не учитывались обусловленные вязкостью тепловые эффекты и градиент плотности, возникающий из-за необходимого для обеспечения ламинарного течения перепада давления.

\* E-mail: mar@kapitza.ras.ru

по мере удаления от точки потери устойчивости. Во втором случае колебание возникает скачком — сразу с конечной амплитудой и на частоте, не обязательно близкой к критической.

Такие переходы являются кинетическими аналогами фазовых переходов. Но здесь имеются существенные отличия. В частности, поскольку смена картины потоков происходит на задаваемых размерах установки макроскопических масштабах и локально все процессы в обоих состояниях описываются одними и теми же уравнениями гидродинамики, то нет причин для роста термодинамических флуктуаций в окрестности перехода. Поэтому, как и полагал Ландау, вблизи точки потери устойчивости можно ожидать линейную зависимость частоты критической моды<sup>2)</sup> от меры близости к бифуркации и линейное же стремление параметра затухания к нулю.

В термоакустике теряющая устойчивость мода в случае замкнутого сосуда принадлежит к дискретному спектру системы. Тогда возможно наблюдение за поведением ее частоты и затухания при приближении к точке бифуркации со стороны стационарного состояния с помощью измерения резонанса. Этому исследованию посвящена настоящая работа.

## 2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения проводились в стандартном транспортном гелиевом сосуде СТГ-40. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 1. Основной гелиевый объем 1 (емкость 40 л) подвешен на тонкостенной горловине 2 (трубка из нержавеющей стали, диаметр 25 мм, толщина стенки 0.3 мм, длина 400 мм). Нижний конец горловины расположен на высоте  $h = 390$  мм. Здесь и далее высота  $h$  отсчитывается от дна основного объема. Между верхним и нижним ее концами стрелкой отмечено место теплового контакта горловины с азотным экраном,  $h = 625$  мм. Испаряющийся гелий поступает в централизованную сеть и далее в газгольдер, давление в котором автоматически поддерживается на уровне, превышающем атмосферное давление на 19 мбар. Верхний торец горловины герметично уплотнен эластичной резиновой мембраной 3. Сквозь отверстия в мембране с небольшим натягом пропущены термометрическая штанга 4 и U-образный акустический резонатор 5. Благодаря упругости резины штангу и резонатор можно независимо

<sup>2)</sup> При возникновении конвекции частота не меняется и остается равной нулю [16].

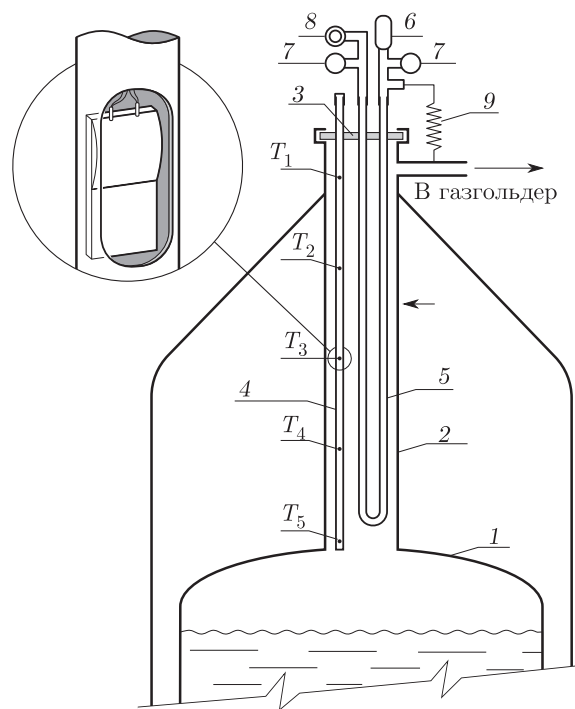


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — гелиевый объем СТГ-40; 2 — горловина; 3 — резиновая мембрана; 4 — термометрическая штанга; 5 — акустический резонатор; 6 — датчик давления; 7 — микрофоны; 8 — динамик; 9 — дроссель

перемещать вдоль вертикали без нарушения герметичности гелиевого объема дьюара.

Термометрическая штанга представляет собой тонкостенную трубку из нержавеющей стали (диаметр 3 мм, толщина стенки 0.2 мм) с заглушенными верхним и нижним концами, в которой с шагом 100 мм прорезаны пять овальных отверстий. Внутри трубки смонтированы подводящие провода и строго напротив отверстий — термометры.

U-образный резонатор изготовлен из тонкостенной нержавеющей трубки (диаметр 4 мм, толщина стенки 0.3 мм, длина 1.3 м). На концах резонатора, находящихся вне гелиевого объема, смонтированы датчик давления 6, микрофоны 7 и динамик 8.

При изменении глубины погружения замкнутого резонатора в нем, очевидным образом, изменяется давление. Для проведения измерений при строго постоянном давлении в схеме (см. рис. 1) предусмотрен дроссель 9, обеспечивающий выравнивание перепада давлений между резонатором и дьюаром с характерным временем порядка 100 с. В то же время при всех наблюдаемых частотах резонатор оказывается акустически изолированным от основного объема гелия.

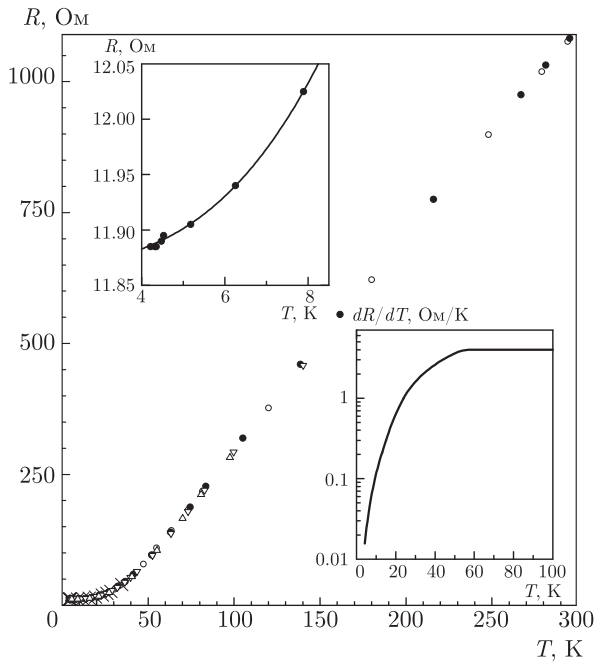


Рис. 2. Градуировка платиновых датчиков

### 3. ТЕРМОМЕТРИЯ

При измерении температуры использовались миниатюрные платиновые термометры Heraeus 420 с номинальным сопротивлением 1000 Ом при температуре  $T = 0^\circ\text{C}$ . Производителем предусмотрен стандартный диапазон 77–423 K, для которого известны зависимость сопротивления  $R$  от температуры  $T$  и другие параметры датчиков. Чтобы использовать такие термометры при значительно более низких температурах, были измерены зависимости  $R(T)$  для всех пяти датчиков в интервале  $4.2\text{ K} < T < 300\text{ K}$ ; при этом в качестве репера использовался калиброванный термометр сопротивления Senox CX-1010-SD-0.1L. Эти результаты представлены на рис. 2. На верхней вставке для примера продемонстрировано поведение одного из пяти датчиков в интервале 4.2–8 K. Очевидно, что определяющий вклад в зависимость  $R(T)$  в этой области вносит величина остаточного сопротивления. Значения  $R_i(4.2\text{ K})$  находятся в диапазоне 11.75–12.19 Ом. Здесь же (рис. 2) на нижней вставке показана температурная зависимость чувствительности  $dR/dT$  платиновых термометров. По сравнению с высокотемпературной областью при температуре 4.2 K чувствительность падает в 250 раз. Тем не менее даже в этом случае при достаточной точности измерения сопротивления ( $\Delta R/R \sim 10^{-4}$ ) можно фиксировать изменение температуры с погрешностью примерно 1 K.

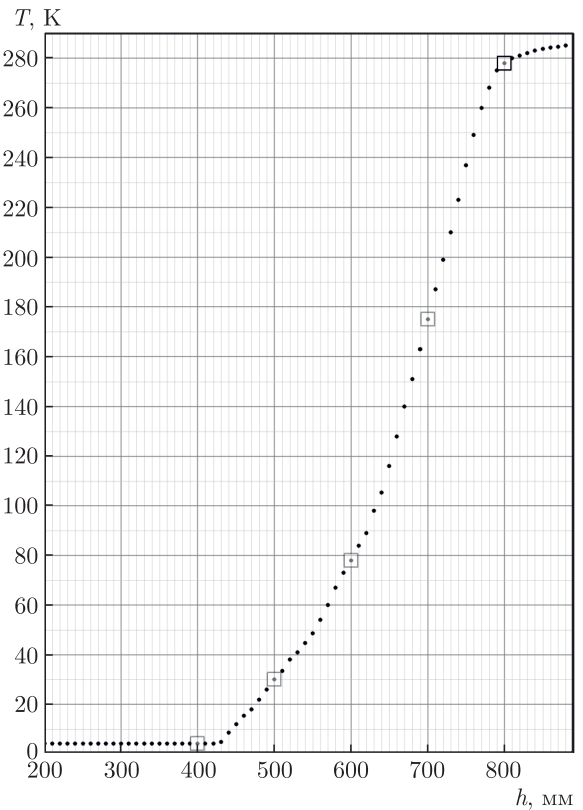


Рис. 3. Распределение температуры в дьюаре

На рис. 3 представлена зависимость  $T(h)$ , характеризующая распределение температуры в горловине дьюара. Напомним, что ее нижний конец находится на отметке  $h = 390\text{ мм}$ . Измерения проводились с помощью рассмотренных выше платиновых термометров, смонтированных на штанге. В ходе измерений штанга поэтапно с шагом 10 мм погружалась в горловину. После очередного погружения температура устанавливалась за время около 5 мин, и далее регистрировались показания всех пяти термометров. Таким образом, многие из точек на рис. 3 являются результатом измерения температуры поочередно несколькими термометрами.

### 4. АКУСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Для акустических измерений использовался U-образный резонатор на основной моде — половина длины волны. В ходе экспериментов измерялось статическое давление с помощью тензометрического датчика абсолютного давления МИДА-ДА-13П с диапазоном 0–1.6 бар. Чувствительность датчика (3.1 В/бар) оказалась достаточной для наблюдения акустических колебаний большой амплитуды.

При изучении колебаний с малой амплитудой ( $\bar{p} < 0.4$  мбар) использовались два электрретных микрофона Panasonic WM-52 с чувствительностью примерно 0.6 В/мбар. Наличие двух микрофонов позволяло контролировать разность фаз сигналов на двух концах резонатора. Для возбуждения вынужденных колебаний в схеме резонатора предусмотрен динамик диаметром 16 мм.

## 5. НАБЛЮДЕНИЕ РЕЗОНАНСОВ

Одна из целей эксперимента заключалась в наблюдении эволюции основной моды колебаний с понижением температуры. При исследовании резонансов термометрическая штанга находилась в неизменном положении и температура непрерывно контролировалась в пяти точках, отмеченных квадратами на рис. 3. После того как возмущение температурного поля, вызванное очередным опусканием резонатора, релаксировало, проводилось измерение<sup>3)</sup> амплитуды  $A$  вынужденных колебаний давления в зависимости от частоты  $f$  генератора, возбуждающего динамик. Одновременно частота измерялась частотомером на выходе микрофона. При этом, как и следовало ожидать, показания частотомера совпадали с частотой генератора. Кроме того, непрерывно контролировалось статическое давление  $p$  внутри резонатора. Таким образом, представленные ниже данные являются результатом последовательного циклического опроса восьми датчиков. Время одного цикла (примерно 17 с) обусловлено компромиссом между точностью измерений и быстродействием измерительной схемы.

По изложенному сценарию, начиная с высоты  $h = 507$  мм (положение резонатора определяем по координате его нижней точки), за время около восьми часов были получены 9 резонансных кривых  $A(f)$  на девяти высотах. На рис. 4 представлены хронологические зависимости  $h(t)$ ,  $f(t)$ ,  $A(t)$ ,  $p(t)$  и показания четырех термометров  $T_1(t), \dots, T_4(t)$  (см. рис. 1) в течение последних 100 минут эксперимента. Данные нижнего термометра  $T_5$  не приведены, поскольку с точностью до измерительных шумов его температура оставалась постоянной и равной 4.2 К.

На второй минуте в очередной раз резонатор был опущен с высоты 405 мм до 400 мм. Одновременно зафиксированы возмущение и релаксация давления

и четырех термометров. Далее, между 9-й и 32-й минутами, проведена запись резонансной кривой.

На 34-й минуте, при выключенном генераторе, резонатор был опущен на глубину 398 мм. По сравнению со всеми предыдущими измерениями резонансов здесь наблюдается существенное отличие, обусловленное, очевидно, предельной близостью системы к критической точке. Как и ранее, возникают возмущение и релаксация термометров, и одновременно (чего не было раньше) происходит всплеск спонтанных колебаний на частоте около 80 Гц продолжительностью около минуты.

После релаксации системы и включения генератора, начиная с 42-й минуты, измерялся последний резонанс. На 56-й минуте, после прохождения максимума резонансной кривой  $A(f)$  и переключения генератора на следующую частоту 81.5 Гц, эта частота была зафиксирована, и далее отслеживалось поведение системы в режиме вынужденных колебаний при слабом дрейфе температуры.

На 64-й минуте система потеряла устойчивость и возникли спонтанные колебания. Измеряемая частота оторвалась от частоты генератора и понизилась до величины  $f = 80,2$  Гц, а амплитуда выросла в 5 раз<sup>4)</sup>. Одновременно произошли кратковременные изменения в показаниях датчиков давления и температуры. Спустя приблизительно 10 минут генератор был выключен, что никак не сказалось на поведении системы, которая оставалась в режиме автоколебаний. Вплоть до окончания эксперимента наблюдался лишь слабый немонотонный дрейф температуры, амплитуды и частоты колебаний.

На рис. 5 представлены пять резонансных кривых  $A(f)$ , ближайших к точке потери устойчивости стационарного состояния. Экспериментальные точки аппроксимируются формулой, естественной для уединенной слабозатухающей моды гармонических колебаний любой механической системы (см. § 26 в [17]),

$$A = \frac{A_r}{\sqrt{(2\pi(f - f_r)\tau)^2 + 1}}, \quad (1)$$

со следующими тремя параметрами:  $A_r$  — максимальная амплитуда вынужденных колебаний, пропорциональная амплитуде возбуждения;  $f_r$  — резонансная частота;  $\tau = 1/\gamma$  — время затухания.

На рис. 6 представлены зависимости параметров формулы резонансной кривой (1) от координа-

<sup>3)</sup> Предварительно контролировалась линейность колебаний при изменении амплитуды возбуждения. При этом разность фаз на концах резонатора составляла 180°.

<sup>4)</sup> Такое поведение указывает на то, что бифуркация происходит по жесткому (но близкому к мягкому) режиму самовозбуждения. Для окончательного вывода, очевидно, необходимо проведение наблюдений за динамикой развития бифуркации с лучшим временным разрешением.

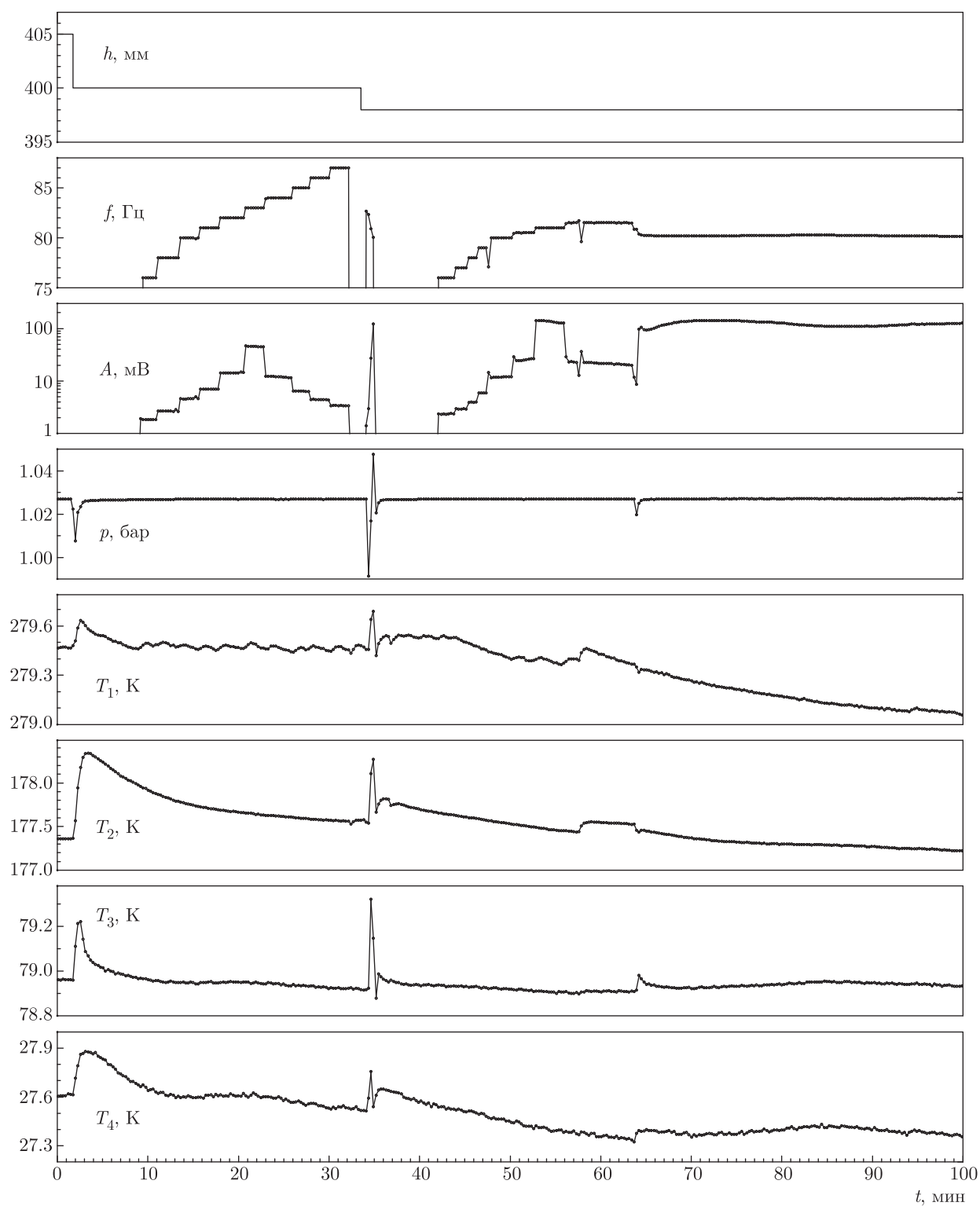


Рис. 4. Вынужденные и спонтанные колебания в резонаторе. Подробнее см. текст

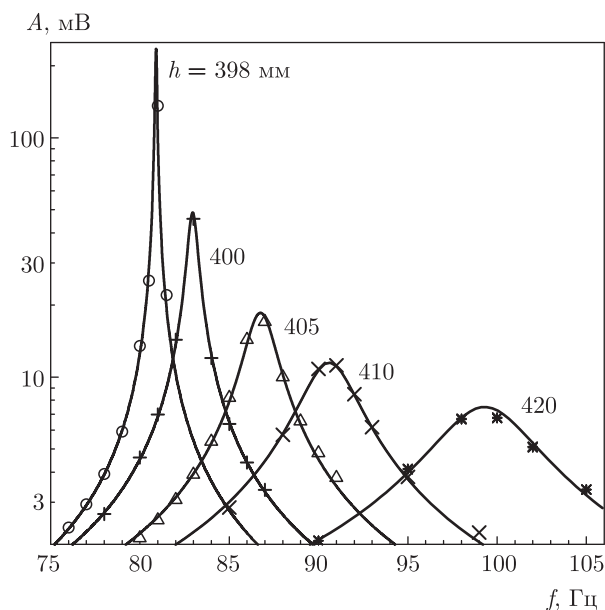


Рис. 5. Ближайшие к критической точке резонансные кривые

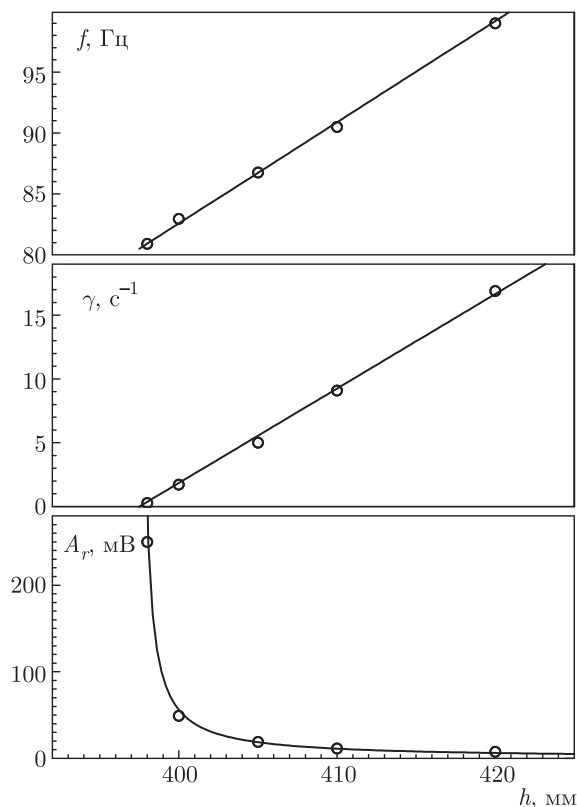


Рис. 6. Поведение параметров резонансных кривых вблизи точки бифуркации

ты  $h$  резонатора. Амплитуда растет по закону  $A_r \propto (h - h_c)^{-1}$ , где  $h_c = 397.5$  мм, а частота  $f_r$  и параметр затухания  $\gamma$  демонстрируют линейное поведение.

Таким образом, на примере термоакустики сценарий Ландау потери устойчивости в гидродинамике находит экспериментальное подтверждение.

**Благодарности.** Благодарим А. Ф. Андреева, С. Т. Болдарева, Е. А. Бренера, И. К. Буткевича, Р. Б. Гусева, В. В. Дмитриева, Л. А. Мельниковского, В. В. Сиренева, А. И. Смирнова и И. Н. Хлюстикова за полезные обсуждения, помощь и советы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. C. Sondhauss, *Ann. der Phys. Chem.* **79**, 1 (1850).
2. W. H. Keesom, *Helium*, Elsevier, Amsterdam (1942), p. 174.
3. C. J. Lawn and G. Penelet, *Int. J. Spray Combust. Dyn.* **10**, 3 (2018).
4. N. Dittmar, S. Kloeppe, Ch. Haberstroh et al., *Phys. Proc.* **67**, 348 (2015).
5. W. Stautner, R. Chen, M. Xu et al., *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **101**, 012038 (2015).
6. J. R. Clement and J. Gaffney, *Adv. Cryog. Eng.* **1**, 302 (1954).
7. J. Gaffney and J. R. Clement, *Rev. Sci. Instr.* **26**, 620 (1955).
8. T. von Hoffmann, U. Lienert, and H. Quack, *Cryogenics* **13**, 400 (1973).
9. T. Yazaki, A. Tominaga, and Y. Narahara, *Cryogenics* **19**, 393 (1979).
10. T. Yazaki, A. Tominaga, and Y. Narahara, *J. Low Temp. Phys.* **41**, 45 (1980).
11. Y. Gu and K. D. Timmerhaus, *Adv. Cryog. Eng.* **39**, 1733 (1994).
12. N. Rott, *Adv. Appl. Mech.* **20**, 135 (1980).
13. C. C. Lin, *The Theory of Hydrodynamic Stability*, Cambridge Univ. Press (1955).
14. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Гидродинамика*, Наука, Москва (1986).
15. Л. Д. Ландау, *ДАН* **44**, 339 (1944).
16. Л. П. Горьков, *ЖЭТФ* **33**, 402 (1957).
17. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Механика*, Наука, Москва (1973).