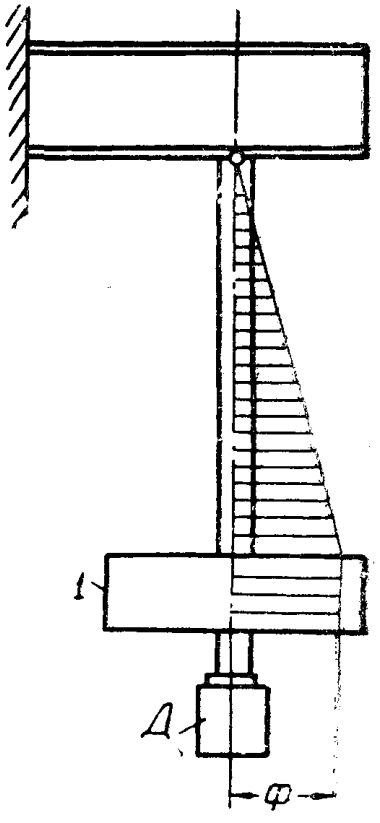
ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
Том 85 ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА 1957 г.

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ВАЛАХ

В. К. НЕЧАЕВ, А. Т. БОЛГОВ

В ряде силовых установок с поршневыми двигателями внутреннего сгорания (например, в судовых установках при двухузловой форме колебаний) гистерезис материала валопровода является основным источником демпфирования крутильных колебаний.

При расчетах резонансных крутильных колебаний валов таких установок подсчет гистерезисных потерь энергии обычно производится на основании литературных данных. Изучению гистерезиса посвящено значительное количество работ, в которых приводятся как теоретические исследования, так и результаты опытов по определению гистерезисных потерь в образцах, изготовленных из сталей некоторых конкретных марок. Однако по большинству сталей, применяемых в настоящее время для изготовления валов, таких данных не имеется. В этих условиях надежная оценка гистерезисных потерь в валу оказывается затруднительной.



Фиг. 1

Подобные затруднения возникли и перед авторами, в связи с необходимостью достаточно точной оценки гистерезисных потерь в сравнительно небольших гладких цилиндрических валах одной опытной моторной установки. Для экспериментального определения этих гистерезисных потерь в лаборатории ДВС Томского политехнического института была построена специальная установка [1]).

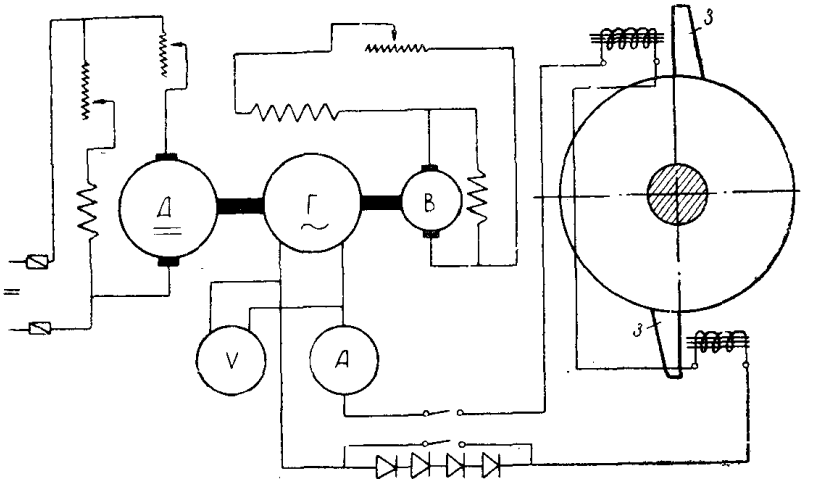
Цель данной статьи—описание установки и изложение методики обработки результатов экспериментов.

Принятая авторами методика определения коэффициентов гистерезисного демпфирования основана на анализе кривых свободных затухающих крутильных колебаний исследуемого вала.

Исследуемый вал (фиг. 1) подвешивался в вертикальном положении. Верхний его конец прикреплялся к жесткой раме, заделанной в стену. На нижнем конце вала закреплялся тяжелый диск 1 (ниже называемый маховиком) с якорями 3 (фиг. 2). Для возбуждения крутильных колебаний

[1]) Такая установка может быть использована и для усталостных испытаний.

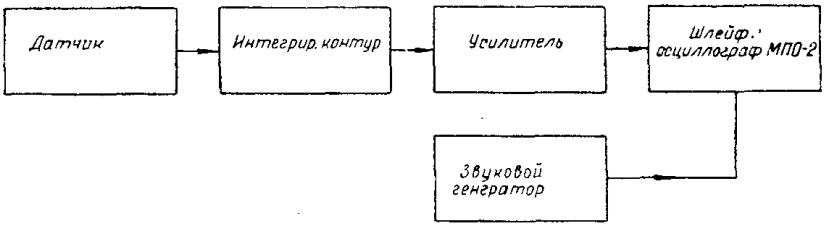
системы вал-маховик против якорей были установлены два электромагнита, укрепленные неподвижно на специальных кронштейнах. Обмотки электромагнитов питались переменным током от синхронного генератора Г, ротор которого приводился во вращение от электромотора Д постоянного тока (фиг. 2). В результате воздействия электромагнитов на якори маховика в системе вал-маховик возбуждались крутильные колебания, частота которых равна удвоенной частоте питающего тока. Для получения частот колебаний меньших, чем частота, соответствующая удвоенному минималь-



Фиг. 2

ному устойчивому числу оборотов электромотора, в цепь электромагнитов включался селеновый выпрямитель (фиг. 2). Для получения достаточно сильных крутильных колебаний вала частота тока, питающего электромагниты, подбиралась (соответствующим изменением числа оборотов моторгенератора) такой, чтобы возбуждались резонансные колебания системы вал-маховик. Амплитуды резонансных колебаний маховика можно было изменять путем изменения силы питающего тока, за счет регулирования возбуждения синхронного генератора.

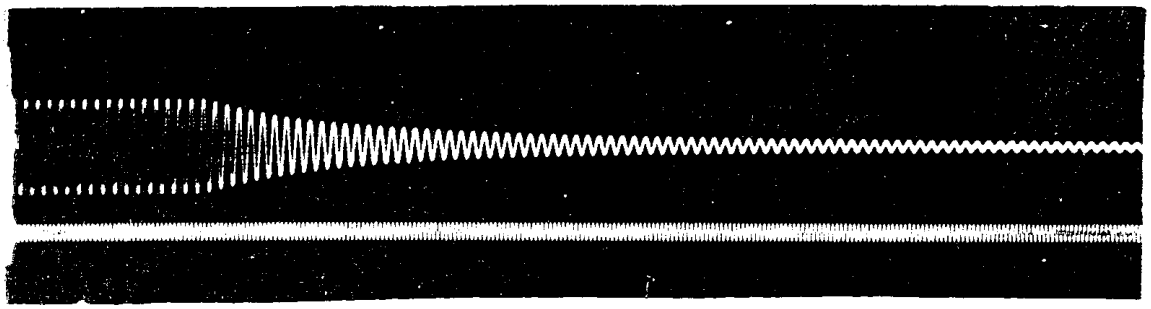
После выключения электромагнитов с помощью рубильника установившиеся вынужденные колебания маховика (с постоянной амплитудой) переходят в затухающие свободные колебания, которые можно записать следующим образом. На торце вала под маховиком (фиг. 1) закреплялся индукционный датчик Д сейсмического типа. При крутильных колебаниях маховика в датчике индуктировалась переменная э. д. с., величина которой в любой момент времени пропорциональна угловой скорости колебаний маховика. Выходное напряжение датчика подавалось на интегрирующий контур (фиг. 3); выходное напряжение последнего, пропорциональное



Фиг. 3

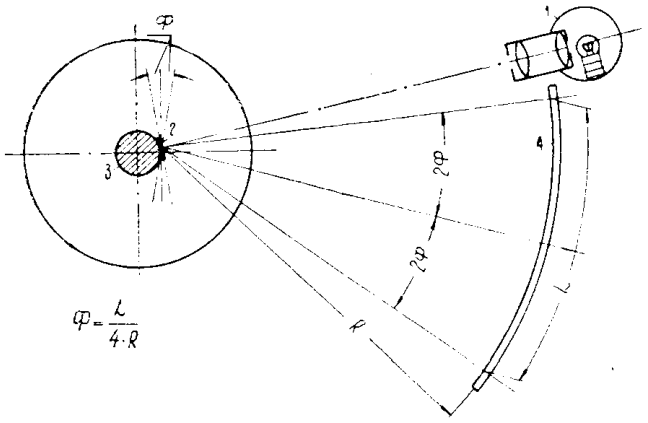
угловым перемещениям маховика (или закрутке вала), подавалось на вход низкочастотного усилителя и затем на шлейф осциллографа МПО-2.

В качестве примера на фиг. 4 приведена одна из полученных таким образом осциллограмм затухающих колебаний системы по фиг. 1. На осциллограмме нанесены с помощью второго шлейфа осциллографа также отметки времени, представляющие собой запись переменного напряжения с частотой 100 гц от звукового генератора ЗГ-2А (фиг. 3).



Фиг. 4

Для определения масштаба записи амплитуд колебаний (учитывающего усиление всего электрического тракта) применялось оптическое устройство, состоящее из осветителя 1, зеркала 2, закрепленного на испытываемом валу 3 (вблизи маховика), и неподвижной шкалы 4 (фиг. 5). При установившихся колебаниях системы вал-маховик записыва-



Фиг. 5

лась осциллограмма, как описано выше, и одновременно амплитуда колебаний маховика измерялась оптическим методом. Сопоставлением результатов измерений амплитуд колебаний Ф по оптическому методу с амплитудами колебаний на осциллограмме определялся искомый масштаб записи колебаний осциллографом. Для установления зависимости масштаба записи колебаний от амплитуды колебаний такие опыты были проделаны при различных амплитудах маховика.

Как известно, работа гистерезиса dA_z в элементарном объеме dV материала вала за цикл колебаний может быть представлена выражением

$$dA_z = s\tau^q dV, \qquad (1)$$

где

τ — максимальное касательное напряжение, возникающее в этом элементарном объеме за цикл колебаний,

s — истинная константа гистерезиса,

q — гистерезисный показатель.

Величины s и q зависят, в основном, от материала вала и его термической обработки и в меньшей степени от предшествующих условий, в которых работал вал.

Путем интегрирования (1) легко получить выражение для потери энергии A_z на гистерезис в прямом цилиндрическом валу. Это выражение для A_z, применительно к случаю колебаний вала в опытной установке по фиг. 1, с некоторой амплитудой Ф колебаний нижнего конца вала (у маховика), может быть записано в виде:

$$A_z = S\left(\frac{c}{W_p}\right)^q V \Phi^q \tag{2}$$

или же в несколько иной форме

$$A_z = a\left(\frac{c}{W_p}\right)^q \Phi^q d^2 l, \tag{3}$$

где

$$S = \frac{2s}{2+q},$$

$$c = \frac{GI_p}{l},$$

$$W = \frac{\pi d^3}{16}.$$

Здесь

S и a — константы гистерезиса, связанные между собою очевидным соотношением

$$S = \frac{4}{\pi} a,$$

G — модуль второго рода для материала вала,

c — жесткость испытываемого вала,

I_p и W_p — соответственно, полярные момент инерции и момент сопротивления поперечного сечения вала;

d и l — диаметр и длина вала (при выводе выражений (2) и (3) влияние собственной массы вала на форму упругой кривой вала при его крутильных колебаниях не учитывалось).

Входящие в (2) и (3) характеристики гистерезиса S, a и q могут быть определены из опыта следующим путем.

Энергия, рассеиваемая за один n-ый цикл затухающих колебаний маховика в установке по фиг. 1, определится как разность потенциальных энергий системы в начале и конце цикла

$$\Delta \Pi_n = \Pi_n - \Pi_{n+1} = \frac{c}{2}\left(\Phi_n^2 - \Phi^2_{n+1}\right).$$

Пренебрегая всеми другими (кроме гистерезисных) потерями энергии в системе, можно написать [1])

$$A_z \cong \Delta \Pi_n = \frac{c}{2}\left(\Phi^2_n - \Phi^2_{n+1}\right).$$

---

[1]) Для получения достаточно надежных значений величин S, a и q необходимо, в частности, обеспечить возможно более жесткое закрепление верхнего конца вала (фиг. 1).

Последовательные убывающие значения Φ_0, Φ_1, Φ_2... амплитуд свободных затухающих колебаний маховика легко измерить непосредственно по снятым осциллограммам (фиг. 6), с учетом определенного ранее масштаба записи.

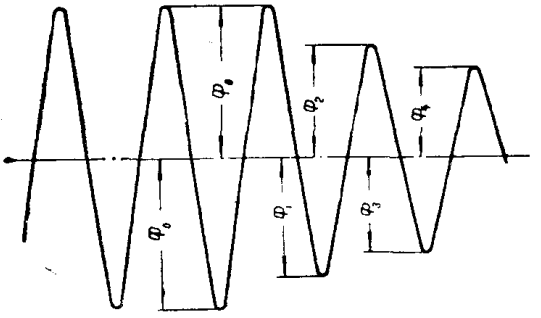
Теперь можно подсчитать значения $\Delta\Pi$ для ряда последующих циклов

$$\Delta\Pi_0 = \frac{c}{2}\left(\Phi_0^2 - \Phi_1^2\right),$$

$$\Delta\Pi_1 = \frac{c}{2}\left(\Phi_1^2 - \Phi_2^2\right)$$

. . . . . .

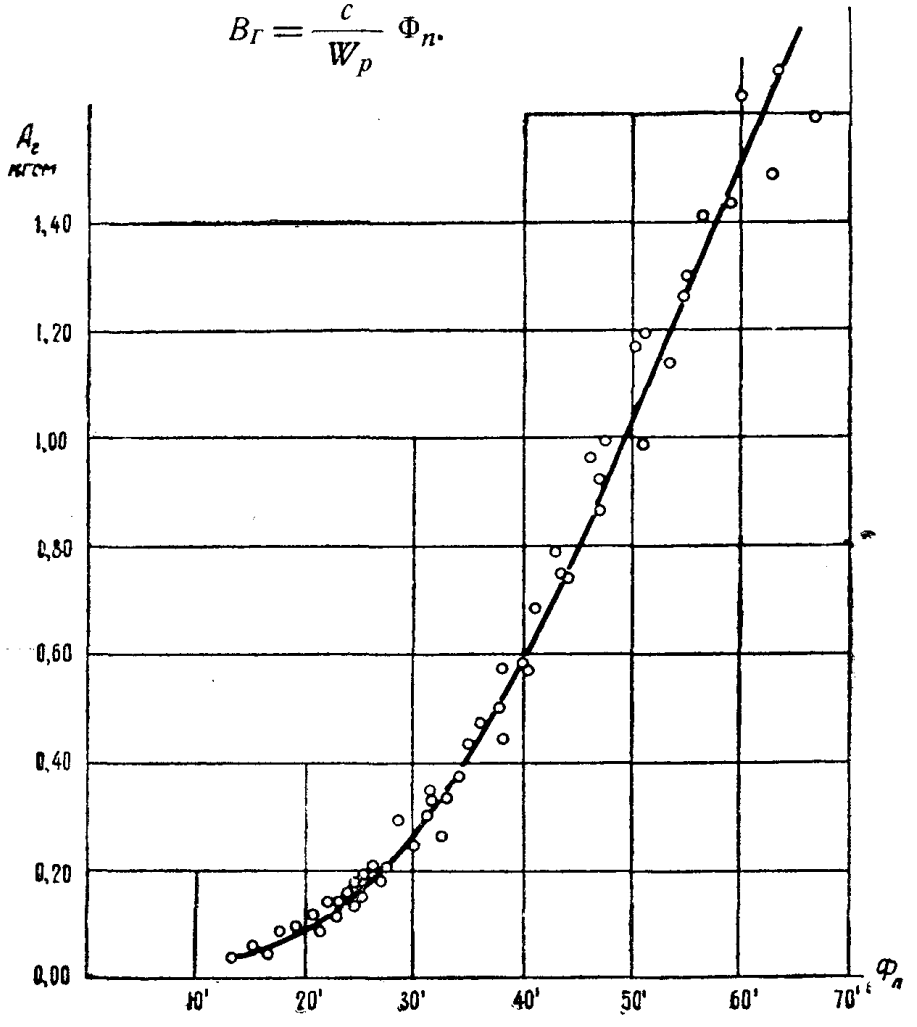
. . . . . .



Фиг. 6

и представить эти результаты на графике (фиг. 7) в координатах $\Delta\Pi$ (или $A_г$) и $\Phi_п$ или же на графике (фиг. 8) в координатах $\lg A_г$ и $\lg B_г$. Здесь применительно к (2) принято обозначение

$$B_Г = \frac{c}{W_p}\,\Phi_п.$$

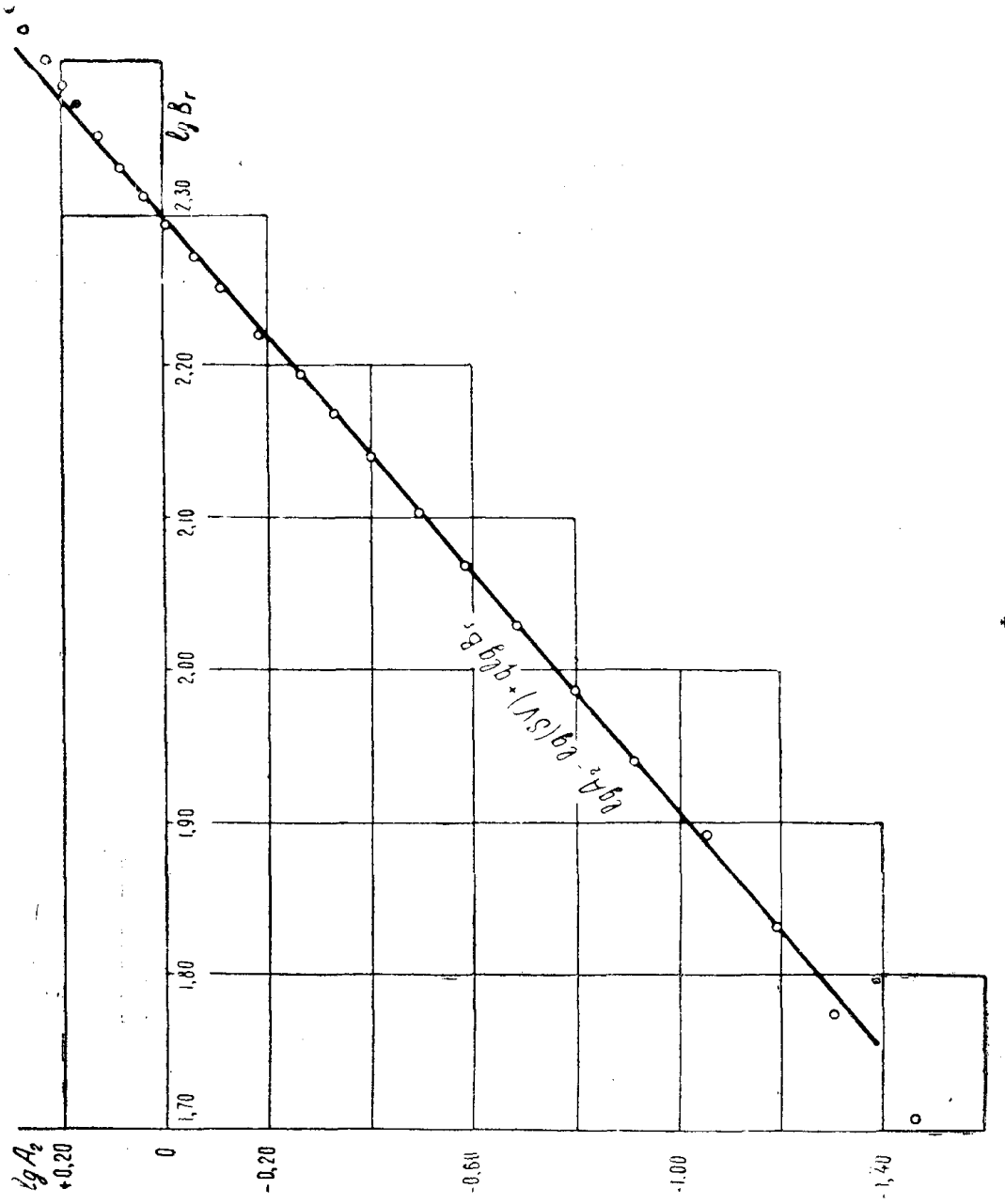


Фиг. 7

Если для материала испытываемого вала справедливы основные выражения (2) и (3), то все точки на графике (фиг. 8) будут располагаться на одной наклонной прямой, описываемой уравнением

$$\lg A_z = \lg (SV) + q \lg B_r,$$

легко получающимся из (2) или (3). В наших опытах (фиг. 8) эти выражения полностью подтвердились.



Фиг. 8

Теперь, при прямолинейном характере зависимости $\lg A_z$ от $\lg B_r$ гистерезисный показатель q определится как тангенс наклона прямой $\lg A_z = f(\lg B_r)$ к оси абсцисс, а константа гистерезиса S (или a) вычисляется на основании измерения отрезка отсекаемого этой прямой на оси ординат и в масштабе дающего величину $\lg(SV)$.

На описанной выше установке было проведено, в частности, испытание гладкого цилиндрического вала с размерами

$$d = 3{,}0 \text{ см}, \quad l = 89{,}5 \text{ см},$$

изготовленного из мягкой нормализованной стали состава 0,07% C; 0,13% Mn; 0,15% Si.

Жесткость вала $c = 0{,}712 \cdot 10^5$ *кгсм*. Частота свободных крутильных колебаний системы вал—маховик (фиг. 1) — 36,8 гц или 2208 цикл/мин.

В описываемых опытах начальные амплитуды колебаний маховика задавались в интервале от 10 до 75 минут, что соответствовало величинам амплитуд касательных напряжений в валу в пределах от 40 до 300 *кг/см*^{2}. Обмер осциллограмм производился с помощью инструментального микроскопа.

Для оценки величины сопротивления воздуха при колебаниях маховика авторы воспользовались приемом, примененным ранее с аналогичной целью в работе Е. Лунца [2]. Якори маховика (фиг. 2) снабжались крыльями из тонкой жести. Эти крылья имели такую же форму и были расположены на том же расстоянии от оси маховика, как и сами якори. Поэтому крылья испытывали воздушное сопротивление такого же характера, что и якори. Были изготовлены три пары крыльев одинаковой длины (в радиальном направлении) и различной высоты. При присоединении этих крыльев лобовая площадь якорей изменялась, соответственно, в полтора, два и два с половиной раза. Были сняты четыре осциллограммы затухающих колебаний маховика с одинаковой начальной амплитудой Φ_0, без крыльев на якорях и с каждой из пар крыльев. В результате обработки осциллограмм, описанным выше способом были получены четыре графика, аналогичные фиг. 7. Эти графики оказались полностью (в пределах точности опытов) совпадающими между собою, что свидетельствует о ничтожно малой роли сопротивления воздуха в затухании свободных колебаний в опытной установке.

Обработкой графика на фиг. 8 получены следующие значения гистерезисных характеристик для материала исследованного вала

$$q = 2{,}5,$$

$$S = 17{,}4 \cdot 10^{-10} \frac{\text{кгсм}}{\text{см}^3}, \qquad a = 13{,}7 \cdot 10^{-10} \frac{\text{кгсм}}{\text{см}^3}.$$

В известной нам литературе нет данных по коэффициентам гистерезисного демпфирования для исследованной нами стали. Сравнение результатов наших опытов с данными других исследователей оказывается поэтому затруднительным, тем более, что уже давно установлена сильная зависимость гистерезисных показателей от состава и термообработки стали [3]. Для грубого сравнения мы можем воспользоваться только данными Льюиса, который для стали с составом 0,17% C; 0,24% Mn; 0,02% Si приводит, на основании опытов Роветта, следующие цифры [4]

$$q = 2{,}3,$$

$$a = 15{,}85 \cdot 10^{-10} \text{ или } S = 20{,}2 \cdot 10^{-10}.$$

Очевидно, что для надежной оценки гистерезисных потерь в валу рассчитываемой установки необходимо опытное определение коэффициентов S, a и q для стали, из которой выполнен вал этой установки, например, по методике, изложенной в настоящей статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаталов К. Т. Вопросы экспериментальных исследований крутильных колебаний валов двигателей. Сб. „Динамика и прочность коленчатых валов". АН СССР, М. Л., 1948.
2. Лунц Е. Б. О затуханиях при крутильных колебаниях. ПММ, т. I, в. 3, 1938.
3. S. Dorey. Elastic Hysteresis in Crankshaft Steels. Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 123, 1932.
4. F. Lewis. Torsional Vibration in the Diesel Engine. Trans. Soc. Nav. Arch. and Mar. Eng., Vol. 33, 1925.