Math-Net.Ru
All Russian mathematical portal

D. Steinhaus, On the determination of steam consumption by means of a heated filament, *Avtomat. i Telemekh.*, 1936, Issue 2, 43–51

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
http://www.mathnet.ru/eng/agreement

Download details:
IP: 37.112.128.61
September 24, 2021, 15:37:14

ОБ ИЗМЕРЕНИИ РАСХОДА ПАРА МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ ПРОВОЛОЧКИ

Инж. **Дм. Штейнгауз**

On the Determination of Steam Consumption by means of a heated Filament

D Steinhaus

Для автоматического подчинения режима работы топки режиму нагрузки котла необходимы чувствительные приборы, которые, реагируя на изменение расхода пара, воздейетвовали бы на систему подачи.

Для целей автоматизации котельных проф. Кулебакиным был предложен метод нагретой проволочки.

Автор дает описание сущности метода и постановки проведенного эксперимента в котельной лаборатории МЭИ.

Далее автор приводит кривые зависимости сопротивления нити от расхода пара при разных значениях тока.

В заключение автор подчеркивает возможность применения метода нагретой проволочки для измерения расхода пара, а также чувствительности метода, возрастающей с увеличением рабочего тока и падающей с увеличением расхода пара. Практическая пригодность медота должна определяться необходммой величиной чувствительности. При этом автор указывает на желательность проведения широко развернутых экспериментальных исследований.

In order to establish an automatic response between the rate of stoking and the load on a boiler, sensitive instruments are needed which, responding to the slightest change of the steam consumption, will immediately correct the feeding system.

A method based on the use of a heated filament for the automatic control of boiler rooms has been suggested by prof. Kulebiakin.

The author describes the method and gives some data obtained in a practical test carried out in the boiler room of the Moscow Institute of Energetics.

Diagrams are given showing the relationship between the resistance of the heated filament at different current intensities and the steam consumption.

The method proved to be quite satisfactory, its sensitivity increasing with the operating current and decreasing as steam consumption increases. The adequacy of the method depends of the sensitiveness required in any given case.

In conclusion, the author emphasizes the desirability of further experimental research on a larger scale.

Введение

Для автоматического подчинения режима работы топки режиму нагрузки котла необходимы чувствительные органы, которые могли бы отзываться на изменения расхода пара и воздействовать на систему подачи топлива.

В чувствительных органах и устройствах для передачи первичных импульсов исполнительным аппаратам в современных установках автоматизации котельных играют существенную роль инертные и подчас мало надежные механические элементы.[1]

Руководителем электроаппаратной лабаратории МЭИ д-ром технических наук проф. В. С. Кулебакиным было предложено исполь-

[1] См., например, Сорокин, Автоматическое регулирование в котельных установках, 1933 г.

зовать для целей автоматизации котельных метод нагретой проволочки.

Этот метод, благодаря отсутствию в чувствительном органе инертных механических частей и возможности установить непосредственную связь между расходом пара и электрическими величинами, обещает облегчение всей системы автоматизации.

Насколько можно судить по имеющейся литературе, метод нагретой проволочки применялся исключительно для измерения скоростей воздуха. Для выяснения возможности применения его для целей автоматизации котельных агрегатов электроаппаратной лабораторией были проведены эксперименты при любезном содействии котельной лаборатории МЭИ.

Не задаваясь широкими целями разработки полной системы автоматизации котельных, электроаппаратная лаборатория ограничила свои задачи только принципиальным выяснением возможности применения метода нагретой проволочки для построения чувствительного органа — паромера.

Одновременно с постановкой эксперимента была сделана попытка применить теоретические положения, разработанные Кингом, для расчетного предопределения поведения нагретой проволочки при обтекании ее паром. При этом следует отметить, что приведенные ниже выводы, основанные на теоретических выкладках Кинга, не могут быть безоговорочно приложены к исследованию охлаждения нити в атмосфере пара. Для этого необходимо приравнять течение пара к безвихревому движению идеальной жидкости, что, очевидно, является лишь более или менее грубым приближением к истинной картине физического процесса.

Метод нагретой проволочки (термо-анемометр, hot-wire anemometer, Hitzdrahtmethode) впервые был предложен для измерения скоростей воздушного потока в 1902 году Шекспиром (Shakespeare).[1]

Сущность метода заключается в том, что нагреваемая электрическим током проволочка встраивается в воздушный поток, скорость которого надлежит измерить, и в зависимости от скорости потока охлаждается с большей или меньшей интенсивностью.

Благодаря тому, что коэффициенты теплопередачи являются функцией скорости потока, температура проволочки, по которой протекает неизменный ток, может служить мерой этой скорости. О величине же температуры можно судить по величине омического сопротивления проволочки.

Иная модификация метода получается, если поддерживать неизменным сопротивление и, следовательно, температуру проволочки, меняя для этого значение тока в ее цепи.

На практике применяются оба способа. При этом способ постоянного сопротивления часто предпочитается вследствие несколько бо́льших практических удобств. Однако, способ постоянного тока, по исследованиям Simmons and Bailey, дает большую чувствительность. В виду того, что изложенное ниже экспериментальное исследование было проведено в условиях постоянства тока, мы остановимся несколько подробнее на анализе именно этого способа.

При установившемся состоянии температуру и сопротивление нити (проволочки) можно определить, исходя из условия равенства количества тепла, выделяемого в проволочке и отдаваемого ею за единицу времени:

$$Q_1 = Q_2. \qquad (1)$$

[1] Подробности об историческом развитии и применении метода, а также библиографию см. статьи: King L. V., Journal of Franclin Institute за 1916 г.; Burgers, Handbuch der Experimentalphysik, Bd. 4; и книгу Ower, The measurement of the air flov, 1933.

Левая часть равенства (1)—количество тепла, выделяемое за единицу времени,—может быть выражена, как

$$Q_1 = kJ^2R = kJ^2\frac{l}{q}\rho_0(1+\beta\vartheta_н) \qquad (2)$$

формуле (2) приняты следующие обозначения:

J — ток в нити в амперах,
R — сопротивление нити в омах,
l — длина нити в метрах,
q — сечение нити в квадратных миллиметрах,
ρ_0 — удельное сопротивление нити при 0°С в $\frac{\Omega\text{-}мм^2}{м}$
$\vartheta_н$ — температура нити в °С, применяемая по всей толщине нити,
β — температурный коэффициент сопротивления в $\frac{1}{°C}$,
k — коэффициент, зависящий от единиц, выбранных для выражения количества тепла и времени.

Количество отдаваемого за единицу времени тепла Q_2 может быть определено, если известны коэффициент теплопередачи, охлаждаемая поверхность и перепад температуры между нагретой проволочкой и окружающей средой:

$$Q_2 = \alpha F\vartheta_н - \vartheta_0 \qquad (3)$$

где α — коэффициент теплопередачи, выражаемой обычно в килокалориях на кв. метр-час-градус Цельзия (ккал/м^2·ч·град),

F — поверхность охлаждения в м^2,
ϑ — температура окружающей среды в °С.

Теоретическое определение коэффициента α для цилиндра, находящегося в потоке воздуха, представляющее собой довольно сложную математическую задачу, впервые было произведено французским математиком Буссинеском.[1] Решение Буссинеска дано для идеальных условий ламинарного движения несжимаемой жидкости со скоростью достаточной для того, чтобы свести на-нет изменения ее объема вследствие нагрева. Кроме того, для упрощения задачи Буссинеском сделано предположение, что обтекающая цилиндр среда имеет на поверхности раздела ту же температуру, что и сам цилиндр. Это предположение равносильно тому, что отдача тепла при неподвижной среде не учитывается, вследствие чего при малых скоростях потока нельзя ожидать хорошего совпадения результатов опыта с выкладками Буссинеска. Кинг[2] при решении той же задачи добился большего приближения к естественным условиям. Он допустил в пограничном слое скачкообразное изменение температуры и ввел в рассмотрение источники тепла, равномерно распределенные по поверхности охлаждающего цилиндра.

Коэффициент теплопередачи цо Кингу равен:

$$\alpha = 2\frac{\lambda}{d_н}\frac{Pe}{\int_0^{Pe} l^u K_0(u)\,du}, \qquad (4)$$

[1] Boussinesq. Comptes Rendus, t. 133. 1901.
[2] King L. V. Philosophical Transactions of the Royal Society, v. A214, 1914.

где α — коэффициент теплопроводности в ккал/м²·ч·°С,

$d_н$ — диаметр цилиндрической проволочки в мм²,

$K_0(u)$ — бесселева функция второго рода, нулевого порядка,

Pe — так называемый параметр Пекле.

$$Pe = \frac{cDv_0 d_н}{\lambda}, \tag{5}$$

где c — удельная теплоемкость в ккал/кг·С°,

v_0 — скорость движения среды в м/час,

D — плотность среды в кг/м².

Решая записанное в развернутом виде уравнение (1) можно выразить сопротивление R, как функцию тока J и коэффициента теплопередачи α, а следовательно, и как функцию скорости v_0.

Из уравнений (1), (2) и (3) следует, что

$$KJ^2R = \alpha F(\vartheta_н - \vartheta_0); \tag{1а}$$

$\vartheta_н$ может быть выражено через начальное сопротивление нити R_0, сопротивление R и температурный коэффициент β:

$$\vartheta_н = \frac{R - R_0}{R_0\beta} \tag{6}$$

Подстановка выражения (6) в уравнение (1а) дает

$$kJ^2R = \alpha F\left(\frac{R - R_0}{R_0\beta} - \vartheta_0\right), \tag{1б}$$

откуда

$$R = \frac{\dfrac{\alpha F}{\beta} + \alpha F\vartheta_0}{\dfrac{\alpha F}{R_0\beta} - kJ^2} = \frac{1 + \beta\vartheta_0}{\dfrac{1}{R_0} - \dfrac{kJ^2\beta}{\alpha F}}. \tag{7}$$

Для случая, когда поток охлаждающей среды протекает в цилиндрическом трубопроводе, не представляет затруднений переход от функциональной зависимости α от скорости к зависимости той же величины от удельного (часового, секундного и т. д.) расхода охлаждающей среды.

Действительно, скорость может быть выражена как

$$v_0 = \frac{4\upsilon}{D\pi d^2_т} \text{ м/час}, \tag{8}$$

где υ — расход охлаждающей среды в кг/час,

D — плотность ее в кг/м³.

$d_т$ — диаметр трубопровода в метрах.

Из уравнений (8) и (5) получается новое выражение для параметра Пекле

$$Pe = \frac{cD_0v_0d_н}{\lambda} = \frac{4\upsilon cd_н}{\lambda\pi d_т^2}. \tag{9}$$

После подстановки выражения (9) в (4) и введения последнего выражения в формулу (7) задачу определения связи между скоростью или расходом среды и сопротивлением нити можно считать в общем виде решенной. Однако, вычисление

$$\int_0^{Fe} c^u K_0(u)\, du$$

представляет значительные трудности, и для облегчения задачи целесообразно воспользоваться формулами, упрощенными Кингом.

Согласно Кингу, если обозначить $\frac{x}{\int_0^x l^x K_0(x)\, dx}$ через y, то для больших значений x будет справедливо следующее выражение:

$$y = \frac{1}{2\pi} + \sqrt{\frac{x}{2\pi}} \tag{10}$$

В случае, если значение Pe велико, а величина $\frac{1}{8Pe}$ мала по сравнению с единицей, пользуясь выражением (10), можно найти, что

$$\alpha = \frac{\lambda}{\pi d_н} + \frac{\lambda}{\pi d_н}\sqrt{2\pi Pe}. \tag{11}$$

Подставляя выражение (11) в (7), можно получить выражение для R, соответствующее большим значениям параметра Пекле:[1]

$$R = \frac{1+\beta\vartheta}{\frac{1}{R_0} - \frac{kJ^2B}{J}\cdot\frac{\pi d_н}{\lambda(1+\sqrt{2\pi Pe})}}. \tag{12}$$

Критерием пригодности выражения (12) служит произведение $v_0 d_н$. Формулы (11), (12) справедливы для величин этого произведения больших, чем 0.0187 (при v_0 b см/сек и $d_н$ в см).

Выражение (12) позволяет судить о чувствительности метода. Чувствительность может быть определена, как мера изменения величины, непосредственно поддающейся измерению, в зависимости от изменений первичной измеряемой величины. Так как при неизменном токе в цепи нити непосредственно может быть измерено ее сопротивление, то чувствительность может быть выражена производной от сопротивления по скорости или по удельному расходу среды, в зависимости от того, какая из этих величин подлежит измерению. Обе они являются линейными функциями параметра Пекле; поэтому чувствительность может быть выражена как

$$\psi = \frac{dR}{d\,Pe}, \tag{13}$$

причем переход от этого выражения к $\psi' = \frac{dR}{dv}$ или $\psi'' = \frac{dR}{dv}$ осуществляется умножением на соответствующий коэффициент.

Вводя в формулу (13) выражение для (12) и производя дифференцирование, можно видеть, что

$$\psi = \frac{dR}{dPe} = -(1+B\vartheta_0)\,\frac{kB\pi}{\sqrt{2Pe}}\,\frac{d_н F\lambda}{\left[\frac{1}{R_0}(1+\sqrt{2\pi Pe})Fe - kJ^2\beta\pi d_н\right]^2}\cdot J^2 \tag{13a}$$

[1] Как показал Кинг, для малых значений Pe выражение (4) может быть также упрощено; соответствующие формулы не приводятся нами, так как они не представляют интереса для рассматриваемого ниже эксперимента.

Для определенного трубопровода при работе со средой неизменных параметров (температуры, давления и т. д.) чувствительность, как это видно из формулы (13а), является функцией трех величин: тока J, расхода охлаждающей среды υ, и диаметра проволочки $d_н$. Для того, чтобы оттенить эту зависимость, можно переписать выражение (13а), заменяя все постоянные члены коэффициентами A, B, C, в виде

$$\psi = -A \frac{J^2}{[B - CJ^2]^2} \tag{13b}$$

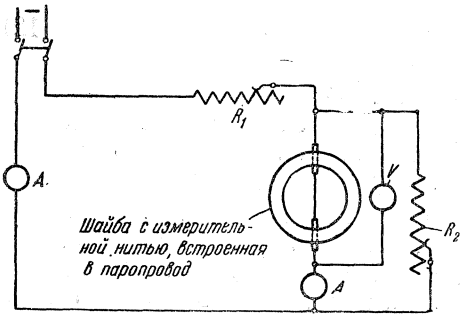
или

$$\psi = -A' \frac{\upsilon^{1/2}}{\left[B' + C' \upsilon^{3/4}\right]^2} \tag{13c}$$

или

$$\psi = -A'' \frac{d_н^{3/4}}{\left[B'' d_н + C'' d_н^{3/4}\right]^2}. \tag{13d}$$

Из выражений (13) видно, что при прочих неизменных величинах чувствительность ψ растет с увеличением тока и падает с увеличением расхода охлаждающей среды и диаметра проволочки.



Фиг. 1. Схема измерения

Из-за особенностей работы котельной лаборатории не могли быть созданы вполне благоприятные условия для проведения опытов. Это объясняется тем, что котельная вырабатывает неперегретый пар, регулирование нагрузки котла не может производиться произвольно, ошибки тепловых измерительных приборов в котельной не поддаются точному учету и т. д.

Котел, в паропроводе которого была установлена измерительная проволочка, нормально работает при давлении до 12 ата, с расходом пара до 1 000 кг/час.

Внутренний диаметр паропровода равен 96 мм.

Измерительная нить была встроена в текстолитовую шайбу, которая зажималась в месте соединения двух фланцев паропровода между клингеритовыми прокладками.

Полная длина нити составляла 65 мм; однако часть, непосредственно обтекаемая паром, была несколько меньше, так как концы нити, во избежание соединения с железом трубопровода, пришлось заизолировать фарфоровыми трубками.

В качестве нити была применена никелевая проволочка с диаметром 0.095 мм. Преимущества никеля перед другими металлами — его относительно высокая стойкость по отношению к окислению и большой температурный коэффициент. Последний обеспечивает большую чувствительность устройства.

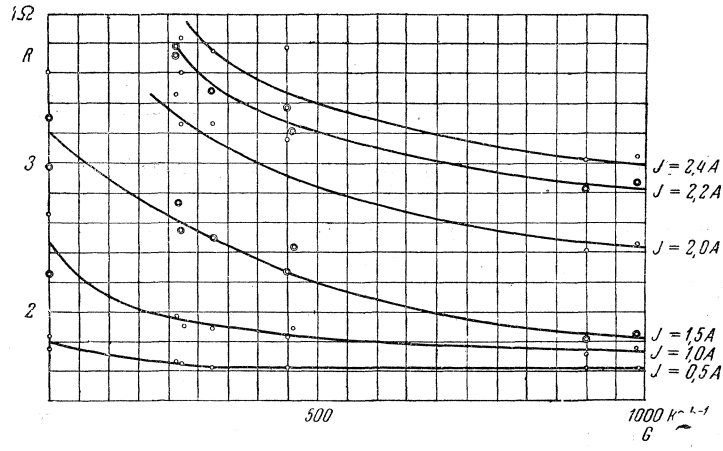
Измерение сопротивления велось по методу амперметра и вольтметра по схеме, показанной на фиг. 1. Регулирование тока в цепи нити производилось при помощи реостатов R_1 и R_2.

Назначение последнего заключалось, главным образом, в том, чтобы предохранить вольтметр от порчи в случае внезапного перегорания

нити. Сопротивление его было подобрано таким, что повышение напряжения на зажимах вольтметра при внезапном обрыве или перегорании нити не могло достигнуть опасных для прибора значений.

Сопротивления измерительных приборов (вольтметров) были подобраны достаточно большими, чтобы в пределах одно-двухпроцентной точности можно было пренебречь как влиянием ответвления тока в вольтметр, так и влиянием соединительных проводов.

Сопротивление шпилек (латунных), проводящих ток сквозь шайбу к нити, по своей незначительности также не должно было сказаться на точности опыта, однако необходимость изолировать концы нити, несомненно, привела к некоторому искажению результатов, оставив возможным сравнение только характера опытных кривых с расчетными. Для контрольного измерения расхода пара применялся паромер системы „Ascania", основанный на отборе известной части пара из



Фиг. 2. Зависимость сопротивления нити от расхода пара

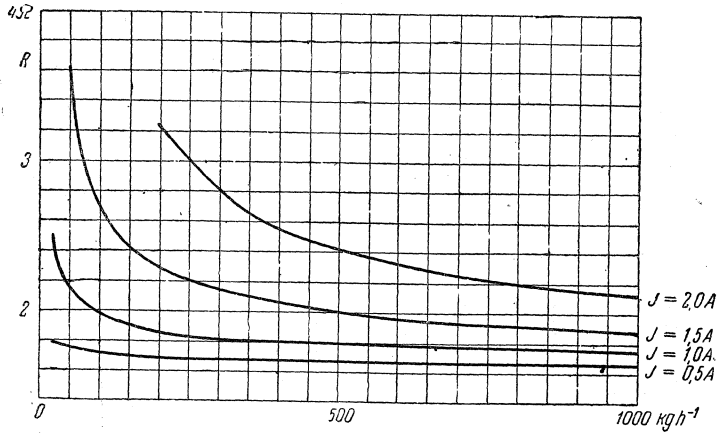
главного паропровода с последующей конденсацией и измерением количества конденсата мензуркой. Попутно с измерением расхода пара по прибору на тепловом щите котла регистрировалось давление. Кроме того, было проделано несколько контрольных измерений влажности пара калориметром системы Карпентера.

Результаты эксперимента и сравнение их с результатами подсчетов

На фиг. 2 представлены полученные непосредственно из опыта кривые зависимости сопротивления нити от расхода пара при разных значениях тока. Эти кривые показывают, что сопротивление может служить мерой расхода пара и что чувствительность растет с увеличением тока и падает по мере роста расхода пара. Из них же видно, что метод постоянного тока обладает существенным недостатком — он не обеспечивает успешного измерения при больших колебаниях нагрузки. Действительно, если работать на малых токах, то при больших расходах чувствительность становится малой. Работать же с большими токами можно только при относительно больших расходах, так как в противном случае возникает опасность перегрева и перегорания нити. Впрочем, при очень больших расходах пара чувствительность даже при больших токах становится незначительной.

Для сравнения с данными опыта были проведены некоторые подсчеты по формулам Кинга. При этом результаты подсчета были приведены к длине нити в ее в первоначальном исполнении, т. е. без учета изолирующих покрытий ($l = 65$ мм).

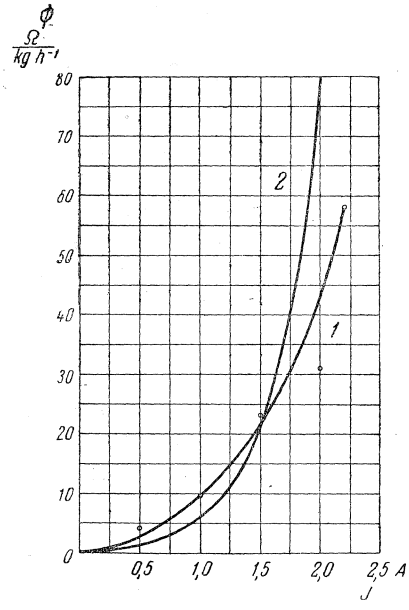
На фиг. 3 показаны расчетные кривые зависимости сопротивления R, подсчитанного по формуле (7), от расхода пара v. На фиг. 4 и 5 дано сравнения чувствительности опытной (кривые *1*) и расчетной (кривые *2*, по формуле 13) в функции тока J и расхода пара v. Как видно из



Фиг. 3. Зависимость сопротивления R от расхода пара v (по формулам Кинга)

этих кривых, характер изменения чувствительности, полученный из опыта, совпадает с результатами расчета.

На фиг. 6 показано подсчитанное по формуле (13) изменение чувствительности в зависимости и от диаметра нити.



Фиг. 4. Зависимость чувствительности ψ от тока J Кривая *1* — из опыта, кривая *2* — по расчету

Рассмотрение фиг. 3—6 дает возможность сделать следующие выводы:

1) экспериментальное исследование подтверждает принципиальную возможность применения метода нагретой проволочки для измерения расхода пара;

2) в соответствии с теоретическим рассмотрением опыт показывает, что чувствительность метода возрастает с увеличением рабочего тока и падает с увеличением расхода пара;

3) практическая пригодность метода в значительной степени должна определяться необходимой величиной чувствительности. Следует отметить, что в паропроводах стандартных котельных установок скорости пара на много превышают скорости, использованные в проделанных опытах, доходя до 40 м/сек против 6—7 м/сек для котельной МЭИ.

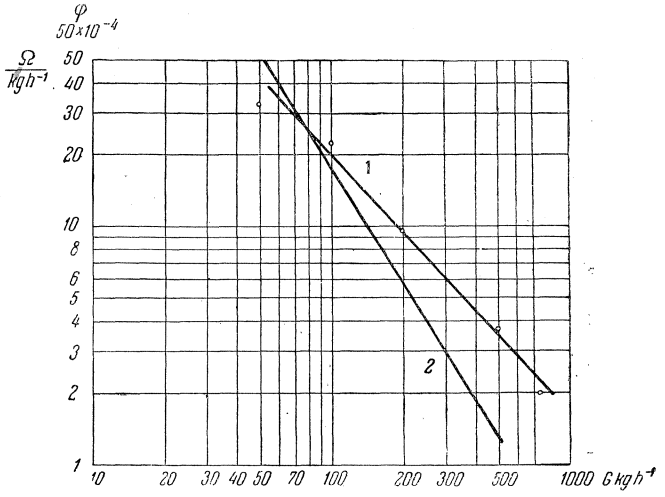
Поэтому при практическом выполнении параметров с нагретой нитью может оказаться необходимым искусственное местное снижение скоростей пара.

4) Для более строгого суждения о пригодности теоретических положений Кинга к определению коэффициентов теплопередачи для случая охлаждения нагретой нити паром и для разрешения вопроса о практической пригодности метода желательно проведение широко развернутых, главным образом экспериментальных, исследований.

Значение величин:

При подсчетах $R = \varphi(\upsilon)$, $\psi = \varphi(\upsilon)$, $\psi = \varphi(J)$ и $\psi = \varphi(d_н)$ были приняты следующие числовые значения отдельных величин:

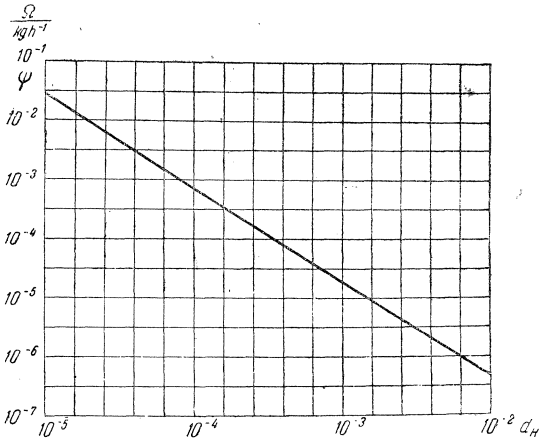
$\beta = 0.007 \frac{1}{°C}$ (среднее значение по данным Германского государственного физико-технического института),



Фиг. 5. Зависимость чувствительности φ от расхода пара υ. Кривая *1* — из опыта, кривая *2* — по расчету

$\vartheta_0 = 183.2°$ C — (соответственно среднему за время опытов давлению пара, по таблицам Шюле),

$\rho_0 = 0.078 \frac{\Omega\text{-мм}^2}{\text{м}}$ (по измерениям для данного образца проволочки).



Фиг. 6. Зависимость ψ от $d_н$, вычисленная по формулам Кинга. При $J = 1$ А и $\upsilon = 200$ кг/ч с

$K = \frac{0.24 \cdot 3600}{1000} = 0.864$ (по выбранным единицам количества тепла в кило-калориях и времени в часах),

$\lambda = 0.0248$ ккал/м-ч °C (по Греберу),

$\gamma = 0.62$ ккал/кг. °C (по Тен-Бошу).