*Лабораторная работа 1*

ПРОЦЕСС ИСТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО

Цель работы: исследовать зависимость массового расхода воздуха через суживающееся сопло от отношения давления за соплом к давлению перед соплом.

**1.1. Основные теоретические положения**

Канал, в котором с уменьшением давления скорость газового потока возрастает, называется соплом, канал, в котором скорость газа уменьшается, а давление возрастает, – диффузором. Поскольку назначением сопла является преобразование потенциальной энергии рабочего тела в кинетическую, при анализе происходящего в сопле процесса начальная скорость потока *с*1 не является существенной, и ее можно принять равной нулю. Тогда уравнение первого закона термодинамики при адиабатном истечении рабочего тела через сопло принимает вид:

, (1)

где *с*2 – теоретическая скорость потока в выходном сечении сопла, м/с;

*Р*1 – начальное давление рабочего тела, МПа;

*Р*2 – давление среды, в которую происходит истечение рабочего тела, МПа.

Разность энтальпий (*h*1– *h*2) при истечении рабочего тела через сопло называется располагаемым адиабатным теплоперепадом, обозначается через Δ*h*0 и соответствует тому максимуму кинетической энергии, который может быть получен лишь в идеальных условиях истечения, а фактически из-за неизбежных потерь, связанных с необратимостью процесса, никогда не достигается.

Исходя из равенства  теоретическую скорость истечения рабочего тела через сопло в рассматриваемом случае можно рассчитать по фор- муле, м/с:

, (2)

где Δ*h*0 выражено в кДж/кг.

Формула (2) справедлива для любого рабочего тела.

Рассмотрим адиабатное истечение газа через суживающееся сопло из резервуара достаточно большого объема, в котором изменением давления можно пренебречь (*Р*1 ≈ const).

В резервуаре газ имеет параметры *Р*1, *Т*1, *v*1, а на выходе из сопла – *Р*2, *Т*2, *v*2, *с*2. Давление среды, в которую происходит истечение газа, обозначим *Р*0. Основной характеристикой процесса истечения является отношение конечного давления к начальному: .

В зависимости от значения отношения давлений можно выделить три характерных режима истечения газа: при β > βкр – докритический, при β = βкр – критический и при β < βкр – сверхкритический.

Значение β, при котором расход газа достигает максимума, называется критическим и вычисляется по уравнению:

. (3)

Величина βкр, как и показатель адиабаты *k*, является физической константой газа, т. е. одной из характеристик его физических свойств.

Скорость газа на выходе из суживающегося сопла рассчитывается по формуле, м/с:

при β > βкр , *Р*2 = *Р*0 –

; (4)

при β = βкр, *Р*2 = *Р*кр = *Р*1βкр = *Р*0 и β < βкр, *Р*2 = *Р*кр = *Р*1βкр  > *Р*0 –

, (5)

или, подставив значение βкр из формулы (4) в формулу (5), получим:

. (6)

Тогда при условиях адиабатического истечения рабочего тела

, (7)

где *а* – местная скорость звука в выходном сечении сопла.

Формула (7) показывает, что критическая скорость истечения газа из сопла равна скорости распространения звуковой волны в этом газе при его параметрах *Р*кр и *v*кр, т. е. местной скорости звука в выходном сечении сопла. Это и есть физическое объяснение тому, что при снижении внешнего давления *Р*0 ниже *Р*кр скорость истечения не изменяется, а остается равной *с*кр.

В отличие от адиабатного действительный процесс истечения реального газа происходит при трении частиц газа между собой и о стенки канала. При этом работа, затрачиваемая на преодоление сил трения, преобразуется в теплоту, в результате чего температура и энтальпия газа в выходном сечении канала возрастают.

Истечение газа с трением становится необратимым процессом и сопровождается увеличением энтропии.

Процессы расширения газа 1 – 2 при истечении без трения и 1 – 2д при истечении с трением представлены в *h*, *s*-координатах на рис. 1.1. При одинаковом перепаде давлений (*Р*1 – *Р*2) действительный теплоперепад () меньше располагаемого (), в результате этого действительная скорость истечения газа оказывается меньше теоретической.

|  |  |
| --- | --- |
| 2д  Δ*h*д  0  Δ*h*0  Рис. 1.1. Графическое представление адиабатного и действительного  процессов истечения газа  в *h*, *s*-диаграмме | Отношение разности располагаемого и действительного теплоперепадов (потери теплоперепада) к располагаемому теплоперепаду называется коэффициентом потери энергии:  , (8)  отсюда  . (9)  Скоростным коэффициентом сопла называется отношение действитель- |

ной скорости истечения к теоретической:

. (10)

Скоростной коэффициент сопла, учитывающий уменьшение действительной скорости по сравнению с теоретической, в современных соплах равен 0,95 – 0,98.

Отношение действительного теплоперепада  к теоретическому  называется коэффициентом полезного действия канала:

. (11)

С учетом выражений (8) и (10)

. (12)

**1.2. Схема и описание установки**

Воздух от ресивера поршневого компрессора (рис. 1.2) по трубопроводу поступает через измерительную диафрагму 1 к суживающемуся соплу 2.



Рис. 1.2. Схема установки

В камере 3 за соплом, куда происходит истечение, можно устанавливать необходимое давление выше барометрического путем изменения проходного сечения для воздуха с помощью вентиля 5. Затем воздух направляется в ат-мосферу. Сопло выполнено с плавным сужением. Диаметр выходного сечения сопла равен 2,15 мм. Суживающийся участок сопла заканчивается коротким цилиндрическим участком с отверстием для отбора и регистрации давления  и температуры  воздуха в выходном сечении сопла (прибор 12). Измерительная диафрагма 1 представляет собой тонкий диск с круглым отверстием по центру и вместе с дифманометром 7 служит для измерения расхода воздуха.

Температура и давление воздуха в окружающей среде измеряются соответственно термометром 8 и чашечным ртутным барометром 6.

Температура и давление воздуха перед измерительной диафрагмой замеряются с помощью комбинированного прибора 9, а перед соплом – прибором 10. Давление за соплом измеряется манометрической частью комбинированного прибора 11. Все показания приборов заносятся в протокол наблюдений (табл. 1.1 – 1.10).

Таблица 1.1

Протокол наблюдений (Вариант 1)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозна-  чение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Температура окружающей среды, °С | *t*окр | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| Барометрическое давление, мбар | *В* | 993 | 993 | 993 | 993 | 993 |
| Показание манометра перед диафрагмой, кгс/см2 | *Р*м | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 |
| Показание манометра перед соплом, кгс/см2 | *Р*1м | 10,1 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| Показание манометра в выходном сечении  сопла, кгс/см2 |  | 9,1 | 8,1 | 7,1 | 6,1 | 5,0 |
| Показание манометра за соплом, кгс/см2 | *Р*2м | 9,1 | 8,1 | 7,1 | 6,1 | 5,0 |
| Показания дифманометра, мм вод. ст. | *Н* | 244 | 435 | 574 | 661 | 696 |
| Температура перед диафрагмой, °С | *t* | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| Температура перед соплом, °С | *t*1 | 17,8 | 17,8 | 17,8 | 17,8 | 17,8 |
| Температура в выходном сечении сопла, °С |  | 11,8 | 5,4 | -1,6 | -9,2 | -17,6 |

Таблица 1.2

Протокол наблюдений (Вариант 2)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозна-  чение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Температура окружающей среды, °С | *t*окр | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| Барометрическое давление, мбар | *В* | 1088 | 1088 | 1088 | 1088 | 1088 |
| Показание манометра перед диафрагмой, кгс/см2 | *Р*м | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 |
| Показание манометра перед соплом, кгс/см2 | *Р*1м | 8,3 | 8,3 | 8,2 | 8,2 | 8,2 |

Окончание табл. 1.2

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Показание манометра в выходном сечении  сопла, кгс/см2 |  | 7,5 | 6,6 | 5,8 | 5,0 | 4,1 |
| Показание манометра за соплом, кгс/см2 | *Р*2м | 7,5 | 6,6 | 5,8 | 5,0 | 4,1 |
| Показания дифманометра, мм вод. ст. | *Н* | 201 | 361 | 478 | 554 | 588 |
| Температура перед диафрагмой, °С | *t* | 22,0 | 22,0 | 22,0 | 22,0 | 22,0 |
| Температура перед соплом, °С | *t*1 | 20,6 | 20,6 | 20,6 | 20,6 | 20,6 |
| Температура в выходном сечении сопла, °С |  | 14,8 | 8,5 | 1,7 | -5,7 | -13,8 |

Таблица 1.3

Протокол наблюдений (Вариант 3)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозна-  чение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Температура окружающей среды, °С | *t*окр | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| Барометрическое давление, мбар | *В* | 907 | 907 | 907 | 907 | 907 |
| Показание манометра перед диафрагмой, кгс/см2 | *Р*м | 11,1 | 11,1 | 11,1 | 11,1 | 11,1 |
| Показание манометра перед соплом, кгс/см2 | *Р*1м | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 11,0 |
| Показание манометра в выходном сечении  сопла, кгс/см2 |  | 9,9 | 8,8 | 7,7 | 6,6 | 5,5 |
| Показание манометра за соплом, кгс/см2 | *Р*2м | 9,9 | 8,8 | 7,7 | 6,6 | 5,5 |
| Показания дифманометра, мм вод. ст. | *Н* | 267 | 475 | 625 | 718 | 752 |
| Температура перед диафрагмой, °С | *t* | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 16,0 |
| Температура перед соплом, °С | *t*1 | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 15,0 |
| Температура в выходном сечении сопла, °С |  | 9,0 | 2,5 | -4,5 | -12,2 | -20,7 |

Таблица 1.4

Протокол наблюдений (Вариант 4)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозна-  чение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Температура окружающей среды, °С | *t*окр | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Барометрическое давление, мбар | *В* | 1044 | 1044 | 1044 | 1044 | 1044 |
| Показание манометра перед диафрагмой, кгс/см2 | *Р*м | 9,8 | 9,8 | 9,8 | 9,8 | 9,8 |
| Показание манометра перед соплом, кгс/см2 | *Р*1м | 9,8 | 9,8 | 9,8 | 9,7 | 9,7 |
| Показание манометра в выходном сечении  сопла, кгс/см2 |  | 8,8 | 7,8 | 6,9 | 5,9 | 4,9 |
| Показание манометра за соплом, кгс/см2 | *Р*2м | 8,8 | 7,8 | 6,9 | 5,9 | 4,9 |
| Показания дифманометра, мм вод. ст. | *Н* | 237 | 424 | 560 | 646 | 682 |
| Температура перед диафрагмой, °С | *t* | 12,0 | 12,0 | 12,0 | 12,0 | 12,0 |
| Температура перед соплом, °С | *t*1 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 |
| Температура в выходном сечении сопла, °С |  | 5,4 | -0,8 | -7,5 | -14,9 | -23 |

Таблица 1.5

Протокол наблюдений (Вариант 5)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозна-  чение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Температура окружающей среды, °С | *t*окр | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Барометрическое давление, мбар | *В* | 968 | 968 | 968 | 968 | 968 |
| Показание манометра перед диафрагмой, кгс/см2 | *Р*м | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
| Показание манометра перед соплом, кгс/см2 | *Р*1м | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |

Окончание табл. 1.5

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Показание манометра в выходном сечении  сопла, кгс/см2 |  | 7,7 | 6,8 | 6,0 | 5,1 | 4,3 |
| Показание манометра за соплом, кгс/см2 | *Р*2м | 7,7 | 6,8 | 6,0 | 5,1 | 4,3 |
| Показания дифманометра, мм вод. ст. | *Н* | 207 | 369 | 488 | 564 | 596 |
| Температура перед диафрагмой, °С | *t* | 12,0 | 12,0 | 12,0 | 12,0 | 12,0 |
| Температура перед соплом, °С | *t*1 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 |
| Температура в выходном сечении сопла, °С |  | 5,5 | -0,7 | -7,4 | -14,7 | -22,8 |

Таблица 1.6

Протокол наблюдений (Вариант 6)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозна-  чение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Температура окружающей среды, °С | *t*окр | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Барометрическое давление, мбар | *В* | 920 | 920 | 920 | 920 | 920 |
| Показание манометра перед диафрагмой, кгс/см2 | *Р*м | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| Показание манометра перед соплом, кгс/см2 | *Р*1м | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| Показание манометра в выходном сечении  сопла, кгс/см2 |  | 7,2 | 6,4 | 5,6 | 4,8 | 4,0 |
| Показание манометра за соплом, кгс/см2 | *Р*2м | 7,2 | 6,4 | 5,6 | 4,8 | 4,0 |
| Показания дифманометра, мм вод. ст. | *Н* | 195 | 348 | 460 | 532 | 562 |
| Температура перед диафрагмой, °С | *t* | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| Температура перед соплом, °С | *t*1 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 |
| Температура в выходном сечении сопла, °С |  | 12,8 | 6,5 | -0,4 | -7,8 | -16,1 |

Таблица 1.7

Протокол наблюдений (Вариант 7)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозна-  чение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Температура окружающей среды, °С | *t*окр | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| Барометрическое давление, мбар | *В* | 964 | 964 | 964 | 964 | 964 |
| Показание манометра перед диафрагмой, кгс/см2 | *Р*м | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 |
| Показание манометра перед соплом, кгс/см2 | *Р*1м | 11,3 | 11,2 | 11,2 | 11,2 | 11,2 |
| Показание манометра в выходном сечении  сопла, кгс/см2 |  | 10,2 | 9,0 | 7,9 | 6,8 | 5,6 |
| Показание манометра за соплом, кгс/см2 | *Р*2м | 10,2 | 9,0 | 7,9 | 6,8 | 5,6 |
| Показания дифманометра, мм вод. ст. | *Н* | 272 | 485 | 639 | 734 | 770 |
| Температура перед диафрагмой, °С | *t* | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| Температура перед соплом, °С | *t*1 | 16,9 | 16,9 | 16,9 | 16,9 | 16,9 |
| Температура в выходном сечении сопла, °С |  | 10,8 | 4,3 | -2,7 | -10,4 | -19,0 |

Таблица 1.8

Протокол наблюдений (Вариант 8)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозна-  чение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Температура окружающей среды, °С | *t*окр | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| Барометрическое давление, мбар | *В* | 920 | 920 | 920 | 920 | 920 |
| Показание манометра перед диафрагмой, кгс/см2 | *Р*м | 9,6 | 9,6 | 9,6 | 9,6 | 9,6 |
| Показание манометра перед соплом, кгс/см2 | *Р*1м | 9,6 | 9,6 | 9,6 | 9,5 | 9,5 |

Окончание табл. 1.8

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Показание манометра в выходном сечении  сопла, кгс/см2 |  | 8,6 | 7,7 | 6,7 | 5,8 | 4,8 |
| Показание манометра за соплом, кгс/см2 | *Р*2м | 8,6 | 7,7 | 6,7 | 5,8 | 4,8 |
| Показания дифманометра, мм вод. ст. | *Н* | 232 | 414 | 546 | 629 | 661 |
| Температура перед диафрагмой, °С | *t* | 19,0 | 19,0 | 19,0 | 19,0 | 19,0 |
| Температура перед соплом, °С | *t*1 | 17,8 | 17,8 | 17,8 | 17,8 | 17,8 |
| Температура в выходном сечении сопла, °С |  | 11,8 | 5,4 | -1,6 | -9,2 | -17,7 |

Таблица 1.9

Протокол наблюдений (Вариант 9)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозна-  чение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Температура окружающей среды, °С | *t*окр | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| Барометрическое давление, мбар | *В* | 919 | 919 | 919 | 919 | 919 |
| Показание манометра перед диафрагмой, кгс/см2 | *Р*м | 10,6 | 10,6 | 10,6 | 10,6 | 10,6 |
| Показание манометра перед соплом, кгс/см2 | *Р*1м | 10,6 | 10,5 | 10,5 | 10,5 | 10,5 |
| Показание манометра в выходном сечении  сопла, кгс/см2 |  | 9,5 | 8,5 | 7,4 | 6,4 | 5,3 |
| Показание манометра за соплом, кгс/см2 | *Р*2м | 9,5 | 8,5 | 7,4 | 6,4 | 5,3 |
| Показания дифманометра, мм вод. ст. | *Н* | 256 | 456 | 601 | 690 | 724 |
| Температура перед диафрагмой, °С | *t* | 21,0 | 21,0 | 21,0 | 21,0 | 21,0 |
| Температура перед соплом, °С | *t*1 | 19,7 | 19,7 | 19,7 | 19,7 | 19,7 |
| Температура в выходном сечении сопла, °С |  | 13,6 | 7,1 | 0,0 | -7,8 | -16,4 |

Таблица 1.10

Протокол наблюдений (Вариант 10)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозна-  чение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Температура окружающей среды, °С | *t*окр | 11,6 | 11,6 | 11,6 | 11,6 | 11,6 |
| Барометрическое давление, мбар | *В* | 976 | 976 | 976 | 976 | 976 |
| Показание манометра перед диафрагмой, кгс/см2 | *Р*м | 11,6 | 11,6 | 11,6 | 11,6 | 11,6 |
| Показание манометра перед соплом, кгс/см2 | *Р*1м | 11,6 | 11,6 | 11,6 | 11,6 | 11,6 |
| Показание манометра в выходном сечении  сопла, кгс/см2 |  | 10,5 | 9,3 | 8,2 | 7,0 | 5,8 |
| Показание манометра за соплом, кгс/см2 | *Р*2м | 10,5 | 9,3 | 8,2 | 7,0 | 5,8 |
| Показания дифманометра, мм вод. ст. | *Н* | 281 | 501 | 660 | 757 | 794 |
| Температура перед диафрагмой, °С | *t* | 17,0 | 17,0 | 17,0 | 17,0 | 17,0 |
| Температура перед соплом, °С | *t*1 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 15,9 |
| Температура в выходном сечении сопла, °С |  | 9,9 | 3,4 | -3,6 | -11,3 | -19,8 |

**1.3. Обработка результатов измерений**

1) Атмосферное давление рассчитывается с учетом температурного расширения столбика ртути барометра по формуле, Па:

. (13)

2) Перевод показаний образцовых манометров *Р*м, *Р*1м,  и *Р*2м в абсолютные значения давления выполняется по уравнению, Па:

, (14)

где *Р*м*j* – показания одного из четырех манометров (см. табл. 1.11 – 1.10).

3) Перепад давления воздуха на диафрагме вычисляется по формуле, Па:

, (15)

где  = 1000 кг/м3 – плотность воды в *U*-образном вакуумметре.

4) Плотность воздуха по состоянию перед диафрагмой рассчитывается по выражению, кг/м3:

. (16)

5) Действительный расход воздуха через диафрагму (через сопло) вычисляется по формуле, кг/с:

. (17)

6) Теоретическая скорость истечения в выходном сечении сопла рассчитывается по уравнению, м/с:

. (18)

7) Теоретическое значение температуры в выходном сечении сопла рассчитывается из условия адиабатного процесса истечения по формуле, К:

. (19)

8) Значения энтальпии воздуха в сечениях на входе *h*1 и на выходе *h*2 из сопла определяются по общему уравнению, кДж/кг:

*hj*= *cp* (*Тj* – 273), (20)

где *ср*= 1,006 кДж/(кг⋅К) – теплоемкость воздуха при постоянном давлении;

*Тj* – температура в рассматриваемом сечении, К;

*j* – индекс рассматриваемого сечения.

Значение β принимается по результатам расчета (табл. 6) для конкретного опыта, когда режим истечения докритический, т. е. β > βкр; для всех остальных опытов (режим истечения критический или закритический) значение β принимается равным значению βкр (независимо от данных табл. 6) и определяется в зависимости от показателя адиабаты *k* (для воздуха *k* = 1,4).

9) Действительный процесс истечения сопровождается увеличением энтропии и температуры  (см. рис. 1.1). Действительная скорость истечения уменьшается и может быть найдена по уравнению, м/с:

. (21)

Результаты расчетов сводятся в табл. 1.11.

По результатам расчетов построить в соответствующем масштабе график зависимости расхода газа *G*д от отношения давлений β.

Таблица 1.11

Результаты расчетов

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозна-чение | Номер опыта | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Давление перед диафрагмой, Па | *Р* |  |  |  |  |  |  |
| Давление перед соплом, Па | *Р*1 |  |  |  |  |  |  |
| Давление в выходном сечении сопла, Па |  |  |  |  |  |  |  |
| Давление за соплом, Па | *Р*2 |  |  |  |  |  |  |
| Отношение давлений | β |  |  |  |  |  |  |
| Перепад давления на диафрагме, Па |  |  |  |  |  |  |  |

О к о н ч а н и е т а б л. 1.11

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Плотность воздуха перед диафрагмой, кг/м3 | ρвозд |  |  |  |  |  |  |
| Действительный расход воздуха, кг/с | *G*д |  |  |  |  |  |  |
| Теоретическая температура в выходном  сечении сопла, К | *Т*2 |  |  |  |  |  |  |
| Действительная температура в выходном  сечении сопла, К |  |  |  |  |  |  |  |
| Теоретическая скорость истечения  рабочего тела, м/с | *с*2 |  |  |  |  |  |  |
| Действительная скорость истечения  рабочего тела, м/с | *с*2д |  |  |  |  |  |  |
| Коэффициент потери энергии |  |  |  |  |  |  |  |
| Скоростной коэффициент сопла | ϕс |  |  |  |  |  |  |
| Коэффициент полезного действия канала | ηк |  |  |  |  |  |  |

**1.4. Контрольные вопросы**

1) Почему значения теоретической и действительной температуры воздуха на выходе из сопла при истечении неодинаковы?

2) Как температура воздуха может изменяться в процессе дроссели-рования?

3) Как изменяются энтальпия и энтропия потока газа при прохождении его через диафрагму?

*Лабораторная работа 2*

ЦИКЛЫ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Ц е л ь р а б о т ы: рассчитать термодинамический цикл двигателя внутреннего сгорания (ДВС) со смешанным подводом теплоты, оценить термический КПД цикла.

**2.1. Основные теоретические положения**

Поршневыми двигателями внутреннего сгорания называют тепловые двигатели, у которых сообщение теплоты рабочему телу (газу) осуществляется путем сжигания топлива в объеме, который образован рабочим цилиндром с крышкой и поршнем. Представителями таких ДВС могут служить двигатели с самовоспламенением жидкого топлива, бензиновые и газовые двигатели.

Идеальными термодинамическими циклами ДВС являются цикл со смешанным подводом теплоты (цикл Тринклера) (рис. 2.1), цикл с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля) (рис. 2.2) и цикл с изохорным подводом теплоты (цикл Отто) (рис. 2.3).



Рис. 2.1. Идеальный цикл ДВС со смешанным подводом теплоты



Рис. 2.2. Идеальный цикл ДВС с изобарным подводом теплоты



Рис. 2.3. Идеальный цикл ДВС с изохорным подводом теплоты

В каждом цикле после адиабатного сжатия (процесс 1 – 2) рабочему телу сообщается теплота (процесс 2 – 3). Последнее производится либо по изохоре, либо по изобаре, либо по обоим этим процессам. Далее рабочее тело адиабатно расширяется до первоначального объема (процесс 3 – 4). В конечной стадии от газа отводится теплота при постоянном объеме (процесс 4 – 1).

Характеристиками рассматриваемых циклов являются степени сжатия , повышения давления газа при подводе теплоты  и предварительного расширения газа .

Термический КПД цикла со смешанным подводом теплоты (см. рис. 2.1)

, (22)

где  – тепло, подводимое в изохорном процессе;

 – тепло, подводимое в изобарном процессе;

 – тепло, отводимое в изохорном процессе;

*cv*, *сp* – изохорная и изобарная теплоемкость рабочего тела.

Подставляя приведенные выражения в формулу (22), получим:

, (23)

где 

Используя характеристики циклов ε, λ, ρ, получим

. (24)

Термический КПД цикла со смешанным подводом теплоты зависит от природы рабочего тела (значение *k*) и от характеристик цикла (ε, λ, ρ), он возрастает при увеличении ε и λ и уменьшается при увеличении ρ.

Циклы Дизеля и Отто можно рассматривать как частные случаи цикла со смешанным подводом теплоты.

При λ = 1 получаем цикл с изобарным подводом теплоты. Термический КПД этого цикла

. (25)

Термический КПД цикла с изобарным подводом теплоты зависит от значений *k*, ε, ρ, он возрастает с увеличением величины ε и с уменьшением величины ρ.

При ρ = 1 получаем цикл с изохорным подводом теплоты, его термический КПД

. (26)

Он возрастает с увеличением величины ε.

Цикл Отто является идеальным циклом для ДВС, работающих на легком жидком топливе, и для газовых, работающих на горючем газе. Цикл Тринклера является идеальным циклом для бескомпрессорных дизелей, широко использующихся на железнодорожном транспорте, а цикл Дизеля – для компрессорных дизелей, которые сегодня не эксплуатируются.

## 2.2. Термодинамический расчет цикла ДВС

## со смешанным подводом теплоты

Исходными данными для выполнения термодинамического расчета цикла ДВС со смешанным подводом теплоты являются давление *Р*1 и температура *Т*1 в начальной точке цикла; степени сжатия ε, повышения давления газа в процессе изохорного подвода теплоты λ и предварительного расширения газа ρ; показатель адиабаты рабочего тела *k* = 1,4; низшая теплота сгорания топлива = 42500 кДж/кг. Рабочим телом в дизеле является воздух. Исходные данные для выполнения расчетов выбираются в соответствии с заданным вариантом из табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Таблица числовых данных

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер  варианта | Обозначение параметра и единица измерения | | | | |
| *P*1, МПа | *T*1, К | ε | λ | ρ |
| 1 | 0,16 | 321 | 11,5 | 1,51 | 1,25 |
| 2 | 0,24 | 318 | 14,0 | 1,40 | 1,26 |
| 3 | 0,24 | 335 | 12,5 | 1,46 | 1,27 |
| 4 | 0,28 | 338 | 12,0 | 1,38 | 1,28 |
| 5 | 0,18 | 313 | 11,0 | 1,35 | 1,25 |
| 6 | 0,23 | 338 | 12,0 | 1,46 | 1,26 |
| 7 | 0,28 | 340 | 12,5 | 1,61 | 1,27 |
| 8 | 0,22 | 330 | 15,0 | 1,50 | 1,22 |
| 9 | 0,20 | 325 | 13,0 | 1,45 | 1,24 |
| 0 | 0,17 | 310 | 11,5 | 1,32 | 1,21 |

Определению подлежат

параметры рабочего тела в переходных точках цикла;

тепло, работа и изменение внутренней энергии, энтальпия и энтропия в каждом процессе;

полезная работа, подведенное и отведенное тепло в цикле, его КПД, удельный расход топлива.

Порядок расчета следующий.

1) Расчет параметров состояния рабочего тела.

Расчет параметров состояния в узловых точках цикла *i* = 1...4 (см. рис. 2.1) производится на основе уравнения состояния идеального газа

*Рivi = RTi*, (27)

где *R* – газовая постоянная рабочего тела (воздуха), *R* = 287 Дж/(кг∙К),

и уравнений соответствующих процессов с учетом конструктивных характеристик двигателя ε, λ, ρ.

Вычисление значений *Рi*, *vi*, *Ti* начинают с точки 1. Так как значения *Р*1 и *Т*1 заданы, удельный объем *v*1 определится на основе уравнения состояния, записанного для т.1, м3/кг:

*Р*1*v*1 = *RT*1. (28)

В выражении (28) и далее значение давления указывается в паскалях.

Удельный объем *v*2 определяется с учетом заданного значения степени сжатия

ε = *v*1/*v*2. (29)

Для расчета температуры *Т*2 и давления *Р*2 используются соотношения, справедливые для адиабатного процесса 1 – 2:

 , (30)

, (31)

откуда находят значения *Т*2 и *Р*2.

Давление *Рz* связано с давлением *Р*2 заданной величиной степени повышения давления газа в процессе изохорного подвода теплоты λ, т. е.

*Рz* = λ*Р*2. (32)

Расчет температуры *Тz* производится на основе закона Шарля, справедливого для изохоры 2 – *z*:

 . (33)

Удельный объем *vz*, равный объему *v*2, связан с удельным объемом *v*3 и задан степенью предварительного расширения

ρ =  . (34)

Температура *Т*3 вычисляется с использованием закона Гей-Люссака, справедливого для изобары 3 – 4 (*Р*3 = *Рz*):

. (35)

Параметры состояния рабочего тела в точке 4 вычисляются на основе соотношений для адиабатного процесса 3 – 4, с учетом, что *v*4 = *v*1:

, (36)

. (37)

Полученные значения *Р*4 и *Т*4 должны удовлетворять уравнению состояния:

*Р*4*v*4 = *RT*4. (38)

По найденным величинам *Рi* и соответствующим им значениям *vi* строится цикл дизельного двигателя в *Р*, *v*-диаграмме.

2) Расчет изменения внутренней энергии.

Вычисление изменения внутренней энергии Δ*u* в каждом из процессов *i – j* цикла производится на основе уравнения, кДж/кг:

Δ*ui–j* = 0,001*сv*(*Tj – Ti*), (39)

где *сv* = 720 Дж/(кг∙К).

Полное изменение внутренней энергии рабочего тела в цикле должно быть равно нулю.

3) Расчет изменения энтальпии.

Вычисление изменения энтальпии Δ*h* в каждом из процессов *i – j* цикла осуществляется с использованием зависимости, кДж/кг:

Δ*hi–j* = 0,001*сp*(*Tj – Ti*), (40)

где *сp* = 1007 Дж/(кг∙К).

Полное изменение энтальпии рабочего тела в цикле должно быть равным нулю.

4) Расчет тепла процессов цикла.

Вычисление количества тепла, подводимого или отводимого в любом процессе цикла, проводится по формуле, кДж/кг:

*qi–j =* 0,001*сi–j*(*Tj – Ti*), (41)

где теплоемкость *сi–j* определяется характером теплового процесса: для адиабатного – *сi–j*= 0; для изохорного – *сi–j = сv*; для изобарного – *сi–j = сp*.

5) Расчет работы изменения объема рабочего тела.

Вычисление величины *li–j* в любом процессе цикла может быть проведено по общей формуле, кДж/кг:

*li–j* = 0,001(*Pivi – Pjvj*)/(*ni – j* – 1), (42)

где *ni–j* – показатель политропы, зависящий от характера процесса: для адиабатного – *ni–j = k*; для изохорного – *n* = ∞; для изобарного – *ni–j*= 0.

После вычисления *li–j* для каждого процесса должна быть проведена проверка выполнения первого закона термодинамики по формуле, кДж/кг:

*qi–j* =Δ*ui– j* + *li–j*. (43)

6) Расчет значения энтропии в узловых точках цикла.

Значение энтропии в т. 1 принимается таким, Дж/(кг∙К):

*s*1 = . (44)

Для адиабатного процесса 1 – 2 справедливо равенство:

*s*1 = *s*2. (45)

Величина энтропии *sz* рассчитывается по уравнению изохоры 2 – *z*, кДж/(кг∙К):

*sz* = . (46)

Значение *s*3 определяется по уравнению изобары *z* – 3, кДж/(кг∙К):

*s*3= . (47)

Для адиабаты 3 – 4 справедливо соотношение, кДж/(кг∙К):

*s*4 = *s*3. (48)

По найденным величинам *si* и соответствующим им значениям *Ti* строится цикл дизельного двигателя в *T*, *s*-диаграмме.

7) Расчет среднеинтегральной температуры процессов.

Вычисление искомой величины температуры *Ti–j* в любом процессе проводится с использованием формулы, К:

. (49)

8) Расчет термического КПД цикла.

В анализируемом цикле тепло подводится в процессах 2 – *z* и *z* – 3. В этом случае среднеинтегральная температура подвода тепла, К,

, (50)

где изменение энтропии в соответствующих процессах вычисляется по формулам, кДж/(кг∙К):

Δ*s*2–*z* = *sz* – *s*2; (51)

Δ*sz*–2 = *s*3 – *sz*. (52)

Отвод тепла осуществляется в процессе 4 – 1. Тогда среднеинтегральная температура отвода тепла, К,

*Т*0 = *Т*4 – 1. (53)

Значение термического КПД цикла дизеля по первой формуле:

η*t*= 1–; (54)

по второй:

. (55)

9) Подведенное тепло цикла, кДж/кг,

*q*1 = *q*2–*z*+ *qz*–3. (56)

10) Абсолютная величина отведенного тепла цикла, кДж/кг,

*q*2 = ⎜*q*4–1⎜. (57)

11) Работа цикла, кДж/кг,

*l*ц = *q*1 – *q*2. (58)

12) Удельный расход тепла на единицу работы, кДж/кДж,

. (59)

13) Удельный расход топлива на единицу работы, кг/кДж,

 (60)

**2.3. Контрольные вопросы**

1) Как степень сжатия влияет на термический КПД идеальных циклов поршневых ДВС?

2) Какие факторы ограничивают значение величины степени сжатия у реальных ДВС?

3) Почему изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии идеального газа не зависит от вида термодинамического процесса?

*Лабораторная работа 3*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Цель работы: освоение одного из методов определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов (метод цилиндрического слоя) и закрепление знаний по теории теплопроводности.

**3.1. Основные положения**

Теплота является наиболее универсальной формой передачи энергии, возникающей в результате молекулярно-кинетического (теплового) движения микрочастиц – молекул, атомов, электронов. Универсальность тепловой энергии состоит в том, что любая форма энергии (механическая, химическая, электрическая, ядерная и т. п.) трансформируется в конечном счете либо частично, либо полностью в тепловое движение молекул (теплоту). Различные тела могут обмениваться внутренней энергией в форме теплоты, что количественно выражается первым законом термодинамики.

Теплообмен – это самопроизвольный процесс переноса теплоты в прост-ранстве с неоднородным температурным полем.

Температурным полем называют совокупность мгновенных значений температуры во всех точках рассматриваемого пространства. Поскольку температура – скалярная величина, то температурное поле – скалярное поле.

В общем случае перенос теплоты может вызываться неоднородностью полей других физических величин (например, диффузионный перенос теплоты за счет разности концентраций и др.). В зависимости от характера теплового движения различают следующие виды теплообмена.

Теплопроводность – молекулярный перенос теплоты в среде с неоднородным распределением температуры посредством теплового движения микрочастиц.

Конвекция – перенос теплоты в среде с неоднородным распределением температуры при движении среды.

Теплообмен излучением – теплообмен, включающий в себя переход внутренней энергии тела (вещества) в энергию излучения, перенос излучения, преобразование энергии излучения во внутреннюю энергию другого тела (вещества).

Теплообмен может быть стационарным, если температурное поле не зависит от времени и нестационарным, если температурное поле меняется во времени.

Для количественного описания процесса теплообмена используют следующие величины.

Температура *Т* в данной точке тела осредненная: по поверхности, по объему, по массе тела. Если соединить точки температурного поля с одинаковой температурой, то получим изотермическую поверхность. При пересечении изотермической поверхности плоскостью получим на этой плоскости семейство изотерм – линий постоянной температуры.

Перепад температуры Δ*Т* – разность температуры между двумя точками одного тела, двумя изотермическими поверхностями, поверхностью и окружающей средой, двумя телами. Перепад температуры вдоль изотермы равен нулю. Наибольший перепад температуры происходит по направлению нормали к изотермической поверхности. Возрастание температуры по нормали к изотермической поверхности характеризуется градиентом температуры.

Средний градиент температуры  – отношение перепада температуры между двумя изотермическими поверхностями Δ*Т* к расстоянию между ними , измеренному по нормали *n* к этим поверхностям.

Истинный градиент температуры – средний градиент температуры при  или это есть вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры, численно равный первой производной температуры по этой нормали:

 (61)

Удельный тепловой поток – это количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности, Вт/м2:

, (62)

где  – мощность теплового потока, Вт;

 – площадь изотермической поверхности, м2.

Перенос теплоты теплопроводностью выражается эмпирическим законом Био – Фурье, согласно которому вектор удельного теплового потока прямо про-порционален градиенту температуры:

. (63)

Знак «минус» в уравнении (63) показывает, что направление теплового потока противоположно направлению градиента температуры.

Коэффициент пропорциональности λ в уравнении (63) характеризует способность тел проводить теплоту, называется он коэффициентом теплопроводности и имеет размерность Вт/(м∙К).

Коэффициент теплопроводности λ – физическая характеристика, зависящая от химического состава и физического строения вещества, его температуры, влажности и ряда других факторов. Коэффициент теплопроводности имеет максимальные значения для чистых металлов и минимальные для газов.

К теплоизоляционным материалам могут быть отнесены все материалы с низким коэффициентом теплопроводности (менее 5 Вт/(м∙К) при *t* = 0 °С).

Рассмотрим однослойную цилиндрическую стенку (трубку) длиной *l* c внутренним *r*1 и внешним *r*2 радиусами при λ = const.

Задана температура *Т*1 внутренней и *Т*2 наружной поверхности стенки.

При заданных граничных условиях *r* = *r*1, *T* = *T*1, *r* = *r*2, *T* = *T*2 получим:

. (64)

Температура цилиндрической стенки меняется по логарифмической зависимости.

Удельный тепловой поток *q* через единицу площади цилиндрической поверхности будет величиной переменной, Вт/м2:

. (65)

Мощность теплового потока *Q = qF* через цилиндрическую поверхность площадью (*l* – длина цилиндрической стенки) есть постоянная величина, Вт:

. (66)

Формулу (66) можно записать, используя понятие термического сопротивления, Вт:

, (67)

где  – термическое сопротивление цилиндрической стенки, К/Вт.

Удельный тепловой поток на единицу длины стенки, Вт/м,

. (68)

Таким образом, предлагаемый экспериментальный метод определения коэффициента теплопроводности основан на измерении

мощности теплового потока, проходящего через цилиндрический слой;

перепада температуры между внутренней и наружной поверхностями слоя тепловой изоляции;

геометрических характеристик слоя тепловой изоляции.

**3.2. Схема и описание установки**

Исследуемый материал l (рис. 3.1) нанесен в виде цилиндрического слоя (*d*1 = 0,05 м; *d*2 = 0,02 м) на наружную поверхность металлической трубы 2. Длина цилиндра тепловой изоляции *l* составляет 1 м, что значительно больше наружного диаметра.



*t*1

*t*2

Рис. 3.1. Схема лабораторной установки

для определения теплопроводности материала

Источником теплового потока служит электронагреватель 3, который включен в электрическую цепь через автотрансформатор 4. Для определения мощности теплового потока служат вольтметр 5 и амперметр 6. Для измерения температуры на внутренней и наружной поверхностях тепловой изоляции применяются хромель-копелевые термопары 7 и 8 в комплекте с вторичными приборами 9 и 10.

Результаты измерений при достижении стационарного режима заносятся в протокол наблюдений (табл. 3.1 – 3.10). Стационарность режима оценивается по неизменности температуры *t*1 и *t*2 во времени.

Таблица 3.1

Протокол наблюдений (Вариант 1)

Исследуемый материал …Асбест……………….

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозначение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Сила тока, А | *I* | 0,33 | 0,42 | 0,51 | 0,69 | 0,86 |
| Напряжение, В | *U* | 50 | 65 | 80 | 112 | 142 |
| Температура наружной поверхности слоя изоляции, °С | *t*1 | 32,1 | 37,6 | 44 | 59,7 | 76,4 |
| Температура внутренней поверхности слоя изоляции, °С | *t*2 | 49,9 | 65,9 | 85,9 | 135,4 | 191,4 |

Таблица 3.2

Протокол наблюдений (Вариант 2)

Исследуемый материал …Асбест……………….

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозначение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Сила тока, А | *I* | 0,37 | 0,48 | 0,59 | 0,74 | 0,83 |
| Напряжение, В | *U* | 56 | 74 | 93 | 120 | 136 |
| Температура наружной поверхности слоя изоляции, °С | *t*1 | 34,3 | 41,6 | 50,4 | 64,2 | 73,2 |
| Температура внутренней поверхности слоя изоляции, °С | *t*2 | 57,4 | 78,3 | 105,5 | 151,9 | 179,9 |

Таблица 3.3

Протокол наблюдений (Вариант 3)

Исследуемый материал …Асбозурит……………….

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозначение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Сила тока, А | *I* | 0,33 | 0,4 | 0,51 | 0,63 | 0,75 |
| Напряжение, В | *U* | 50 | 61 | 80 | 100 | 122 |
| Температура наружной поверхности слоя изоляции, °С | *t*1 | 32,1 | 36,1 | 44,0 | 53,8 | 65,3 |
| Температура внутренней поверхности слоя изоляции, °С | *t*2 | 46,9 | 56,7 | 79,0 | 106,8 | 140,6 |

Таблица 3.4

Протокол наблюдений (Вариант 4)

Исследуемый материал …Асбозурит……………….

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозначение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Сила тока, А | *I* | 0,37 | 0,44 | 0,57 | 0,65 | 0,9 |
| Напряжение, В | *U* | 56 | 68 | 90 | 105 | 150 |
| Температура наружной поверхности слоя изоляции, °С | *t*1 | 34,3 | 38,8 | 48,8 | 56,0 | 80,8 |
| Температура внутренней поверхности слоя изоляции, °С | *t*2 | 53,6 | 64,8 | 92,1 | 113,2 | 188,9 |

Таблица 3.5

Протокол наблюдений (Вариант 5)

Исследуемый материал …Минвата……………….

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозначение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Сила тока, А | *I* | 0,36 | 0,42 | 0,52 | 0,67 | 0,82 |
| Напряжение, В | *U* | 54 | 64 | 81 | 107 | 135 |
| Температура наружной поверхности слоя изоляции, °С | *t*1 | 33,6 | 37,3 | 44,6 | 57,5 | 72,4 |
| Температура внутренней поверхности слоя изоляции, °С | *t*2 | 76,5 | 93,7 | 125,8 | 177,6 | 234,0 |

Таблица 3.6

Протокол наблюдений (Вариант 6)

Исследуемый материал …Минвата……………….

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозначение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Сила тока, А | *I* | 0,39 | 0,46 | 0,56 | 0,63 | 0,81 |
| Напряжение, В | *U* | 59 | 71 | 88 | 100 | 132 |
| Температура наружной поверхности слоя изоляции, °С | *t*1 | 35,4 | 40,2 | 47,9 | 53,8 | 71,0 |
| Температура внутренней поверхности слоя изоляции, °С | *t*2 | 85,5 | 106,9 | 139,1 | 163,4 | 229,4 |

Таблица 3.7

Протокол наблюдений (Вариант 7)

Исследуемый материал …Совелит……………….

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозначение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Сила тока, А | *I* | 0,36 | 0,49 | 0,61 | 0,77 | 0,88 |
| Напряжение, В | *U* | 55 | 76 | 97 | 125 | 145 |
| Температура наружной поверхности слоя изоляции, °С | *t*1 | 33,8 | 42,3 | 52,2 | 67,1 | 78,3 |
| Температура внутренней поверхности слоя изоляции, °С | *t*2 | 56,0 | 79,7 | 106,3 | 144,5 | 172,1 |

Таблица 3.8

Протокол наблюдений (Вариант 8)

Исследуемый материал …Совелит……………….

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозначение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Сила тока, А | *I* | 0,42 | 0,55 | 0,67 | 0,76 | 0,90 |
| Напряжение, В | *U* | 65 | 86 | 107 | 124 | 150 |
| Температура наружной поверхности слоя изоляции, °С | *t*1 | 37,6 | 47,0 | 57,5 | 66,4 | 80,8 |
| Температура внутренней поверхности слоя изоляции, °С | *t*2 | 66,8 | 92,8 | 120 | 142,2 | 178,2 |

Таблица 3.9

Протокол наблюдений (Вариант 9)

Исследуемый материал …Шлаковата……………….

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозначение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Сила тока, А | *I* | 0,33 | 0,45 | 0,58 | 0,70 | 0,89 |
| Напряжение, В | *U* | 50 | 70 | 92 | 113 | 147 |
| Температура наружной поверхности слоя изоляции, °С | *t*1 | 32,1 | 39,6 | 49,7 | 60,5 | 79,4 |
| Температура внутренней поверхности слоя изоляции, °С | *t*2 | 68,2 | 105 | 154 | 206,3 | 298,2 |

Таблица 3.10

Протокол наблюдений (Вариант 10)

Исследуемый материал …Шлаковата……………….

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозначение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Сила тока, А | *I* | 0,40 | 0,52 | 0,62 | 0,74 | 0,82 |
| Напряжение, В | *U* | 61 | 82 | 99 | 120 | 134 |
| Температура наружной поверхности слоя изоляции, °С | *t*1 | 36,1 | 44,9 | 53,2 | 64,2 | 72,1 |
| Температура внутренней поверхности слоя изоляции, °С | *t*2 | 87,2 | 130 | 171 | 225,8 | 263,0 |

**3.3. Расчетные формулы и расчеты**

1) Мощность теплового потока, Вт:

 (69)

2) Коэффициент теплопроводности исследуемого материала, Вт/(м∙К):

. (70)

3) Средняя температура тепловой изоляции, °С:

. (71)

Результаты расчетов сводятся в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Результаты расчетов

Исследуемый материал ………………….

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Обозна-  чение | Номер опыта | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Тепловой поток, Вт | *Q* |  |  |  |  |  |
| Средняя температура исследуемого материала, °С | *t*ср |  |  |  |  |  |
| Коэффициент теплопроводности исследуемого материала, Вт/(м∙К) | λ |  |  |  |  |  |

По результатам расчетов построить в соответствующем масштабе график зависимости коэффициента теплопроводности от средней температуры тепловой изоляции.

**3.4. Контрольные вопросы**

1) Какова физическая сущность передачи тепла теплопроводностью?

2) Покажите на схеме установки, как направлены векторы теплового потока и градиента температуры.

3) Каков характер изменения температуры по толщине плоской и цилинд-рической стенок?