

## НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ НАСОС

*В.А. Юданов, А.А. Гречухин, А.В. Токарев*

---

Предложен нестационарный термоэлектрический насос. Экспериментально и путем численного моделирования выявлены параметры, соблюдение которых влияет на его оптимальную работу.

*Ключевые слова:* источник питания; плазмохимический реактор; разряд; импульс.

**Введение.** Одним из путей решения проблемы рационального использования топливно-энергетических ресурсов является применение новых энергосберегающих технологий, в частности, тепловых насосов. Преимущества технологий теплоснабжения, использующих тепловые насосы, по сравнению с их традиционными аналогами, связаны не только со значительными сокращениями затрат энергии в системах жизнеобеспечения зданий и сооружений, но и с их экологической чистотой, а также с новыми возможностями в области повышения степени автономности систем жизнеобеспечения [1].

Известно несколько принципов работы тепловых насосов: обратные тепловые циклы и процессы, циклы воздушной, парокомпрессионной, парожетторной и термоэлектрической холодильных установок. Каждый принцип обладает достоинствами и недостатками [2].

Наибольшее промышленное распространение получили приборы, принципы работы которых основываются на циклах парожетторной и парокомпрессионной холодильных установок. Они обладают хорошими показателями холодильного коэффициента и у них очень широкая область применения. Однако они имеют высо-

кую стоимость изготовления и обслуживания, наличие рабочих жидкостей и газов, большие габариты и вес, шум при работе, что ограничивает их использование.

Приборы, работа которых основана на цикле термоэлектрической холодильной установки [3–5], лишены этих недостатков. Кроме того, они имеют высокую надежность (не менее 200 000 ч), плавное и точное регулирование холодопроизводительности и температурного режима, устойчивость к механическим повреждениям, возможность работы в любом пространственном положении, и переход из режима охлаждения в режим нагрева.

Главным их недостатком является низкий холодильный коэффициент. Работа термоэлектрического модуля, входящего в состав термоэлектрической холодильной установки, основана на эффекте Пельтье [3], т.е. если через цепь последовательно соединенных полупроводниковых элементов пропускать постоянный электрический ток, то одна сторона полупроводника будет нагреваться, а другая охлаждаться. Но так как сами полупроводники состоят из теплопроводящего материала, то тепло, выделяющееся на горячей стороне, будет перетекать по элементу в холодную часть модуля, ухудшая показатели холодильного коэффициента.

Одним из путей решения данной проблемы может быть использование в термоэлектрических холодильных установках модулей, работающих в импульсном режиме и в условиях нестационарного теплообмена.

В полупроводниковом термоэлементе имеется два вида необратимых энергетических потерь – это джоулево тепловыделение и переток тепла теплопроводностью от более горячего спая к более холодному. Поэтому термический КПД термоэлемента тем больше, чем меньше электрическое сопротивление и теплопроводность термоэлектродов.

Принцип работы нестационарного термоэлектрического теплового насоса (НТТН) состоит в следующем. Если через полупроводниковый термостолбик пропустить импульсный ток, который за счет эффекта Пельтье перекачает тепло от более холодной спая к более горячему, а затем механически разъединить термостолбик, то тепло уже не сможет перетекать от более горячего конца термостолбика к более холодному. После импульса тока и механического разъединения термостолбика выжидается период релаксации, пока к холодной части термостолбика из окружающей среды не подтечет необходимое коли-

чество тепла, а от горячей части термостолбика тепло не перетечет к потребителю этого тепла. Далее половинки термостолбиков механически соединяются, и производится следующий импульс тока. После этого цикл повторяется.

При этом механическое “выключение” теплопроводности будет способствовать созданию более экономичного вида термоэлектрического холодильника или теплового насоса.

Однако в нестационарном случае за более короткий период механического контакта концы термостолбиков контактируют друг с другом при большем перепаде температур, чем в стационарном. При этом если за более короткий промежуток времени, но за счет более высокого перепада температур через место механического контакта успеет перетечь то же самое или даже большее количество тепла, что и в стационарном случае, то НТТН не имеет преимуществ перед классическим, условно называемым “стационарным” тепловым насосом (СТН). В противоположном случае НТТН должен обладать преимуществами перед СТН, что позволит при одинаковых энергозатратах получить больший перепад температур.

Задача исследований – поиск оптимальных соотношений амплитуды импульса тока, его длительности и времени релаксации НТТН после прохождения импульса через р – n переход, при выполнении которых наиболее отчетливо будут видны преимущества НТТН перед СТН.

**Эксперимент.** Создана экспериментальная установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. НТТН состоит из двух полупроводниковых столбиков р и n-типа включенных в электрическую цепь и периодически замыкаемых с помощью подвижного контакта 4. Полупроводниковые элементы изготовлены из типичного для низкотемпературной области полупроводникового сплава  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  [6], у которого при концентрации Те 61% появляется р-тип проводимости, а при концентрации Те 64% появляется n-тип проводимости. Габаритные размеры термостолбиков  $3 \times 3 \times 5$  мм.

Управление НТТН производится с помощью транзисторных ключей VT1 и VT2 путем подачи на их базы нужной последовательности, управляющих импульсов от генератора Г5-56.

При подаче импульса на базу транзистора VT2 происходит его открывание и через обмотку реле К0 начинает протекать ток, вызывающий срабатывание приводного механизма, который посредством подвижного контакта 4 замыкает полупроводниковые термостолбики. Затем ге-

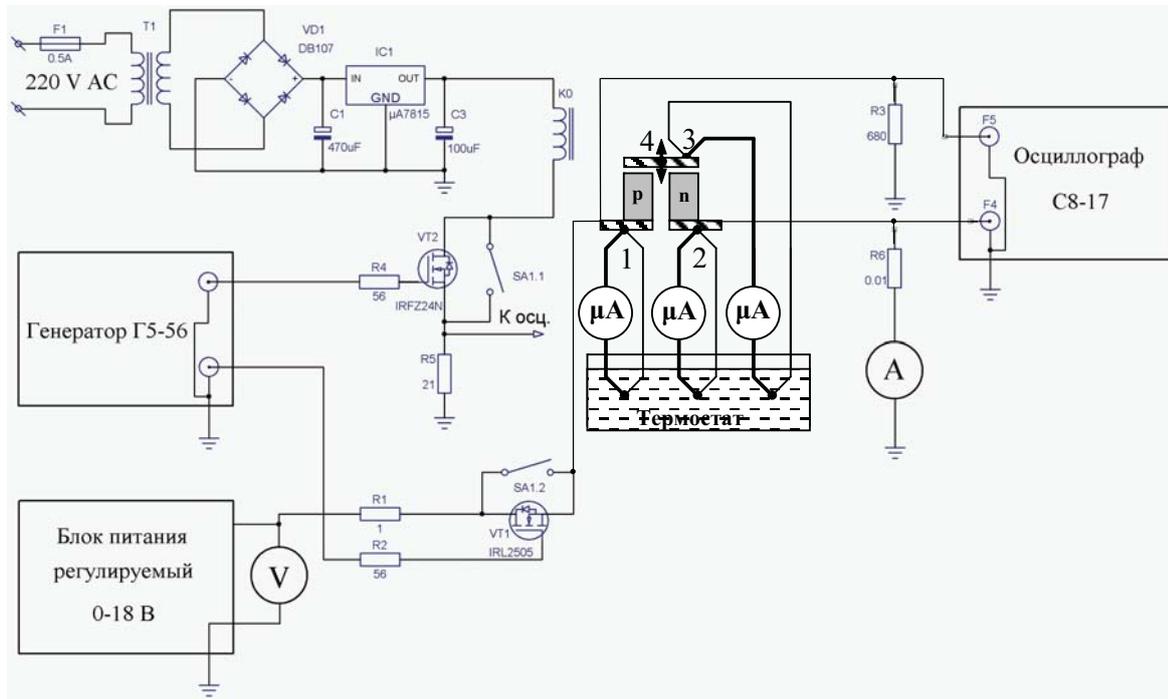


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.  
1, 2, 3 – медь-константановые термопары, 4 – подвижный контакт.

нератор выдает управляющий импульс на транзистор VT1 что приводит к формированию импульса тока через НТТН. Длительность управляющих импульсов транзистора VT2 подобрана таким образом, что после прохождения импульса тока транзистор закрывается, реле обесточивается, а приводной механизм размыкает полупроводниковые элементы термостолбиков. После выдержки времени релаксации импульсы вновь повторяются в той же последовательности.

В экспериментах период работы НТТН составляет 1 с, длительность импульса тока  $\tau = 0,1$  с, а время релаксации после импульса  $T = 0,9$  с.

Контроль синхронизации импульсов, управляющих работой НТТН, измерение амплитудных и временных характеристик импульса тока и падения напряжения на  $p-n$  переходе производятся с помощью двухлучевого осциллографа С8 – 17.

Для сравнения действия импульсного и постоянного тока предусмотрен режим, в котором через  $p-n$  переход пропускается постоянный ток заданного значения.

Изменение температуры, возникающее в термоэлементах при питании постоянным или импульсным током, регистрируется тремя медь – константановыми термопарами (1–3 на рис. 1). В зависимости от направления протекания тока

две термопары регистрируют температуру холодного спая (вход тока в  $p$  и выход из  $n$ -термостолбиков), а одна термопара регистрирует температуру горячего спая или наоборот.

**Условия проведения экспериментов.** Теплота Пельтье, поглощающаяся или выделяющаяся на концах термостолбиков, прямо пропорциональна первой степени тока

$$Q = \alpha TI, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – термоэдс, В/К;  $I$  – сила тока, А;  $T$  – абсолютная температура, К.

В то же время джоулево тепловыделение пропорционально квадрату тока

$$Q_{дж} = I^2 r, \quad (2)$$

где  $r$  – сопротивление термостолбиков, Ом. Из-за этого полной идентичности условий для сравнения НТТН и СТН в принципе быть не может. (По крайней мере, нам таких условий найти не удалось.) Поэтому сравнивать эти варианты (табл. 1) в принципе возможно либо при одинаковой джоулевой мощности (верхняя часть таблицы), но при этом мощность Пельтье по сравнению с постоянным током будет тем меньше, чем короче период импульса тока, либо при одинаковой мощности Пельтье (нижняя часть таблицы), но при этом джоулево тепловыделение импульсного тока будет тем больше, чем

Период импульса $\tau, c$	Период релаксации после импульса $T, c$	Ток, проходящий через систему $I, A$	Заряд, пропорциональный мощности Пельтье $I\tau, Кл$	Джоулева мощность $I^2\tau/(T + \tau), Вт$
Одинаковая джоулева мощность				
1	0	1	1	1
0,5	0,5	$\sqrt{2}$	$0,5\sqrt{2}$	1
0,25	0,75	2	0,5	1
0,1	0,9	$\sqrt{10}$	$0,1\sqrt{10}$	1
Одинаковая мощность Пельтье				
1	0	1	1	1
0,5	0,5	2	1	2
0,25	0,75	4	1	4
0,1	0,9	10	1	10

короче период импульса тока. В табл. 2 эти мощности были взяты как средние за период между импульсами тока.

Численные значения вычислены по формулам, представленным в таблицах, при условиях, что импульсы тока следуют с частотой 1 Гц, а величина  $r = 1$ , при  $\tau = 1$  и  $T = 0$  соответствует постоянному току.

Неодинаковая мощность Пельтье, возникающая при равной джоулевой мощности, не позволяет однозначно определить есть ли преимущества нестационарного варианта над стационарным. Поэтому было принято решение сравнивать варианты при одинаковой мощности Пельтье.

В процессе проведения экспериментов выяснилось, что контактное электрическое сопротивление места разрыва термостолбиков велико, составляет сотни мОм и тепловыделение в нем от прохождения тока сводит на нет ожидаемое превосходство нестационарного варианта термоэлектрического теплового насоса над стационарным. Большое контактное сопротивление является следствием неидеальности реальных контактов соприкасающихся твердых тел, которые соприкасаются друг с другом и проводят ток не по всей поверхности, а точечно в месте выступа микрошероховатостей. Было решено ввести в место разрыва контактов металл – сплав оловогаллий, который является жидким проводником при нормальных условиях и сглаживает шероховатости поверхности [7]. После этого суммарное омическое и контактное сопротивление одного термостолбика снизилось в десятки раз и стало составлять около 7 мОм.

Вследствие полупроводящих свойств  $p - n$  перехода перепад температур между горячим и

холодным концами термостолбика зависит от направления пропускания тока. Поэтому сравнивать НТТН и СТН можно только при одинаковом направлении пропускания в них тока.

В стационарном варианте сила тока, протекающего через термостолбики и напряжение измерялись амперметром и вольтметром. В нестационарном варианте эти же переменные измерялись осциллографически.

Сравнительные эксперименты проводились, когда продолжительность протекания и импульсного и постоянного тока составляла 60 с и столько же времени продолжалась регистрация температуры после выключения тока. Затем графики изменения температуры одноименных термодпар сравнивались между собой. Оба эксперимента проводились в нестационарных условиях исходя из предположения, что если НТТН обладает преимуществами перед СТН, то это должно проявиться уже на первой минуте их работы.

**Результаты экспериментов** при одинаковой мощности Пельтье приведены на рис. 2 и 3. Из сравнения графиков температур одноименных термодпар видно, что импульсное питание приводит к гораздо более высокому нагреву горячего конца термостолбиков, чем в варианте постоянного тока. Однако при импульсном питании холодные концы термостолбиков только в самом начале эксперимента охлаждаются, а затем начинают постепенно прогреваться. Это связано с тем, что джоулево тепловыделение нестационарного варианта для выбранных условий проведения эксперимента ( $\tau = 0,1 c$ ;  $T = 0,9 c$ ;  $I_{\text{импульса}} = 10I_{\text{стационар}}$ ), в 10 раз превосходит джоулево тепловыделение стационарного варианта. По-

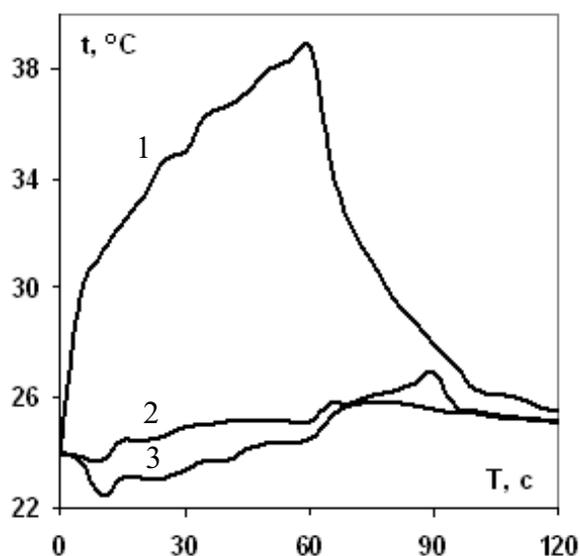


Рис. 2. Зависимость температуры от времени на горячем и холодном концах термостолбиков. Импульсный ток 11,9 А. 1 – переключка; 2 – n-термостолбик; 3 – p-термостолбик. К p-термостолбику подключался положительный электрод.

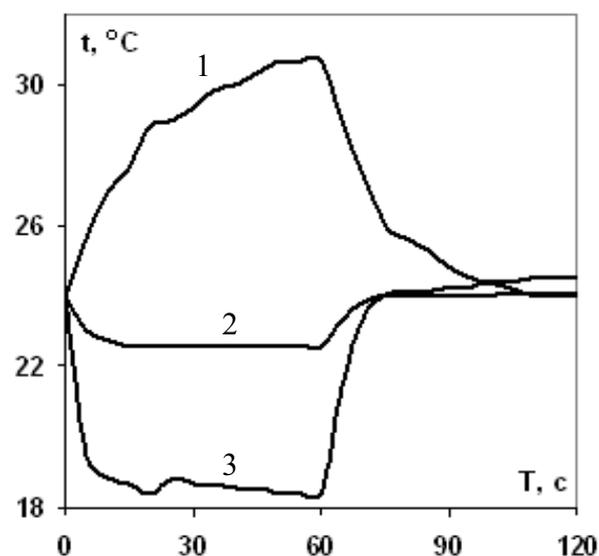


Рис. 3. График изменения температуры от времени на горячем и холодном концах термостолбиков. Постоянный ток 1,19 А. 1 – переключка; 2 – n-термостолбик; 3 – p-термостолбик. К p-термостолбику подключался положительный электрод.

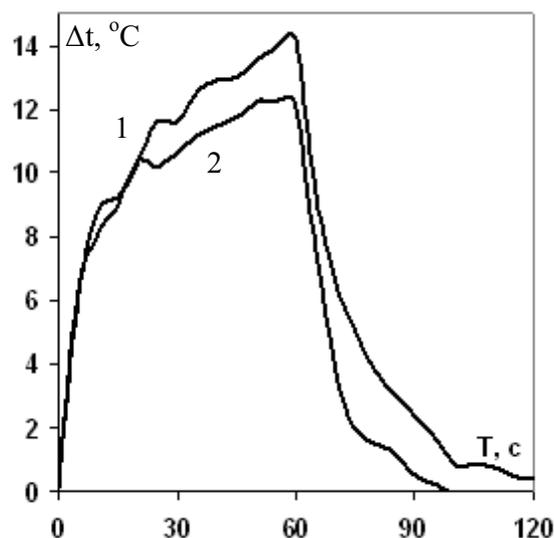


Рис. 4. График перепада температуры от времени между холодным концом p-термостолбика и горячей переключкой. 1 – импульсный ток; 2 – постоянный ток.

этому джоулево тепло подогревает как горячую, так и холодную сторону термостолбика.

Изменение температуры после выключения тока позволяет оценить тепловые потери системы. Как видно на графиках тепловые потери из

термостолбиков велики и основной период релаксации их холодных концов термостолбиков для постоянного тока составляет всего около 20 с, а для горячего конца – около 1 минуты.

Максимальный перепад температур между горячим и холодным концами термостолбиков при импульсном питании и постоянном токе (рис. 4) оказался меньше относительно ожидаемого. Максимум его составил примерно 16%, что превышает погрешность измерения приборов, но все же является недостаточно большим, чтобы уверенно говорить о явном преимуществе НТТН над СТН.

Поскольку теоретических основ работы теории этого насоса пока не существует, то попытки аналитического поиска оптимального значения периода импульса тока, периода релаксации после импульса, силы тока в импульсе, размеров термостолбиков и других переменных постоянно сталкивались с необходимостью решения задачи нестационарной теплопроводности.

Поэтому было проведено численное моделирование процессов нестационарной теплопроводности в термоэлектрических столбиках.

**Постановка задачи для численного моделирования.** Необходимо определить температурное поле, которое зависит от джоулевого тепловыделения и эффекта Пельтье в термостол-

бике (рис. 5) из полупроводникового материала  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и электродах, которые соприкасаются с ним при условии, что сам термостолбик после импульса тока механически разделяется пополам, а после периода релаксации вновь соединяется. Знание этого температурного поля позволит определить оптимальные параметры импульса тока: силу тока, продолжительность импульса и период релаксации.

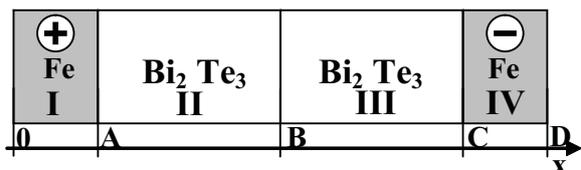


Рис. 5. Зона расчета, состоящая из четырех областей: I – анод; II и III – термостолбик, имеющий возможность разделяться пополам; IV – катод.

В реальных НТТН, если окажется, что их действительно можно сделать, толщина полупроводникового материала должна быть намного меньше двух других размеров. Поэтому использование одномерного приближения является вполне обоснованным. Задача одномерной нестационарной теплопроводности для всех четырех областей решалась численным методом по явной разностной схеме [8].

$$\frac{dT}{d\tau} = a \frac{d^2T}{dx^2}, \quad 0 \leq x \leq D. \quad (3)$$

Каждое из четырех тел контактирует с соседними телами при граничных условиях 4 рода. Пример для границы А приведен в табл. 2.

Для границ В и С процесс аналогичен. На границах зон расчета наложена теплоизоляция:

$$x = 0; \quad x = D; \quad \frac{dT}{dx} = 0. \quad (4)$$

Для упрощения задачи теплообмена в расчетах электроды приняты достаточно протяженными. Поэтому для нестационарных условий, когда

тепловые волны еще не успевают дойти до границ зон расчета, условие теплоизоляции на границах этих электродов является приемлемым.

Приведенные в табл. 2 граничные условия для границы В соответствуют сомкнутым контактам термостолбиков. После механического разъединения половинок термостолбика наступает время релаксации. Теплопроводность воздуха, заполняющего область механического разрыва термостолбиков, намного меньше теплопроводности полупроводникового материала термостолбиков. Поэтому во время релаксации на границе В накладывается теплоизоляция по уравнению (4).

По истечении времени релаксации граничные условия на границе В вновь меняются на исходные.

**Результаты численного моделирования.** Численное моделирование позволяет проследить поведение тепловых волн, возникающих за счет эффекта Пельтье на горячем и холодном концах термостолбиков во время прохождения импульса тока (рис. 6). При этом границы термостолбика находятся в координатах 0 и 5 мм.

На рис. 6 видно, что выбранная в экспериментах длительность импульса тока  $\tau = 0,1$  с оказалась слишком большой. За это время температурное поле в термостолбике уже оказалось близким к линейному, которое возникает в стационарном случае. Этим объясняется маленькое отличие кривых на рис. 4.

На рис. 6 видно, что от момента начала импульса тока возникают горячая и холодная тепловые волны, которые двигаются от противоположных концов термостолбика навстречу друг другу.

Очевидно, что промежуток времени от начала протекания импульса тока до момента соприкосновения тепловых волн и будет оптимальной продолжительностью импульса тока. Если импульс тока прекратится раньше этого времени, то тепловые волны, продолжая двигаться к месту механического разрыва, снижают перепад температур на границе термостолбик – металл. Это означает, что

Таблица 2

Первое из контактирующих тел на границе А	Второе из контактирующих тел на границе А
$T(x, \tau)$	$\Theta(x, \tau)$
$\lambda_1$	$\lambda_2$
Равенство тепловых потоков на границе	
$x = A: \quad \lambda_1 \frac{dT}{dx} = \lambda_2 \frac{d\Theta}{dx}$	
Равенство температур на границе	
$T(A, \tau) = \Theta(A, \tau)$	

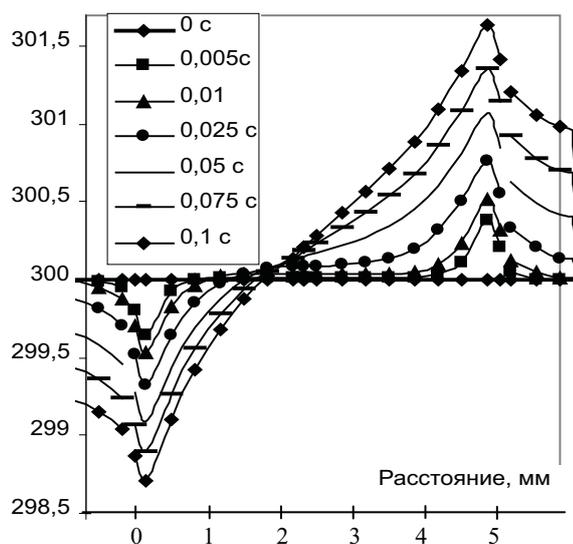


Рис. 6. Изменение температурного поля от времени в термостолбике и прилегающих к нему электродах в первый импульс тока с плотностью тока 1 А/мм<sup>2</sup>.

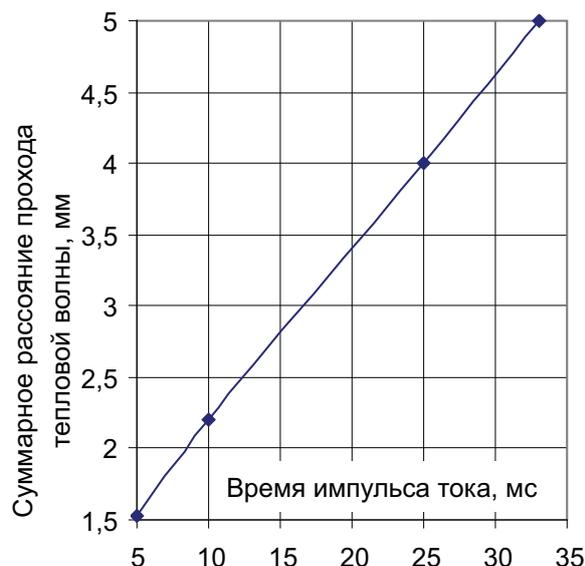


Рис. 7. Зависимость суммарного расстояния, которое проходят горячая и холодная тепловые волны навстречу друг другу от времени импульса тока.

за период релаксации через эту границу передастся меньше тепла, и мощность теплообмена будет меньше максимально возможной.

С другой стороны, если импульс тока будет продолжаться после момента соприкосновения тепловых волн, то начинается процесс взаимной нейтрализации тепла и холода, выработанных за счет эффекта Пельтье, что эквивалентно снижению мощности этого эффекта.

Была установлена закономерность – чем короче термостолбик, больше его теплопроводность, меньше плотность и меньше теплоемкость, тем короче должен быть импульс тока.

Расчеты показывают, что при длине термостолбика 5 мм время сближения тепловых волн составляет 33 мс (рис. 7). Значит, оптимальная длительность импульса тока не должна превышать этого значения. Однако экспериментальная установка, на которой проводились исследования, где приводом механического разъединения контактов являлось реле, не позволила получить импульсы тока короче 100 мс. Поэтому и экспериментально зарегистрированное превосходство НТТН над СТН оказалось меньше ожидаемого.

Как видно на рис. 7 чем короче длина термостолбика, тем короче должно быть оптимальное время импульса тока.

На рис. 8 видно, что после импульса тока происходит механическое разъединение половинок термостолбиков и температурная релак-

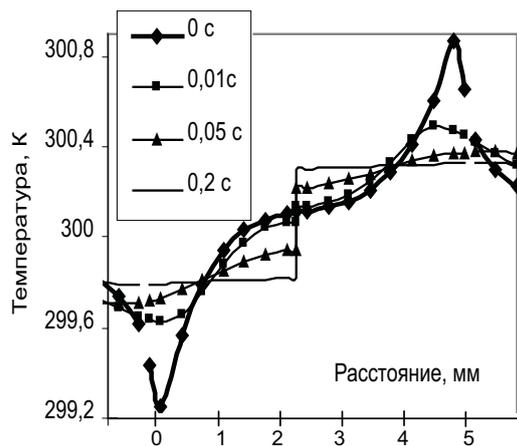


Рис. 8. Изменение температурного поля от времени в термостолбике и прилегающих к нему электродах во время релаксации после первого импульса с плотностью тока 1 А/мм<sup>2</sup>.

сация. Времени 0,2 с вполне достаточно для полной тепловой релаксации. Также возникает максимальный перепад температур на границе стыка термостолбиков, что приводит при их соприкосновении к быстрому перетоку тепла через место стыка. Поэтому время релаксации было выбрано с таким расчетом, чтобы после его окончания в зоне контактов электродов с термостолбиками температура снизилась максимально, а ее перепад в месте стыка термостолбиков был минимальным.

Как показывает анализ, это время находится в интервале 10–50 мс. Таким образом, если оптимальная длительность импульса составляет 33 мс, то оптимальный период релаксации также близок к этой величине. Значит, их сумма даст оптимальный интервал между импульсами тока, который лежит в диапазоне 40–80 мс, что соответствует оптимальной частоте замыкания контактов и действия импульсов тока 12,5–25 Гц при длине термостолбика 5 мм. Уменьшение длины термостолбика увеличивает эту частоту.

Большое количество импульсов тока, следующих один за другим через период релаксации, постепенно приведут к увеличению перепада температур между горячим и холодным концами термостолбиков, что будет влиять на оптимальную частоту замыкания контактов, но это этап дальнейших исследований.

#### **Выводы**

Экспериментально обнаружено превосходство НТТН над СТН, хотя это превосходство оказалось меньше ожидаемого.

При численном моделировании нестационарных процессов теплообмена в термостолбиках определены оптимальная длительность импульса тока и время релаксации после импульса тока.

При анализе численного решения найдено объяснение, почему превосходство нестационарного ТЭН над стационарным оказалось меньше ожидаемого. Оно объясняется тем, что экспери-

ментальная установка работала с длительностью импульсов тока 0,1 с и временем релаксации 0,9 с, и с частотой следования импульсов тока 1 Гц, в то время как оптимальная длительность импульса должна быть около 0,033 с, временем релаксации 0,01–0,05 с, и с частотой следования импульсов тока 12,5–25 Гц.

#### **Литература**

1. *Мартыновский В.С.* Тепловые насосы. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1968.
2. *Мартыновский В.С.* Термодинамические характеристики циклов тепловых и холодильных машин. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952.
3. *Воронин А.Н.* Полупроводниковые термоэлектрогенераторы. Изд. 2-е. – Л., 1957.
4. *Йоффе А.Ф.* Полупроводниковые термоэлементы. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960.
5. *Поздняков Б.С., Коптелов Е.А.* Термоэлектрическая энергетика. – М.: Атомиздат, 1974.
6. *Гольцман Б.М., Кудинов В.Н., Смирнов И.А.* Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . – М.: Физматлит, 1972.
7. Жидкие металлы: Сб. статей / Под ред. В.М. Боришанского. – М.: Госатомиздат, 1963.
8. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ.; под ред. В.Д. Виленского. – М.: Энергоатомиздат, 1984.