

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ (05.04.00)

УДК 620.9:662.92

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-8-11

## Методика расчета времени пуска низкотемпературных установок

Т.А. Алексеев

Для любой технической установки важно знать время ее выхода на рабочий режим после включения. Особенно это относится к низкотемпературным установкам, поскольку после пуска существенно меняется температурный режим всех ее элементов.

В начальный момент времени температура любого элемента конструкции соответствует температуре окружающей среды, при которой установка была изготовлена, либо остановлена при предыдущем запуске. При новом включении элементы конструкции охлаждаются, так как рабочий уровень температур должен быть существенно меньше температуры окружающей среды. В зависимости от конструктивной схемы элементы должны работать в разных температурных условиях, поэтому теоретическое определение времени пуска (перехода от начального температурного режима до рабочего состояния) для низкотемпературной установки, включающей огромное количество элементов конструкции, — чрезвычайно сложная задача.

Сделана попытка создания возможной методики подхода к решению проблемы вычисления времени пуска. Внимание уделено элементам установки, непосредственно контактирующим с объектом охлаждения. Конструктивно они имеют простую геометрическую форму (стержень) или более сложную (в состав входит канал для прохождения холодного потока газа или жидкости). Для вычисления времени охлаждения данных элементов использованы программы, обеспечивающие решение нестационарных уравнений теплообмена с возможностью расчета полей температуры по всему объему элемента.

*Ключевые слова:* время, температура, охлаждение, низкотемпературная установка, нестационарная задача.

*Для цитирования:* Алексеев Т.А. Методика расчета времени пуска низкотемпературных установок // Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 8—11. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-8-11.

## A Procedure for Calculating the Low-Temperature Installation Start-up Time

T.A. Alekseev

For any technical installation, it is important to know the time taken for the system to reach its normal operating mode after it has been switched on. This is especially relevant for low-temperature installations, since after starting them up, the temperature conditions of all their components will alter significantly.

Initially, the temperature of any structural component corresponds to the ambient temperature at which the installation was either manufactured or shut down after the previous startup. After the installation is switched on anew, its structural components are cooled, as the level of operating temperature should be significantly lower than the ambient temperature. Depending on the installation process design arrangement, its components must operate under different temperature conditions. Therefore, theoretical determination of the startup time (the time of transition from the initial temperature conditions to the operating state) for a low-temperature installation that includes a huge number of structural elements is an extremely difficult task.

An attempt to develop a possible approach to attack the startup time calculation problem is made. In so doing, attention is paid to the installation components that are in direct contact with the cooled object. Structurally, they may have a simple geometrical shape (a rod) or a more complex one (involving a channel for passing a cold gas or liquid flow). To calculate the time taken for cooling these components, computer programs enabling one to solve the equations of unsteady heat transfer with the possibility of calculating the temperature fields throughout the component's entire volume were used.

*Key words:* time, temperature, cooling, low-temperature installation, unsteady problem.

*For citation:* Alekseev T.A. A Procedure for Calculating the Low-Temperature Installation Start-up Time. MPEI Vestnik. 2018;6:8—11. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-8-11.

Низкотемпературные установки изготавливают при температуре окружающей среды, которая существенно выше температуры элементов установки в период эксплуатации. Подобное положение наблюдается и в момент включения установки после длительной остановки. Время, за которое установка приходит в рабочее состояние после включения, называется временем пуска. Этот параметр чрезвычайно актуален для систем микрокриогенной техники, когда указанное время может составлять незначительную величину вплоть до минут и секунд. [1].

Любая низкотемпературная установка состоит из большого количества элементов и теоретически рассчитать точное время, за которое весь комплекс элементов достигнет своей рабочей температуры, очень сложно [2 — 4]. Однако можно вычислить это время для отдельного элемента, особенно если он занимает важное место в конструкции установки и непосредственно контактирует с объектом охлаждения.

Любой элемент низкотемпературной установки можно представить как тепловой мост, две стороны которого находятся в существенно разных температурах. Для нестационарной задачи в начальный момент времени температура всего элемента одинакова и высока. Затем на одном из концов она мгновенно становится очень низкой, и запускается процесс охлаждения всей конструкции элемента. Необходимо найти время, за которое температура выделенных точек конструкции достигнет нужных значений.

Математическое описание подобной задачи строится на использовании одномерного уравнения нестационарной теплопроводности.

Для решения задачи создана программа расчета температурного поля стержня с использованием метода прогонки [5]. Для расчета необходимы следующие исходные данные: длина теплового моста (стержня), начальная температура тела, температура на «холодном» торце моста в начальный момент, шаг по времени, материал моста и его теплофизические свойства — коэффициент теплопроводности, теплоемкость, плотность.

Результаты расчета для теплового моста из меди длиной 1 см, с начальной температурой 300 К и температурой на «холодном» торце 200 К приведены на рис. 1.

В данном случае по истечению 3,5 с брусок практически полностью охлаждается. При меньшем времени не все точки бруска достигают полного охлаждения, и можно точно узнать температуру в любой его точке.

Преимущество таких расчетов по сравнению с достаточно сложными аналитическими зависимостями [6] состоит в почти мгновенном получении результата и возможности выполнения вычислений при любом соотношении исходных данных.

На практике в низкотемпературных установках наблюдается и другой вид охлаждения элементов конструкции, когда через них пропускается поток холодного газа или жидкости. Такие процессы характерны для работы регенераторов различного назначения. В данных аппаратах газ или жидкость, проталкиваемые по каналам разнообразной конфигурации (засыпка, пористое тело и т. п.), обмениваются теплом с окружающими твердыми телами как на этапе пуска установки, так и в основной рабочий период функционирования.

Математическая модель процесса в этом случае представляет собой дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности с возможностью изменения температуры по двум координатам — вдоль и поперек самого тела. Таким образом, получаем задачу с трехмерным изменением параметров — по времени, длине и толщине тела. Если тело цилиндрической формы, то уравнение записывается в цилиндрических координатах.

Для упрощения решения можно считать, что изменение температуры в большей степени идет по радиусу тела, поскольку процесс передачи тепла протекает между внутренней стенкой тела и потоком газа или жидкости в канале. Следовательно, значения температуры меняются по толщине, а в пределах одной ячейки (очень малой по длине) они не меняются. Соответственно, значением второй производной по  $X$  в уравнении теплопроводности можно пренебречь по сравнению с производной по радиусу.

Геометрическая постановка задачи дана на рис. 2. Все отмеченные параметры заданы как исходные данные и использованы при создании математической модели.

Математическая постановка задачи включает уравнение нестационарной теплопроводности для отдельной ячейки стенки по оси  $X$  (температура газа в пределах ячейки не меняется и равна температуре газа на входе в нее).

Для упрощения решения приняты следующие допущения:

- температура в цилиндре меняется по осям  $R, X$ ;
- температура газа в канале меняется только по оси  $X$ ;

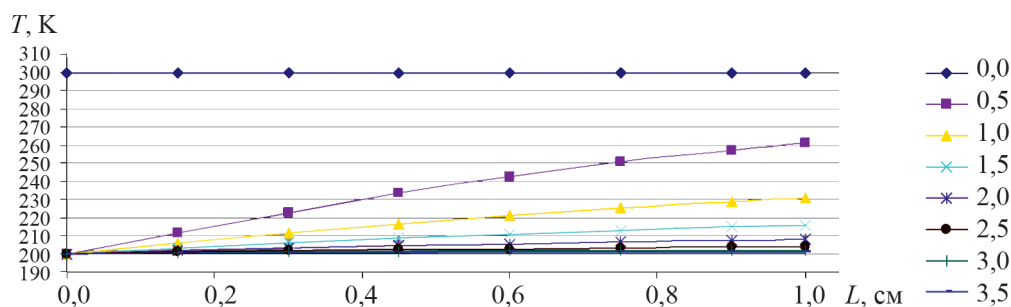


Рис. 1. Зависимость температуры  $T$  точек бруска по длине  $L$  при разных моментах времени

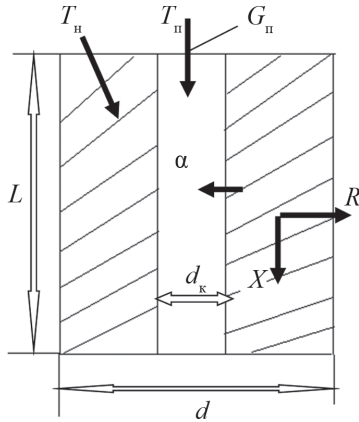


Рис. 2. Геометрическая постановка задачи:

$T_n$  — начальная температура цилиндра с каналом;  $T_n$  — температура газа на входе в канал цилиндра;  $G_n$  — расход газа (охлаждителя) на входе в канал;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи в канале;  $L, d$  — длина и диаметр цилиндра;  $d_k$  — диаметр канала

- теплофизические свойства потока не зависят от координат и времени;
- коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  постоянен по длине канала (существуют два подхода для его определения: первый — задание значения параметра на основе опыта расчетов процессов; второй — включение в алгоритм зависимостей для расчета теплообмена при вынужденной конвекции для различных видов конфигурации каналов, при этом следует точно задавать значение расхода потока в канале).

Уравнение нестационарной теплопроводности применимо для отдельной ячейки цилиндра, длина которой составляет  $h_x$ . В следующей ячейке уравнение также справедливо, но меняется значение температуры газа на входе в данную ячейку. Создана программа расчета температурного поля в элементе конструкции с использованием метода прогонки [7].

Приведем результаты расчета для цилиндра длиной 5 см, радиусом 2 см, в котором протекает поток газа (азот) с расходом 0,01 кг/с. Коэффициент теплоотдачи равен 200 Вт/м<sup>2</sup>·К. Температура газа на входе — 200 К, начальная температура цилиндра — 300 К, внутренний радиус канала — 1 см, материал цилиндра — медь либо сталь 20 (рис. 3).

Анализ результатов показал, что с увеличением расстояния от стенки канала и точки входа потока газа в канал температура тела меняется с меньшей скоростью. Сравнение температурных полей для двух материалов дало существенное отличие в протекании процесса охлаждения.

Данный вид температурных полей точек цилиндра указывает на то, что вопрос определения времени охлаждения (пуска) многовариантен. При работе установки конкретные точки ее элементов не приобретают температуру холодного источника (если все точки элемента приобретут данную температуру, наступит «полное охлаждение», что на практике не выполняется). Следовательно, необходимо принять какую-либо минимальную температуру в конкретной точке элемента и считать, за какое время она будет достигнута. Это время и будет определять время пуска данного элемента при работе установки.

Если принять в приведенных расчетах, что температура в ячейке средней по длине и диаметру точке цилиндра должна быть при охлаждении равна 250 К (для указанных данных), то можно определить время охлаждения для каждого из материалов

Представленный пример показывает возможность быстрого расчета времени пуска для указанного элемента конструкции. Видно, что время охлаждения медного цилиндра в 2 раза меньше, чем для стального.

Таким образом, используя приведенную методику, можно оценить время пуска (охлаждения до определенной температуры) любого элемента установки, особенно тех ее элементов, которые создают условия охлаждения различных объектов, присоединенных к ним.

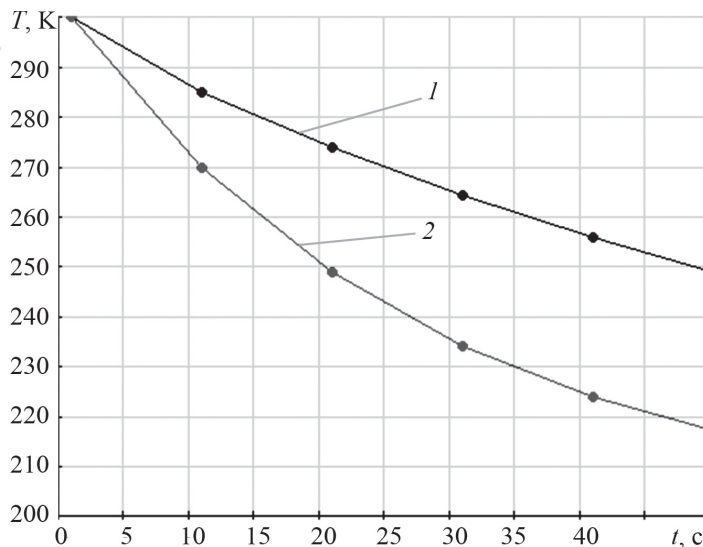


Рис. 3. Изменение температуры стенки цилиндра от времени для ячейки, находящейся в центре стенки, по длине и диаметру для стали 20 (1) и меди (2)

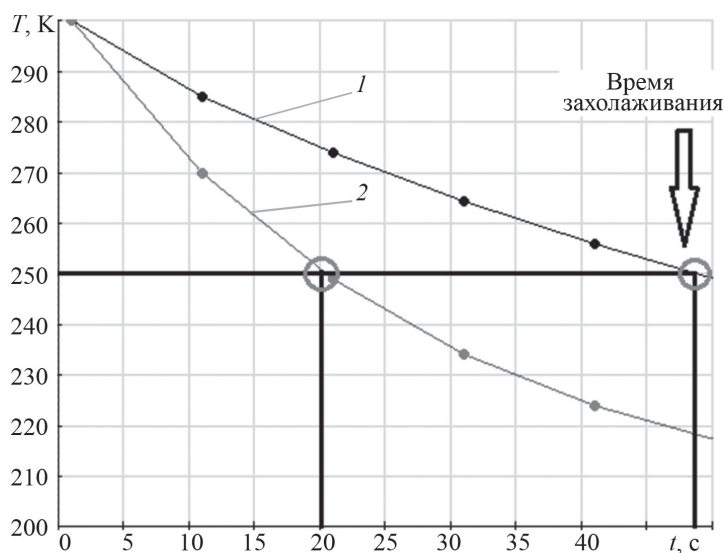


Рис. 4. Расчет времени пуска для цилиндра из стали 20 (1) и меди (2)

### Литература

1. Грезин А.К., Зиновьев В.С. Микрокриогенная техника. М.: Машиностроение, 1977.
2. Архаров А.М. и др. Криогенные системы. М.: Машиностроение, 1987.
3. Lingxue Jin e. a. Experimental Investigation on Chill-down Process of Cryogenic Flow Line // Cryogenics. 2016. V. 79. Pp. 96—105.
4. Hedayat A., Cartagena W., Majumdar A.K., Le Clair A.C. Modeling and Analysis of Chill and Fill Processes for the Cryogenic Storage and Transfer Engineering Development Unit Tank // Cryogenics. 2016. V. 74. Pp. 106—112.
5. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015617210. Расчет времени захлаживания тела простой геометрии / Т.А. Алексеев и др. 2015.
6. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.
7. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 201661410. Расчет времени захлаживания тела сложной геометрии / Т.А. Алексеев и др. 2016.

### References

1. Grezin A.K., Zinov'ev V.S. Mikrokriogennaya Tekhnika. M.: Mashinostroenie, 1977. (in Russian).
2. Arharov A.M. i dr. Kriogennyye Sistemy. M.: Mashinostroenie, 1987. (in Russian).
3. Lingxue Jin e. a. Experimental Investigation on Chill-down Process of Cryogenic Flow Line. Cryogenics. 2016;79:96—105.
4. Hedayat A., Cartagena W., Majumdar A.K., Le Clair A.C. Modeling and Analysis of Chill and Fill Processes for the Cryogenic Storage and Transfer Engineering Development Unit Tank. Cryogenics. 2016;74:106—112.
5. Svidetel'stvo o Gosudarstvennoy Registratsii Programm dlya EVM № 2015617210. Raschet Vremeni Zaholazhivaniya Tela Prostoy Geometrii / T.A. Alekseev i dr. 2015. (in Russian).
6. Isachenko V.P. i dr. Teploperedacha. M.: Energoizdat, 1981. (in Russian).
7. Svidetel'stvo o Gosudarstvennoy Registratsii Programm dlya EVM № 201661410. Raschet Vremeni Zaholazhivaniya Tela Slozhnoy Geometrii / T.A. Alekseev i dr. 2016. (in Russian).

### Сведения об авторе:

Алексеев Тарас Александрович — кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой низких температур НИУ «МЭИ», e-mail: alekct@mail.ru

### Information about author:

Alekseev Taras A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor, Deputy Head of Low Temperatures Dept., NRU MPEI, e-mail: alekct@mail.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 20.03.2018

The article received to the editor: 20.03.2018