

# МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

## НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

ИСПАРЕНИЕ И  
КОНДЕНСАЦИЯ

ПЛЕНОЧНОЕ  
КИПЕНИЕ

СВЕРХТЕКУЧИЙ  
ГЕЛИЙ

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

СОБЫТИЯ

БИБЛИОТЕКА

ИСПАРЕНИЕ И  
КОНДЕНСАЦИЯ

ПЛЕНОЧНОЕ КИПЕНИЕ

СВЕРХТЕКУЧИЙ ГЕЛИЙ

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

СОБЫТИЯ И  
МЕРОПРИЯТИЯ

БИБЛИОТЕКА

• История холода

• Элементы физической  
кинетики

• Разделение газовых  
смесей

• Методические указания.  
Анализ криогенных  
установок

• Оборудование гелиевого  
ожижителя Г-45

• Методические указания. К  
практическим занятиям в  
криоцентре

• Криогенные трубопроводы  
• Хранение и транспорт  
ожиженных газов

• Основы методики  
проектирования криогенных  
установок

• Вспомогательное  
оборудование криогенных  
установок

• Расчет и оптимизация схем  
криогенных установок

• Расчет  
низкотемпературных  
установок

• Методика расчета схем  
криогенных установок  
(рефрижераторы и  
ожижители)

• Методика расчета схем  
криогенных установок  
(рефрижераторы с  
нестационарными потоками)

• Характеристики  
криогенных систем при  
работе на смесях

• Механические свойства  
твердых тел при низких  
температурах

• Людвиг Больцман. Лекции  
по теории газов

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

БОЛЬЦМАНИАДА

ХЕЙКЕ КАМЕРЛИНГ-  
ОННЕС

КРИОГЕНИУС

Бродянский В.М. От твердой воды до жидкого гелия (история холода)

## УСТАНОВКА ОЖИЖЕНИЯ ВОЗДУХА К.ЛИНДЕ

На рис. 4.5, а показана схематически установка Линде, на которой он впервые реализовал свою идею, а на рис. 4.5, б - схема в современных обозначениях.

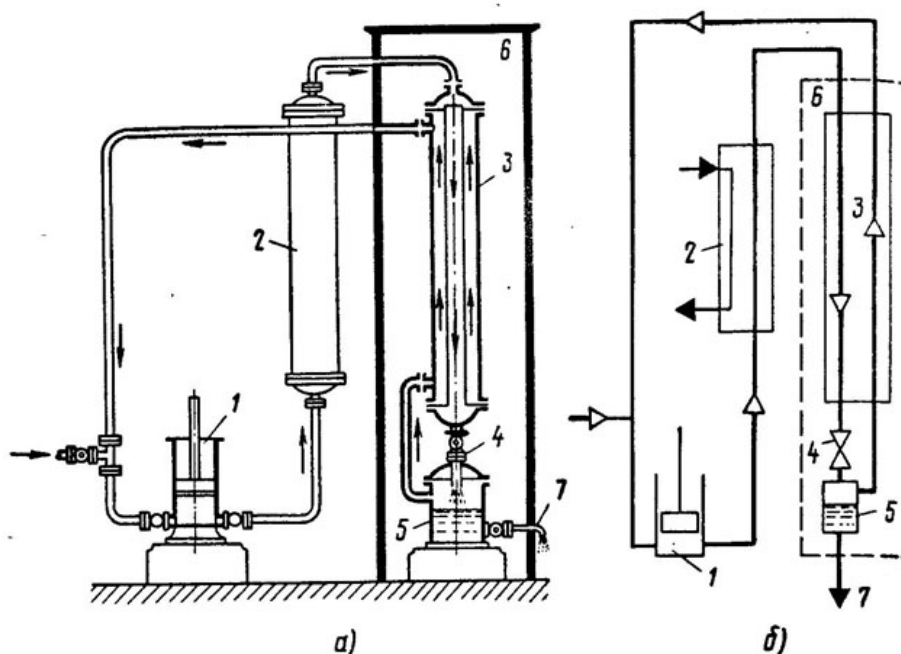


Рис. 4.5. Схема первой установки Линде для ожижения воздуха: а - конструкция; б - схема; 1 - компрессор; 2 - водяной холодильник; 3 - теплообменник; 4 - дроссель; 5 - отделитель жидкости; 6 - кожух с тепловой изоляцией; 7 - слив жидкого воздуха.

Воздух поступает из атмосферы по трубопроводу и в поршневом компрессоре сжимается до высокого давления (20 МПа). При этом он, естественно, нагревается. Чтобы охладить воздух до  $T_{0,c}$ , используется водяной холодильник, в котором тепло сжатия отводится водой. Далее сжатый воздух поступает во внутреннюю трубку теплообменника, где охлаждается идущим навстречу (противотоком) холодным воздухом, оставшимся неожиженным. Охлажденный сжатый воздух дросселируется в вентиле 4, где расширяется. В результате дроссель-эффекта происходит снижение температуры потока воздуха и частичное его ожижение. Жидкий воздух собирается в сосуде 5, а пар отводится через кольцевое пространство между наружной и внутренней трубками теплообменника. Там он нагревается встречным потоком сжатого воздуха и снова поступает в компрессор, где к нему присоединяется воздух, всасываемый из атмосферы. Количество этого воздуха равно тому, которое отделяется в виде жидкости в сосуде 5 и отводится как конечный продукт. Холодная часть аппарата была заключена в деревянный ящик 6, набитый тепловой изоляцией.

Проследим, как протекал процесс в установке Линде, начиная с момента ее запуска, используя схему на рис. 4.5. Первая порция сжатого воздуха поступала из компрессора в теплообменник при температуре окружающей среды  $T_{0,c}$  и при тех же параметрах доходила до дроссельного вентиля. Здесь в результате дросселирования она охлаждалась примерно на  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ ; следовательно, температура этой порции воздуха после расширения будет равна  $20-50=-30^\circ\text{C}$ . Этот холодный воздух, пройдя через отделитель жидкости, возвращался в обратную линию менее холодным, так как охлаждал металл отделителя и трубопроводов. Примем для примера, что его температура стала  $-25^\circ\text{C}$ .

Двигаясь в теплообменнике навстречу новой порции поступающего сжатого воздуха, он охлаждает его, а сам нагревается. Этот процесс, естественно, не идеальный и выходящий воздух нагревается, скажем, до  $+15^{\circ}\text{C}$ , т.е. на  $\Delta T_{\text{расш}} = 25 + 15 = 40^{\circ}\text{C}$ . Прямой поток охладится за счет обратного, но не на  $40^{\circ}\text{C}$ , а меньше, по двум причинам. Во-первых, теплоемкость сжатого воздуха больше, чем расширенного; во-вторых, часть холода пойдет на охлаждение трубок. Примем значение этого охлаждения  $\tau_{\text{сж}} = 25^{\circ}\text{C}$ . Значит, следующая порция сжатого воздуха перед дросселем будет иметь температуру  $20-25=-5^{\circ}\text{C}$ . После дросселирования она станет  $-5+(-50)=-55^{\circ}\text{C}$ , т.е. вторая порция обратного потока будет более холодной, чем первая (которая имела температуру  $-30^{\circ}\text{C}$ ). Соответственно, двигаясь противотоком новой порции воздуха, она снизит и его температуру перед дросселем примерно до  $-70^{\circ}\text{C}$ . После дросселирования она станет уже  $-120^{\circ}\text{C}$  и т.д.

Таким образом, температура перед дросселем будет постепенно понижаться до тех пор, пока после дросселирования не появится жидкий воздух. Тогда процесс постепенно начнет замедляться, так как обратный поток будет становиться меньше прямого (часть воздуха ожигится и в обратный поток не пойдет). В конце концов, наступит равновесие: 5-7% воздуха будет ожигаться, а остальной воздух будет возвращаться через теплообменник. С этого момента установка будет постоянно производить жидкий воздух.

Эта первая установка Линде существенно отличалась от изящных лабораторных приборов Ольшевского не только принципом действия. Она была сделана как заводская машина, с немецкой основательностью и добротностью (только теплообменник весил 1300 кг!). При первом пуске установки в мае 1895 г. температура понижалась медленно и только на третьи сутки достигла уровня, при котором воздух начал ожигаться и накапливаться в сборнике. Правда, на ночь установка отключалась и поэтому частично отогревалась в результате теплопритока извне, через изоляцию.

Однако это были детали, которые можно было доработать. Главное было сделано - впервые была создана установка («ошеломляюще простая по сравнению с существующими», как написал Линде), позволяющая получать непрерывно жидкий воздух в количестве, равном десяткам литров. Сотрудники Линде носили жидкий воздух ведрами! Это был сенсационный успех, Летом 1895 г. Линде доложил о своей работе и ее результатах на правлении Союза немецких инженеров. Одновременно он совершенствовал свою установку, уменьшив массу теплообменного аппарата в 2 раза. Патентовать ее заранее он не спешил, так как обнаружил, что во время ожижения происходит и частичное разделение воздуха, что представляло не меньший интерес, чем само ожижение. Он занялся патентованием позже и сделал это лишь 05.06.1895 г.

Следующая страница: [Отличия установок К.Линде и В.Хэмпсона](#)

[Главная](#) • [Библиотека](#) • [История холода](#) • [Установка ожижения воздуха К.Линде](#)

ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ   ПЛЕНОЧНОЕ КИПЕНИЕ   СВЕРХТЕКУЧИЙ ГЕЛИЙ   ЭКСПЕРИМЕНТЫ  
СОБЫТИЯ   БИБЛИОТЕКА   СПРАВОЧНИКИ   БОЛЬЦМАНИАДА   КАМЕРЛИНГ-ОННЕС   КРИОГЕНИУС