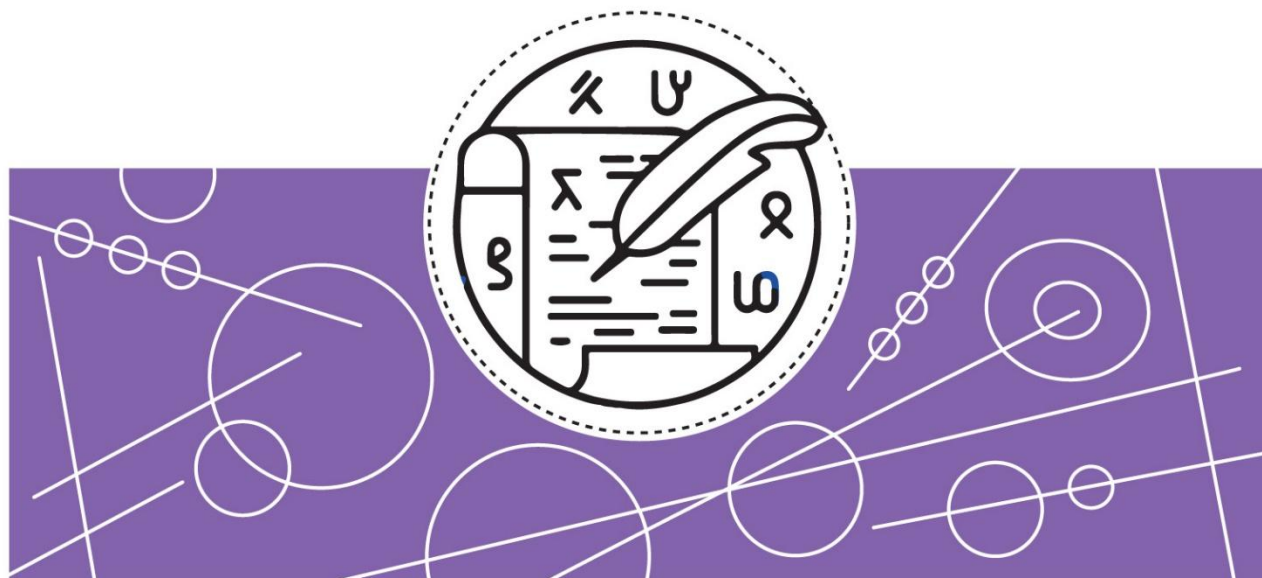


ІІТМО

**Ю.А. Кравченко, А.Ю. Баранов,
Д.В. Кравченко**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ
ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ В ОБЛАСТИ
КРИОГЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.
ЧАСТЬ 1**



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2026**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Ю.А. Кравченко, А.Ю. Баранов,
Д.В. Кравченко**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ
РАСЧЕТЫ В ОБЛАСТИ КРИОГЕННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ. ЧАСТЬ 1**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

**РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки (специальности)**

**16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры**

ИТМО

Санкт-Петербург

2026

Кравченко Ю.А., Баранов А.Ю., Кравченко Д.В.,
Автоматизированные инженерные расчеты в области криогенных
технологий. Часть 1 – СПб: Университет ИТМО, 2026. – 32 с.

Рецензент:

Логвиненко Е.В., кандидат технических наук, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент") образовательного центра "Энергоэффективные инженерные системы" Университета ИТМО

Данное учебное пособие предназначено для студентов обучающихся по направлению подготовки 16.04.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения». Пособие направлено на формирования навыков работы с массивами данных в электронных Excel таблицах для проведения тепловых и конструктивных расчетов.

The logo of ITMO University, consisting of the letters 'ИТМО' in a bold, black, sans-serif font. The letter 'И' has a small dot above it.

ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: IT и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Лидер федеральной программы «Приоритет-2030», в рамках которой реализовывается программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития — научно-образовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента.

ИТМО пять лет подряд — в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере IT. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

© Университет ИТМО, 2026

©Кравченко Ю.А., Баранов А.Ю., Кравченко Д.В., 2026

Содержание

Введение	4
1. Поиск теплофизических свойств веществ в однофазной области	7
2. Поиск теплофизических параметров веществ на пограничных кривых	15
3. Поиск температуры вещества по заданным значениям давления и энтальпии вещества	19
4. Определение температуры вещества в конце процесса дросселирования.....	23
5. Определение температуры газа в конце адиабатного расширения газа в детандере	26
Список литературы.....	32

Введение

Криогенные системы и установки применяются в различных областях науки и техники, где существует необходимость осуществления технологических процессов при низких температурах. Области использования криопродуктов постоянно растут и развиваются, что создает необходимость в проектировании и разработке новых, более надежных и энергоэффективных криогенных систем и установок. Основой термодинамических расчетов новых установок являются точные и достоверные данные теплофизических свойств криопродуктов.

В настоящее время для определения значений теплофизических параметров используются термодинамические диаграммы и справочники теплофизических свойств криопродуктов [1]. Диаграммы состояния наглядно иллюстрируют физические процессы, но не позволяют считывать параметры с достаточной точностью, а данные справочников предоставляют теплофизические свойства, полученные с большим шагом изменения давления и температуры, поэтому более точные значения достигаются за счет интерполяции. В обоих случаях информацию приходится считывать, а затем вручную вносить в расчеты, выполняемые с помощью современных информационных технологий.

Для облегчения работы с массивами данных о теплофизических и транспортных свойствах газов в Университете ИТМО созданы электронные таблицы в редакторе Microsoft Excel. В этих таблицах теплофизические свойства основных криопродуктов представлены, в отличие от бумажных носителей информации, с уменьшенным шагом изменения температуры (1 К) и давления (0,1 МПа), а использование электронной платформы хранения данных позволяет быстрее производить поиск необходимых параметров и напрямую получать информацию в ходе выполнения расчетов. Использование автоматизированных расчетов с помощью электронных таблиц является доступной альтернативой поиска теплофизических параметров криопродуктов с помощью зарубежных программ, таких как Aspen HYSYS или сетевых справочников.

Данное учебно-методическое пособие предназначено для формирования компетенций в области термодинамических расчетов у магистрантов по дисциплине «Научные основы криогенной техники», обучающихся по направлению подготовки 16.04.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения». В ходе ознакомления с учебно-методическим пособием обучающийся приобретет навыки быстрого поиска и использования теплофизических параметров криопродуктов при решении задач в процессе проектирования и разработки низкотемпературных систем и установок.

В результате работы с пособием обучающиеся получают знания о:

- теплофизических свойствах криопродуктов, способах получения низких температур, состава криогенных циклов;
- разработке физико-механических, математических и компьютерных моделей, предназначенных для выполнения теоретических и расчетно-экспериментальных исследований и решения научно-технических задач в области холодильной, криогенной техника и систем жизнеобеспечения.

Освоят умения:

- практического использования информационных технологий для формирования имитационных моделей процессов тепломассопереноса в машинах и аппаратах холодильной, криогенной техники и систем жизнеобеспечения, проведения численных экспериментов.

Сформируют навыки:

- самостоятельно адаптировать и внедрять современные наукоемкие компьютерные технологии холодильной, криогенной техники и систем жизнеобеспечения с элементами мультидисциплинарного анализа для решения сложных научно-технических задач создания техники нового поколения низкотемпературных машин, установок, агрегатов, оборудования, приборов и аппаратуры.

В процессе обучения, в соответствии с РПД, формируется компетенция:

- использует современные методы и средства исследования в ходе проектирования, монтажа и пуско-наладочных работ в холодильной, криогенной технике и системах жизнеобеспечения.

Методические рекомендации по работе с пособием.

Рекомендации для преподавателя:

- учебно-методическое пособие поделено на главы, каждая из которых направлена на формирование определенного навыка, позволяющего быстро и с достаточной степенью точности решать поставленные задачи. Срок освоения одной главы – 1–2 практических занятия;
- во время проведения практических занятий сначала необходимо выполнить тестовое задание совместно со студентами, после чего дать задание для самостоятельного выполнения с последующей проверкой;
- при необходимости перед выполнением тестового задания дать теоретический материал с объяснением изучаемых процессов и свойств;
- задания для самопроверки после каждой главы направлены на закрепление определенного навыка работы с таблицей теплофизических свойств криопродуктов в редакторе Excel. При необходимости скорректировать исходные данные заданий для самопроверки. Критерии

оценивания – самостоятельность при выполнении работы и правильность полученного результата.

Рекомендации для студента:

- все задания необходимо выполнять в редакторе Excel на отдельном листе с использованием предложенных таблиц теплофизических свойств криопродуктов;
- не стесняться задавать вопросы, при необходимости обратиться к преподавателю с просьбой повторить выполненные операции;
- на начальном этапе работы в редакторе Excel использовать дополнительную литературу, содержащую сведения о теплофизических свойствах криопродуктов, для самопроверки;
- в процессе обучения работать самостоятельно;
- обязательно выполнять требуемые задания, а также после решения сверить полученный результат у преподавателя.

1. Поиск теплофизических свойств веществ в однофазной области

Теплофизические свойства газа в однофазной области являются функцией от двух параметров – давления и температуры:

$$h = f(p, T); s = f(p, T); c_p = f(p, T); \rho = f(p, T);$$

Таблица теплофизических свойств веществ в редакторе Microsoft Excel содержит информацию о следующих величинах (рисунок 1) и позволяет с достаточной точностью определить параметры для веществ, представленных на рисунке 2.

Размерность величин	
Масс.энтальпия	кДж/кг
Масс.энтропия	кДж/(кг·К)
Вязкость	сПуаз(МПа·с)
Плотность	кг/м ³
Масс.теплоемкость	кДж/(кг·К)

Рисунок 1 – Размерность теплофизических величин

Наименование компонентов	
Азот	N2
Метан	CH4
Этан	C2H6
Пропан	C3H8
Н-бутан	C4H10
Этилен	C2H4
Амиак	NH3
Кислород	O2
Метанол	CH3OH
Углекислый газ	CO2
ВМР	CH3OH+H2O
ПГ	CH4+C2H6+C3H8

Рисунок 2 – Перечень веществ

Сведения о теплофизических свойствах представлены в виде двумерных массивов, в которых каждому столбцу соответствует давление в интервале от 0,1 до 25 МПа, которое изменяется с шагом 0,1 МПа, а каждая строка соответствует температуре, которая изменяется в интервале от 70 до 320 К с шагом 1 К. Массив размещается на отдельном листе книги Excel. В таком формате данные удобно считывать с помощью встроенных функций редактора. Для определения теплофизических свойств вещества в

однофазной области необходимо создать новый лист в таблице Excel, а также задаться давлением и температурой вещества (рисунок 3).

	A	B	C
1	Вещество	Азот	
2	Давление, МПа	6	
3	Температура, К	273	
4			

Рисунок 3 – Ввод исходных данных

Далее в ячейке А4 запишите параметр вещества, который необходимо определить (см. рисунок 4).

	A	B	C
1	Вещество	Азот	
2	Давление, МПа	6	
3	Температура, К	273	
4	Энтальпия, кДж/кг		

Рисунок 4 – Поиск энтальпии вещества в однофазной области

Для поиска энтальпии вещества в однофазной области необходимо воспользоваться функцией смещения (СМЕЩ) (рисунок 5).

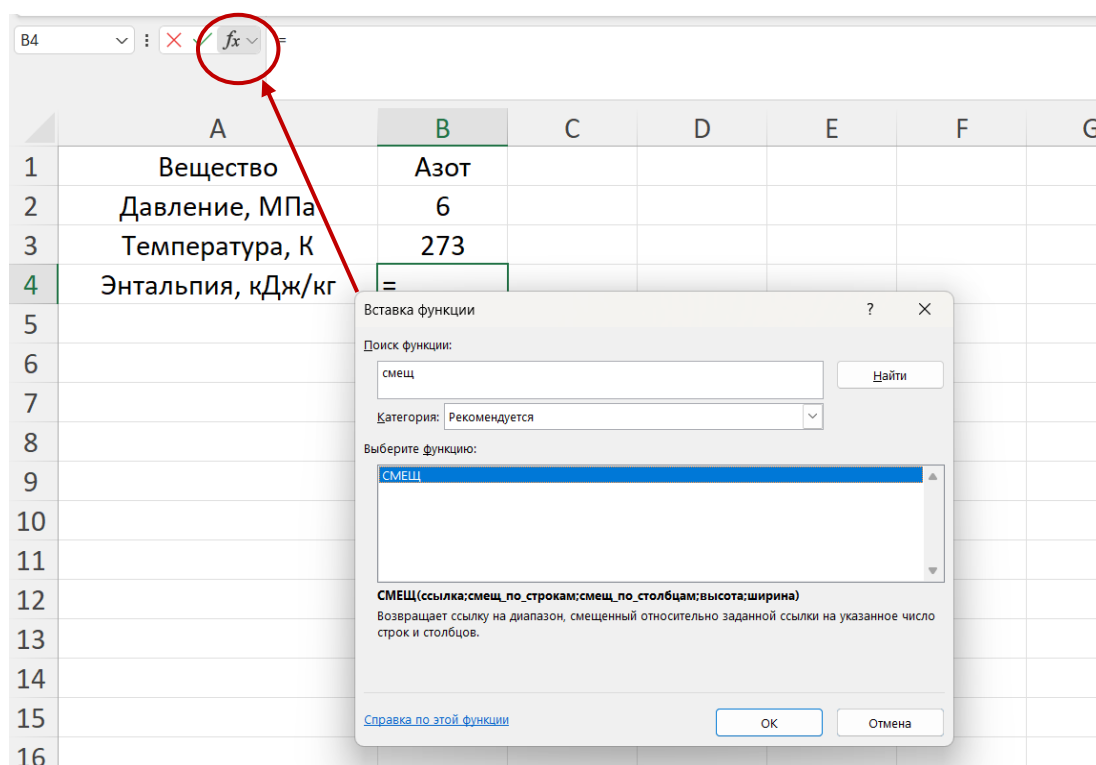


Рисунок 5 – Окно вызова функции СМЕЩ

В появившемся окне необходимо задать аргументы функции (рисунок 6).

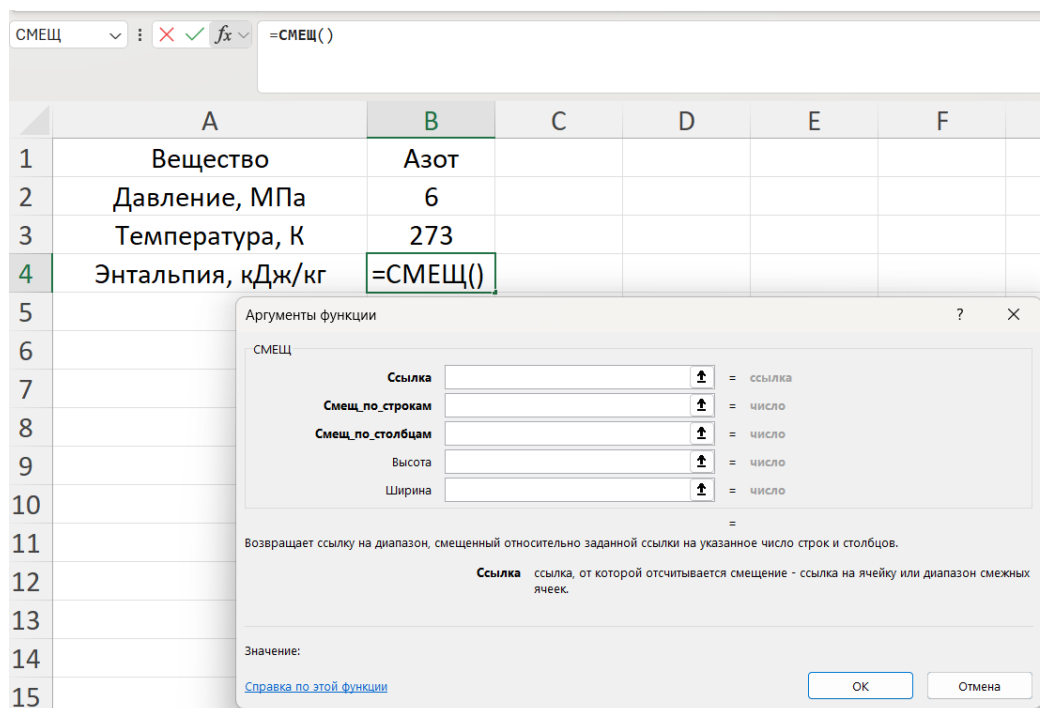


Рисунок 6 – Окно вызова аргументов функции СМЕЩ

В строке «Ссылка» необходимо выбрать лист, содержащий требуемый параметр вещества (N2h), в строке «Смещ_по_строкам» выбрать ссылку на ячейку со значением температуры (B3) и добавить (-69), чтобы получилась итоговая запись (B3-69). В строке «Смещ_по_столбцам» следует выбрать ячейку со значением давления (B2) и умножить значение ячейки на поправочный коэффициент 10 (B2*10) в соответствии с рисунком 7.

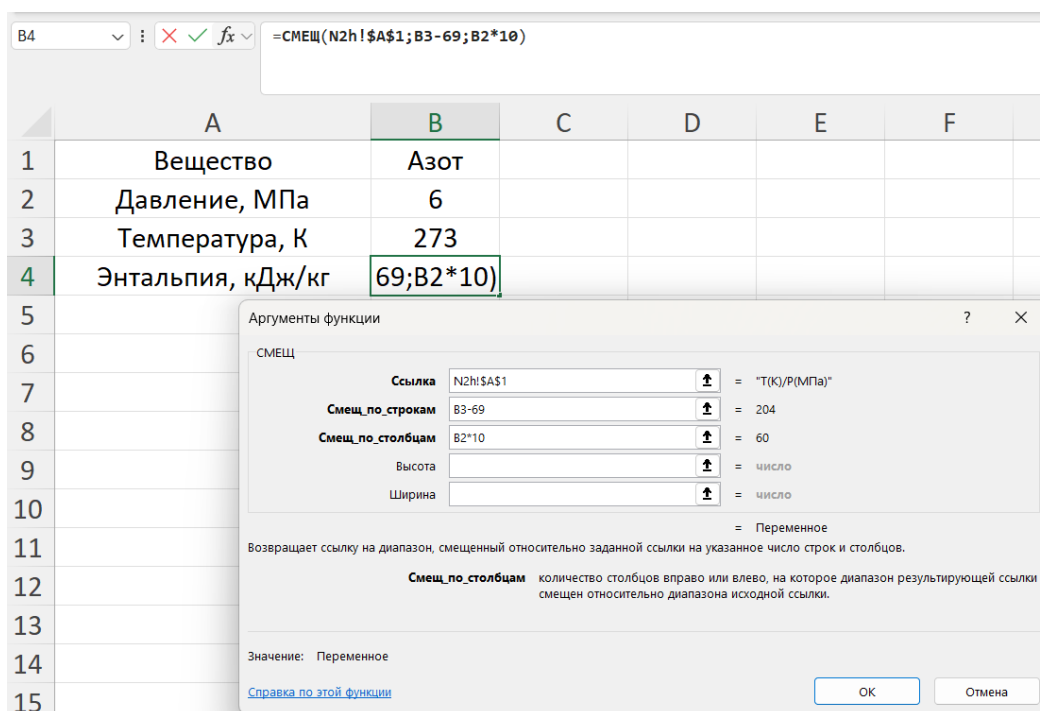


Рисунок 7 – Аргументы функции СМЕЩ

Ячейка В3 содержит информацию о заданной температуре вещества (азот, температура 273 К). Диапазон температур в таблицах теплофизических свойств находится в пределах от 70 до 320 К. Запись В3-69 в аргументе функции «Смещ_по_строкам» позволяет правильно произвести поиск необходимой температуры. Ячейка В2 содержит информацию о заданном давлении вещества. Так как шаг изменения давлений в таблице теплофизических свойств составляет 0,1 МПа, в аргументе функции «Смещ_по_столбцам» необходимо ввести «В2*10» для правильного поиска необходимого давления.

После ввода всех аргументов функций в ячейке В4 должно появиться искомое значение энтальпии (рисунок 8).

	А	В	С
1	Вещество	Азот	
2	Давление, МПа	6	
3	Температура, К	273	
4	Энтальпия, кДж/кг	-38,1161	
5			

Рисунок 8 – Искомое значение энтальпии

Аналогичным способом можно определить такие параметры вещества, как энтропия, вязкость, плотность и теплоемкость, изменяя при этом ссылку на лист с параметром вещества (рисунок 9).

	А	В	С
1	Вещество	Азот	
2	Давление, МПа	6	
3	Температура, К	273	
4	Энтальпия, кДж/кг	-38,1161	
5	Энтропия, кДж/кг·К	3,95049	
6	Вязкость, мПа·с	0,01873	
7	Плотность, кг/м ³	74,667	
8	Теплоемкость, кДж/кг·К	1,16687	

Рисунок 9 – Теплофизические параметры вещества при заданном давлении и температуре

Зачастую в инженерных расчетах существует необходимость определения теплофизических свойств вещества при дробном значении температуры вещества (рисунок 10).

	A	B	C
10	Вещество	Азот	
11	Давление, МПа	5,1	
12	Температура, К	195,7	
13			

Рисунок 10 – Ввод исходных данных

Так как массив данных содержит сведения только для целочисленных значений температуры, для получения точного значения надо выполнить интерполяцию. Для этого в ячейке В13 необходимо выполнить поиск ближайшего меньшего значения температуры от исходного с помощью функции ОКРУГЛВНИЗ (рисунок 11). В открывшемся окне функции в аргументе функции «Число» требуется сделать ссылку на исходное значение температуры, а в аргументе «Число_разрядов» ввести «0».

	A	B	C	D	E
9					
10	Вещество	Азот			
11	Давление, МПа	5,1			
12	Температура, К	195,7			
13	Ближайшая меньшая темп.	=B12;0)			

Аргументы функции

ОКРУГЛВНИЗ

Число: B12 = 195,7

Число_разрядов: 0 = 0

Округляет число до ближайшего меньшего по модулю.

Число_разрядов: количество разрядов, до которого округляется число. Отрицательные значения вызывают округление целой части, ноль или отсутствие значения - до ближайшего целого числа.

Значение: 195

[Справка по этой функции](#) OK Отмена

Рисунок 11 – Окно вызова функции ОКРУГЛВНИЗ

Определяем сдвиг по температуре от исходного значения до ближайшего меньшего в соответствии с рисунком 12.

	A	B	C
9			
10	Вещество	Азот	
11	Давление, МПа	5,1	
12	Температура, К	195,7	
13	Ближайшая меньшая темп.	195	
14	Сдвиг по температуре	=B12-B13	

Рисунок 12 – Определение сдвига по температуре

Далее необходимо выполнить поиск значения энтальпии при ближайшей меньшей и ближайшей большей температуре с помощью функции СМЕЩ (рисунок 13).

	A	B	C	D
10	Вещество	Азот		
11	Давление, МПа	5,1		
12	Температура, К	195,7		
13	Ближайшая меньшая темп.	195		
14	Сдвиг по температуре	0,7		
15	Ближайшая меньшая энт.	B11*10)		
16	Ближайшая большая энт.	-131,092		

Рисунок 13 – Поиск значения энтальпии при ближайшей меньшей и ближайшей больше температуре

Определяем шаг изменения энтальпии при изменении температуры на 1К (см. рисунок 14).

	A	B	C
10	Вещество	Азот	
11	Давление, МПа	5,1	
12	Температура, К	195,7	
13	Ближайшая меньшая темп.	195	
14	Сдвиг по температуре	0,7	
15	Ближайшая меньшая энт.	-132,444	
16	Ближайшая большая энт.	-131,092	
17	Изменение энтальпии	=B16-B15	

Рисунок 14 – Определение шага изменения энтальпии при изменении температуры на 1К

В ячейке B18 вычисляем искомое значение энтальпии в соответствии с рисунком 15. Искомое значение энтальпии составляет $h = -131,498$ кДж/кг.

	A	B	C
10	Вещество	Азот	
11	Давление, МПа	5,1	
12	Температура, К	195,7	
13	Ближайшая меньшая темп.	195	
14	Сдвиг по температуре	0,7	
15	Ближайшая меньшая энт.	-132,444	
16	Ближайшая большая энт.	-131,092	
17	Изменение энтальпии	1,35184	
18	Искомая энтальпия, кДж/кг	*B17	

Рисунок 15 – Вычисление искомого значения энтальпии

Для повышения компактности записи последующих инженерных расчетов рекомендуется отредактировать формулу, записанную в ячейку A18. Для этого надо заменить в ячейке A18 ссылки на ячейки A13-A17 на формулы, которые содержатся в этих ячейках. Например:

A13 → ОКРУГЛВНИЗ(A12,0)

A14 → A12- ОКРУГЛВНИЗ(A12,0)

И так далее. После редактирования формулы в ячейке расчета искомого значения энтальпии должны остаться ссылки только на ячейки, содержащие исходные значения давления и температуры вещества (рисунок 16).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
10	Вещество	Азот														
11	Давление, МПа	5,1														
12	Температура, К	195,7														
13	Ближайшая меньшая темп.	195														
14	Сдвиг по температуре	0,7														
15	Ближайшая меньшая энт.	-132,444														
16	Ближайшая большая энт.	-131,092														
17	Изменение энтальпии	1,35184														
18	Искомая энтальпия, кДж/кг	-131,498	*10))													
19																

Рисунок 16 – Поиск искомого значения энтальпии

Данная запись позволяет определять значение энтальпии и других теплофизических параметров вещества (при условии замены ссылки в аргументе функции СМЕЩ «Ссылка» на соответствующий лист) по давлению и температуре без промежуточных шагов (рисунок 17).

	A	B	C
20	Вещество	Азот	
21	Давление, МПа	5,1	
22	Температура, К	195,7	
23	Искомая энтальпия, кДж/кг	-131,498	

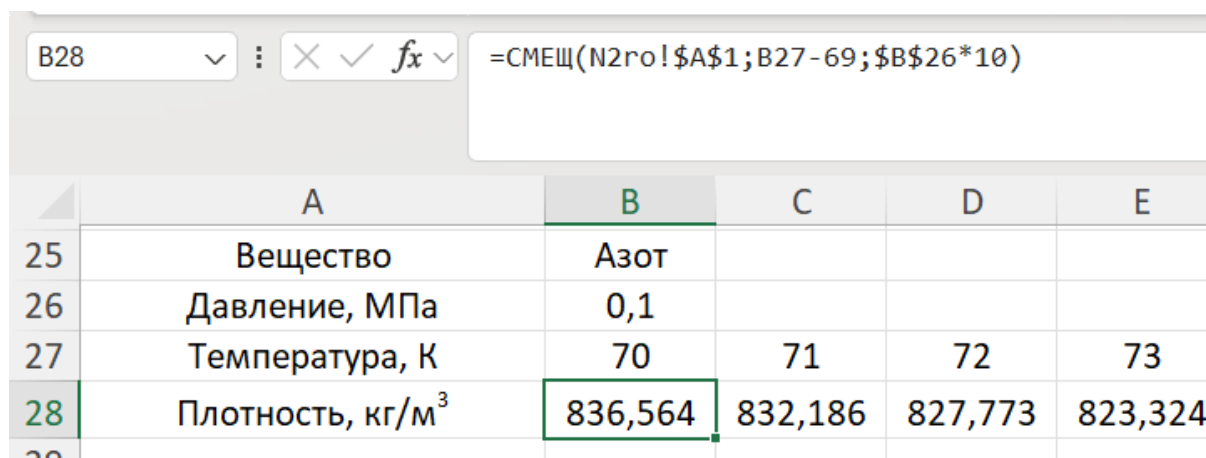
Рисунок 17 – Итоговое окно поиска значения энтальпии при заданном дробном значении температуры

Задания для самопроверки

- Определить значения энтальпии метана в диапазоне температур от 150 до 300 К с шагом в 1 К при давлении $p = 0,6$ МПа, построить график зависимости $h = f(T)$.
- Определить значения энтропии кислорода в диапазоне температур от 100 до 300 К с шагом в 1 К при давлении $p = 0,1$ МПа, построить график зависимости $s = f(T)$.
- Определить значения плотности природного газа при давлениях $p = 11,8$ МПа и $p = 6,3$ МПа и температуре $T = 285,4$ К. Сравнить полученные значения.
- Полагая воздух бинарной смесью $N_2 = 79\%$, $O_2 = 21\%$, определить значение теплоемкости воздуха в диапазоне температур от 70 до 300 К с шагом в 1 К при давлении $p = 0,35$ МПа. Построить график зависимости $c_p = f(T)$.
- Построить графики зависимости теплоемкости метана и природного газа от температуры $c_p = f(T)$ при трёх значениях давления $p_1 = 0,1$ МПа, $p_2 = 10$ МПа, $p_3 = 20$ МПа в диапазоне температур от 120 К до 300 К с шагом в 1 К. Сравнить полученные графики, сделать заключение о зависимости теплоемкости от давления и температуры.

2. Поиск теплофизических параметров веществ на пограничных кривых

Определение теплофизических параметров веществ на пограничной кривой является неотъемлемой частью при проведении инженерных расчетов. Таблицы Excel, содержащие информацию о теплофизических параметрах вещества, позволяют определить его параметры на пограничной кривой как функцию от заданного значения давления. В точке пересечения пограничной кривой с изобарой резко меняется плотность вещества, так как оно переходит из пара в жидкость. Соответственно температуру, при которой происходит конденсация или кипения вещества, можно определить, если найти участок массива зависимости $\rho_i = f(T_i)$ при $P = const$, на котором происходит резкое изменение плотности вещества. Для этого необходимо создать на листе строку, содержащую линейный массив температур с шагом в 1К в диапазоне от 70 до 320 К, и для каждого значения температуры определить соответствующее значение плотности с помощью функции СМЕЩ в зависимости от заданного давления и каждого значения, входящего в массив температур (рисунок 18).



The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E
25	Вещество	Азот			
26	Давление, МПа	0,1			
27	Температура, К	70	71	72	73
28	Плотность, кг/м ³	836,564	832,186	827,773	823,324

The formula bar above the spreadsheet shows the formula: `=СМЕЩ(ИЗБАРЫ!A1;B27-69;B26*10)`

Рисунок 18 – Массив температур и плотностей

После этого надо на следующей строке создать массив, содержащий результат вычисления разности значений $\Delta\rho_i = |\rho_i - \rho_{i+1}|$. Наибольшая разница соседних плотностей массива указывает на точку фазового перехода вещества (рисунок 19). Поиск максимального значения разницы двух элементов массива необходимо выполнить с помощью функции МАКС, где в аргументах функции необходимо выбрать массив разницы соседних значений массива. Полученное максимальное значение составляет 805,204 кг/м³.

	A	B	C	D
25	Вещество	Азот		
26	Давление, МПа	0,1		
27	Температура, К	70	71	72
28	Плотность, кг/м ³	836,564	832,186	827,773
29	Разница	4,37859	4,41293	4,44882

Рисунок 19 – Поиск разницы между соседними плотностями в массиве

Далее необходимо выполнить поиск позиции максимального полученного значения в массиве с помощью функции ПОИСКПОЗ, где в аргументах функции «Искомое_значение» указывается ячейка В30, «Просматриваемый_массив» - массив, содержащий результат вычисления разности значений $\Delta\rho_i = |\rho_i - \rho_{i+1}|$, «Тип_сопоставления» - «0». Данная запись позволяет определить позицию максимальной разницы в массиве (рисунок 20).

В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	И	Ј
Азот								
0,1								
70								
836,564								
4,37859								
805,204								
0)								

Аргументы функции

ПОИСКПОЗ

Искомое_значение: В30 = 805,2035729

Просматриваемый_массив: В29:Q29 = {4,37858767450905;4,41293344400299;4,448816...}

Тип_сопоставления: 0 = 0

Возвращает относительную позицию в массиве элемента, соответствующего указанному значению с учетом указанного порядка.

Тип_сопоставления: число (1, 0 или -1), определяющее возвращаемое значение.

Значение: 7

[Справка по этой функции](#) OK Отмена

Рисунок 20 – Аргументы функции ПОИСКПОЗ

Найденное значение позиции максимальной разницы позволяет определить значение температур кипения вещества при заданном значении давления с помощью функции СМЕЩ. В аргументах функции СМЕЩ указываются следующие ячейки (рисунок 21).

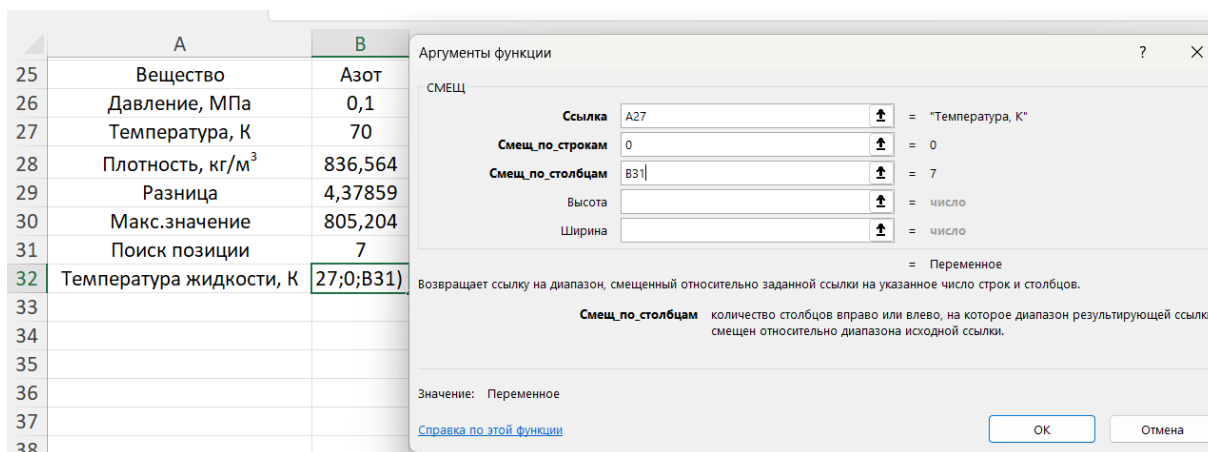


Рисунок 21 – Аргументы функции СМЕЩ для поиска температуры кипения вещества при заданном давлении

Искомая температура кипения азота при давлении 0,1 МПа составляет 76 К, температура парообразования азота при том же давлении находится в ячейке В32+1 и равняется 77 К (рисунок 22).

	A	B	C	D	E
25	Вещество	Азот			
26	Давление, МПа	0,1			
27	Температура, К	70	71	72	73
28	Плотность, кг/м ³	836,564	832,186	827,773	823,324
29	Разница	4,37859	4,41293	4,44882	4,48634
30	Макс.значение	805,204			
31	Поиск позиции	7			
32	Температура жидкости, К	76			
33	Температура пара, К	77			

Рисунок 22 – Полученные значения температуры кипения и парообразования азота при заданном давлении

В дальнейшем полученные значения температур кипения и пара позволяют определить теплофизические свойства вещества на пограничных кривых с помощью функции СМЕЩ, порядок определения свойств описан в разделе 1.

Задания для самопроверки

- Используя данные таблиц теплофизических свойств криопродуктов, определить температуру кипения азота и кислорода при давлениях от 0,1 до 1,0 МПа с шагом в 0,1 МПа. Построить график зависимости температуры кипения от давления $T' = f(p)$. Сделать заключение о зависимости температуры кипения от давления.

- Определить энтальпию насыщенной жидкости и пара для метана при давлении $p = 2,7$ МПа.
- Определить теплоту парообразования природного газа при давлении $p = 0,7$ МПа.

3. Поиск температуры вещества по заданным значениям давления и энтальпии вещества

Зачастую при выполнении инженерных расчетов термодинамических циклов криогенных установок необходимо определить температуру вещества по известным значениям энтальпии и давления вещества. В таком случае таблица исходных данных будет выглядеть следующим образом (рисунок 23).

	A	B
35	Вещество	Азот
36	Давление, МПа	3,4
37	Энтальпия, кДж/кг	-15,153
38		

Рисунок 23 – Таблица исходных данных

Для поиска значения температуры вещества по исходным значениям давления и энтальпии необходимо создать массив температур в диапазоне от 70 до 320 К с шагом в 1 К, а также для каждого значения температуры в зависимости от заданного давления определить значения энтальпий с помощью функции СМЕЩ (рисунок 24).

	A	B	C	D	E	F	G
35	Вещество	Азот					
36	Давление, МПа	3,4					
37	Энтальпия, кДж/кг	-15,153					
38	Температура, К	70	71	72	73	74	75
39	Энтальпия, кДж/кг	10)	-435,034	-433,173	-431,305	-429,43	-427,547
40							

Рисунок 24 – Массив значений энтальпии вещества при разных температурах и заданном давлении $h_i = f(T_i)$ при $P = const$

Далее необходимо найти разницу между каждым значением энтальпии массива h_i и исходным значением энтальпии:

$$|h_i - h^*|,$$

а также найти минимальное значение разницы в полученном массиве с помощью функции МИН (рисунок 25).

	A	B	C	D	E	F	G
35	Вещество	Азот					
36	Давление, МПа	3,4					
37	Энтальпия, кДж/кг	-15,153					
38	Температура, К	70	71	72	73	74	75
39	Энтальпия, кДж/кг	-436,89	-435,034	-433,173	-431,305	-429,43	-427,5
40	Разница	421,737	419,881	418,02	416,152	414,277	412,3
41	Минимальная разница	0,05479					

Рисунок 25 – Поиск значения минимальной разницы массива

Позиция минимальной разницы даст информацию о положении полученного значения в массиве, что в дальнейшем позволит определить значение минимальной ближайшей температуры искомого значения (рисунок 26).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
35	Вещество	Азот									
36	Давление, МПа	3,4									
37	Энтальпия, кДж/кг	-15,153									
38	Температура, К	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
39	Энтальпия, кДж/кг	-436,89	-435,034	-433,173	-431,305	-429,43	-427,547	-425,657	-423,759	-421,853	-419,9
40	Разница	421,737	419,881	418,02	416,152	414,277	412,394	410,504	408,606	406,7	404,7
41	Минимальная разница	0,05479									
42	Поиск позиции	1)									

Аргументы функции

поискпоз

Искомое_значение: B41 = 0,054785531

Просматриваемый_массив: B40:IR40 = {421,736860599642;419,881428428398;418,0198...}

Тип_сопоставления: -1 = -1

= 218

Возвращает относительную позицию в массиве элемента, соответствующего указанному значению с учетом указанного порядка.

Тип_сопоставления: число (1, 0 или -1), определяющее возвращаемое значение.

Значение: 218

[Справка по этой функции](#)

OK Отмена

Рисунок 26 – Аргументы функции ПОИСКПОЗ

Найденное значение позиции минимальной разницы с помощью функции СМЕЩ позволит определить ближайшую меньшую температуру к искомой (рисунок 27).

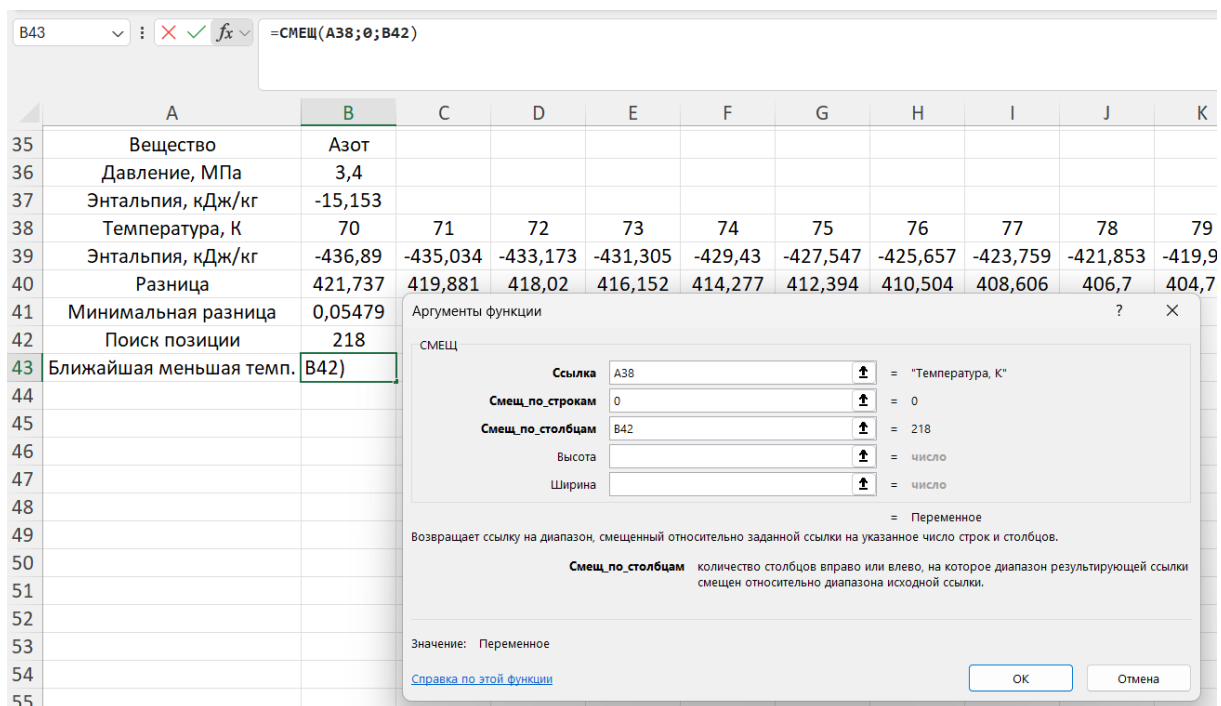


Рисунок 27 – Аргументы функции СМЕЩ

С помощью этой же функции определяем значения ближайшей меньшей (СМЕЩ(А39;0;В42)) и большей энтальпий (СМЕЩ(А39;0;В42+1)). Найденные значения энтальпий, а также значение ближайшей меньшей температуры позволит определить искомое значение температуры вещества, которое составляет $T = 287,048$ К (рисунок 28).

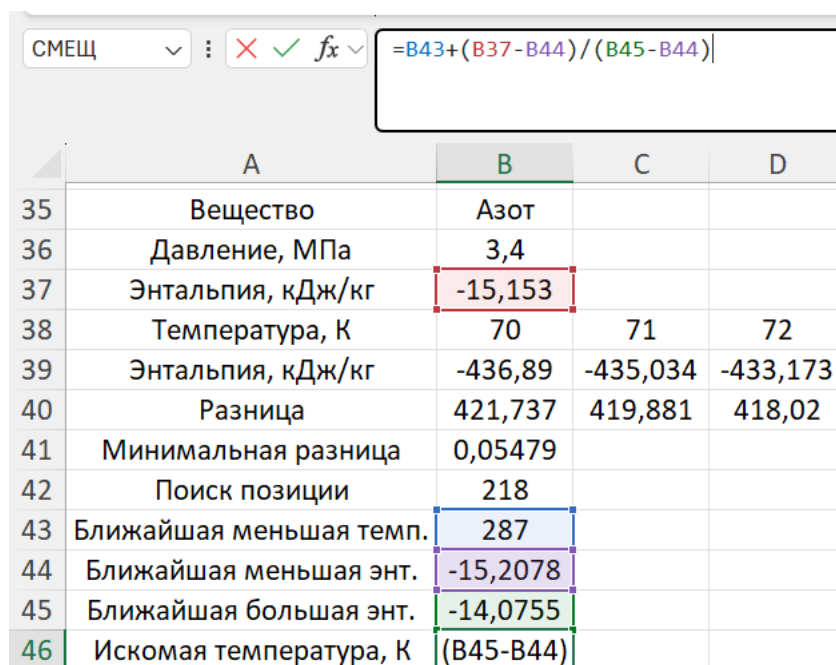


Рисунок 28 – Поиск значения температуры вещества по заданному значению давления и энтальпии

Задания для самопроверки

- Определить значение температуры метана при давлении $p = 6,7$ МПа и энтальпии $h = -5542,85$ кДж/кг.
- Определить значение теплоемкости азота при давлении $p = 0,3$ МПа и энтальпии $h = -196,43$ кДж/кг.
- Определить значение энтальпии и температуры этана при давлении $p = 1,1$ МПа и плотности $\rho = 15,73$ кг/м³.
- Определить значение температуры природного газа при давлении $p = 5,4$ МПа и энтропии $s = 8,95$ кДж/кг·К. При найденном значении температуры определить значение вязкости природного газа.

4. Определение температуры вещества в конце процесса дросселирования

Дросселирование – процесс снижения давления (редуцирования) потока газа или жидкости при прохождении через местное гидравлическое сопротивление, в отсутствие теплообмена с окружающей средой и без совершения внешней работы. Процесс дросселирования необратим и сопровождается изменением температуры вещества (эффект Джоуля-Томсона) [2]. При охлаждении газа после дросселирования эффект Джоуля-Томсона считается положительным, а при нагреве – отрицательным.

$$h = const; \Delta T \lesseqgtr 0$$

Явление изменения знака эффекта Джоуля-Томсона называют инверсией. Кривая инверсии разграничивает области положительного и отрицательного эффекта дросселирования (рисунок 29), при этом область под кривой соответствует положительному эффекту дросселирования.

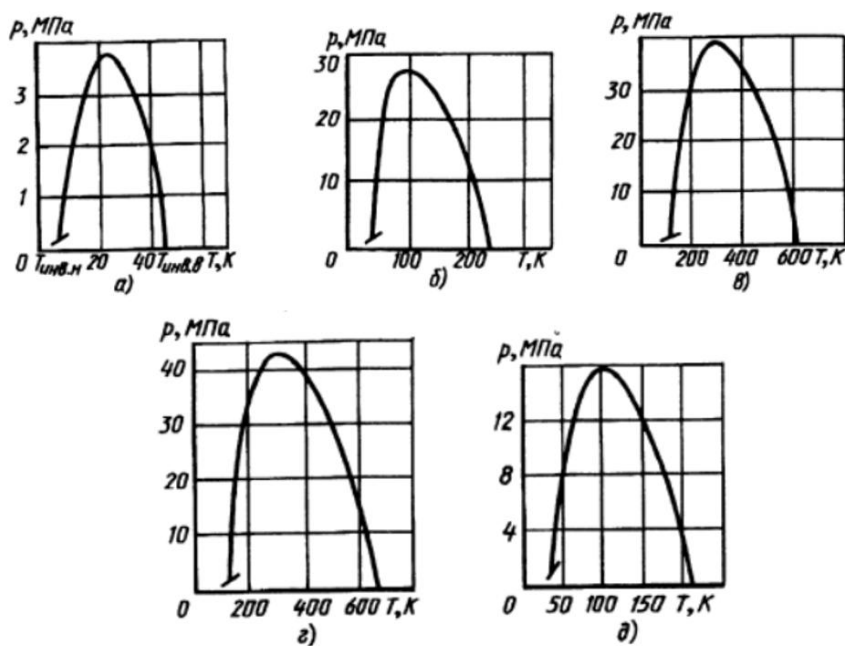


Рисунок 29 – Кривая инверсии для некоторых газов
а – гелий, б – неон, в – азот, г – воздух, д – водород

В циклах сжижения газы с температурой инверсии ниже температуры окружающей среды (водород, неон, гелий) необходимо предварительно охладить перед дросселированием [3].

Для определения температуры в конце дросселирования необходимо задаться начальным и конечным давлением вещества, а также температурой начала процесса дросселирования. T-S диаграмма процесса приведена на рисунке 30.

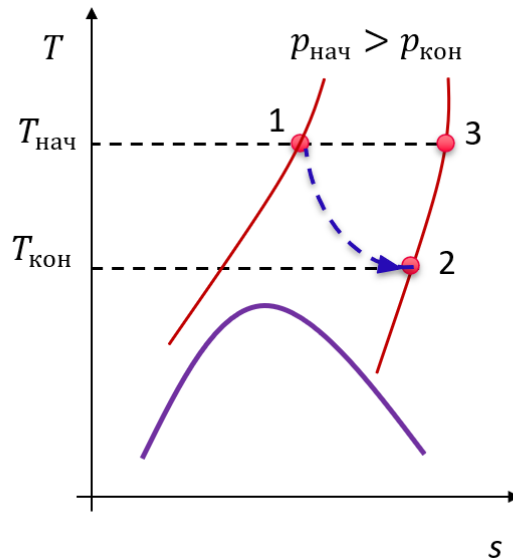


Рисунок 30 – T-S диаграмма процесса дросселирования

Изотермический эффект Джоуля – Томсона определяется как разность энтальпий несжатого и сжатого газа, взятых на одном температурном уровне $T_{нач}$ начала процесса дросселирования:

$$\Delta h_T = h_3 - h_1 \quad \text{где } h_3 = f(T_{нач}, p_{кон}) \quad h_1 = f(T_{нач}, p_{нач})$$

где Δh_T – изотермический эффект дросселирования.

Так как процесс дросселирования адиабатный, энтальпии газа в начале и конце процесса дросселирования равны:

$$h_1 = h_2,$$

Значение энтальпии h_2 позволит определить температуру вещества $T_2 = f(h_2, p_{кон})$. Энтальпия вещества в точке 1 находится с помощью функции СМЕЩ в зависимости от начального давления p_1 и температуры вещества T_1 (рисунок 31).

	A	B	C
1	Дросселирование		
2	Вещество	Азот	
3	Давление начальное, МПа	7	
4	Давление конечное, МПа	0,1	
5	Температура начальная, К	310	
6			
7	Энтальпия $h_1=h_2$, кДж/кг	3,6172599	
8			

Рисунок 31 – Определение энтальпии $h_1 = h_2$

Далее необходимо создать массив температур в диапазоне от 70 до 320 К с шагом в 1 К, а также найти для каждого элемента массива соответствующее ему значение энтальпии:

$$h_{2i} = f(p_{\text{кон}}, T_i).$$

Согласно алгоритму, позволяющему определить температуру газа по заданному значению энтальпии h_1 и давлению $p_{\text{кон}}$, изложенному в разделе 3, выполнить поиск температуры T_3 в конце процесса дросселирования. Полученное значение температуры, а также порядок расчета приведены на рисунке 32.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Дросселирование						
2	Вещество	Азот					
3	Давление начальное, МПа	7					
4	Давление конечное, МПа	0,1					
5	Температура начальная, К	310					
6							
7	Энтальпия $h_1=h_2$, кДж/кг	3,6172599					
8							
9	Температура, К	70	71	72	73	74	75
10	Энтальпия, кДж/кг	-439,1445	-437,257	-435,361	-433,457	-431,544	-429,621
11	Поиск позиции	227					
12	Ближайшая меньшая энт.	3,295381					
13	Ближайшая большая энт.	4,3632081					
14	Ближайшая меньшая темп.	296					
15	Искомая температура T_3 , К	296,30143					
16							

Рисунок 32 – Определение температуры в конце процесса дросселирования.

Задания для самопроверки

- Построить график зависимости изотермического эффекта дросселирования от давления при различных значениях температуры начала процесса дросселирования. Определить конечную температуру газа после расширения в дроссельном вентиле. Рабочее вещество – метан, начальное давление $p = 5,7$ МПа, конечное давление $p = 0,3$ МПа, температура $T_1 = 250$ К, $T_2 = 290$ К, $T_3 = 310$ К. Сделать вывод о влиянии начальной температуры на конечную температуру процесса дросселирования.
- Определить конечную температуру газа после расширения в дроссельном вентиле. Сделать вывод о влиянии начального давления на конечную температуру процесса дросселирования. Рабочее вещество – кислород. $p_1 = 3$ МПа, $p_2 = 9,8$ МПа, $p_3 = 22$ МПа. Конечное давление $p = 0,15$ МПа. Температура начала процесса расширения $T = 293,8$ К.
- Определить температуру начала процесса дросселирования азота. Температура в конце процесса дросселирования $T = 150,4$ К. Начальное давление $p = 6,5$ МПа, конечное давление $p = 0,15$ МПа. Определить значение изотермического процесса дросселирования.

5. Определение температуры газа в конце расширения газа в детандере

Детандер – устройство, преобразующее внутреннюю энергию газа в механическую работу. В идеальном детандере происходит адиабатное расширение газа, то есть при отсутствии теплообмена с окружающей средой, в процессе которого газ снижает свою температуру, благодаря этому понижению температуры детандер является источником холодопроизводительности в низкотемпературном цикле.

В реальных условиях обеспечить адиабатное расширение в детандере невозможно, поэтому эффективность работы как поршневых детандеров, так и турбодетандеров оценивают изэнтропным КПД η_s , а действительную холодопроизводительность определяют в соответствии с выражением [4]:

$$h_d = h_s \eta_s.$$

КПД поршневых детандеров находится в пределах

$$\eta_s = 0,7 - 0,8.$$

КПД турбодетандеров:

$$\eta_s = 0,72 - 0,85.$$

T-S диаграмма адиабатного расширения газа в детандере представлена на рисунке 33, где процесс 1-2 соответствует расширению газа в реальном детандере, а процесс 1-2s в идеальном.

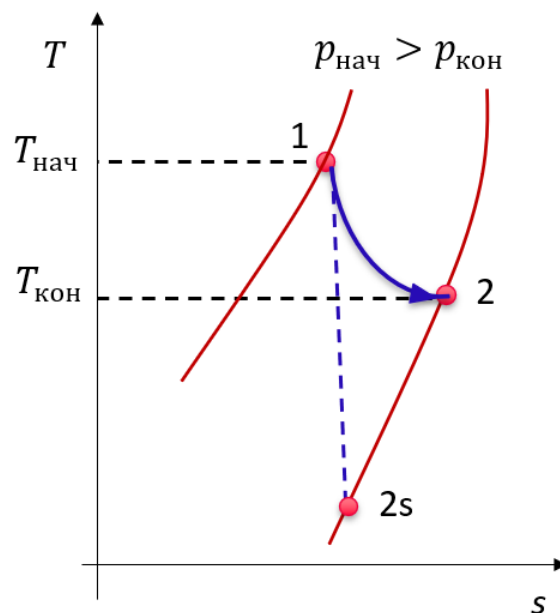


Рисунок 33 – Процесс адиабатного расширения газа в детандере

Поиск температуры газа после детандера является одним из этапов расчета детандерных и комбинированных криогенных газовых циклов. Исходными данными для расчета являются начальное и конечное давления газа, температура газа в начале процесса расширения, а также изоэнтропный КПД детандера (рисунок 34).

	А	В	С
1	Расширение в детандере		
2	Вещество	Азот	
3	Давление начальное, МПа	7	
4	Давление конечное, МПа	0,1	
5	Температура начальная, К	310	
6	КПД детандера	0,75	
7			

Рисунок 34 – Исходные данные для расчета

В общем случае изоэнтропный КПД детандера можно определить:

$$\eta_s = \frac{h_d}{h_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Значение энтальпии h_2 при известном значении давления $p_{\text{кон}}$ позволит определить искомую температуру газа T_2 после расширения газа в детандере.

На первом шаге необходимо определить энтальпию и энтропию газа в точке 1:

$$h_1 = f(p_{\text{нач}}, T_1); s_1 = f(p_{\text{нач}}, T_1);$$

$$h_1 = 3,617 \text{ кДж/кг}; s_1 = 4,046 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}.$$

Равенство энтропий $s_1 = s_{2s}$ позволяет определить температуру и энтальпию в точке 2s. Для этого создается массив температур в диапазоне от 70 до 320 К с шагом в 1 К, где для каждого значения температуры массива определяется значение энтальпии и энтропии:

$$h_{2si} = f(p_{\text{кон}}, T_i); s_{2si} = f(p_{\text{кон}}, T_i).$$

Затем необходимо выполнить поиск позиции ближайшей меньшей энтропии в массиве энтропий к энтропии s_{2s} с помощью функции ПОИСКПОЗ (рисунок 35).

СМЕЩ : X ✓ fx =ПОИСКПОЗ(В9;В11:ИР11;1)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Расширение в детандере										
2	Вещество	Азот									
3	Давление начальное, МПа	7									
4	Давление конечное, МПа	0,1									
5	Температура начальная, К	310									
6	КПД детандера	0,75									
7											
8	Энтальпия h1 , кДж/кг	3,61726									
9	Энтропия s1, кДж/кг·К	4,046186									
10	Температура, К	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
11	Энтропия, кДж/кг·К	1,152511	1,179225	1,205669	1,231859	1,257807	1,283528	1,309034	3,903523	3,917174	3,930635
12	Энтальпия, кДж/кг	-439,144	-437,257	-435,361	-433,457	-431,544	-429,621	-427,688	-227,313	-226,25	-225,189
13	Поиск позиции	1)									

Аргументы функции

поискпоз

Искомое_значение: В9 = 4,04618576

Просматриваемый_массив: В11:ИР11 = (1,1525107580096;1,17922481773168;1,2056694...)

Тип_сопоставления: 1 = 1

= 19

Возвращает относительную позицию в массиве элемента, соответствующего указанному значению с учетом указанного порядка.

Искомое_значение значение, используемое при поиске нужного значения в массиве - может быть числом, текстом или логическим значением, либо ссылкой на один из этих типов.

Значение: 19

[Справка по этой функции](#)

OK Отмена

Рисунок 35 – Аргументы функции ПОИСКПОЗ

Позиция искомой энтропии – 19. На следующем шаге находим значения ближайшей большей и меньшей энтропии с помощью функции СМЕЩ для того, чтобы выполнить линейную интерполяцию, необходимую для поиска температуры в точке 2s (рисунок 36).

СМЕЩ : X ✓ fx =СМЕЩ(А11;0;В13)

	A	B	C	D	E	F
1	Расширение в детандере					
2	Вещество	Азот				
3	Давление начальное, МПа	7				
4	Давление конечное, МПа	0,1				
5	Температура начальная, К	310				
6	КПД детандера	0,75				
7						
8	Энтальпия h1 , кДж/кг	3,61726				
9	Энтропия s1, кДж/кг·К	4,046186				
10	Температура, К	70	71	72	73	74
11	Энтропия, кДж/кг·К	1,152511	1,179225	1,205669	1,231859	1,257807
12	Энтальпия, кДж/кг	-439,144	-437,257	-435,361	-433,457	-431,544
13	Поиск позиции	19				
14	Ближайшая м. энтропия	В13)				

Рисунок 36 – Поиск ближайшей меньшей энтропии к энтропии в точке 2s

Значение ближайшей большей энтропии к энтропии в точке 2s находится аналогичным образом (СМЕЩ(A11;0;B13+1)). Также определяем ближайшее меньшее значение температуры к температуре в точке 2s для выполнения линейной интерполяции (СМЕЩ(A10;0;B13)). Полученное значение составляет $T = 88$ К. Далее проводим линейную интерполяцию в соответствии с рисунком 37.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Расширение в детандере						
2	Вещество	Азот					
3	Давление начальное, МПа	7					
4	Давление конечное, МПа	0,1					
5	Температура начальная, К	310					
6	КПД детандера	0,75					
7							
8	Энтальпия h1, кДж/кг	3,61726					
9	Энтропия s1, кДж/кг·К	4,046186					
10	Температура, К	70	71	72	73	74	75
11	Энтропия, кДж/кг·К	1,152511	1,179225	1,205669	1,231859	1,257807	1,283528
12	Энтальпия, кДж/кг	-439,144	-437,257	-435,361	-433,457	-431,544	-429,621
13	Поиск позиции	19					
14	Ближайшая м. энтропия	4,044052					
15	Ближайшая б. энтропия	4,055878					
16	Ближайшая м. температура	88					
17	Температура 2s, К	B15-B14)					

Рисунок 37 – Поиск температуры в точке 2s

Искомое значение температуры составляет $T_{2s} = 88,18$ К. Аналогичным образом необходимо произвести поиск ближайшей меньшей и ближайшей большей энтальпии в точке 2s и линейную интерполяцию для определения точного значения энтальпии $h_{2s} = -215,484$ Дж/кг (рисунок 38).

	A	B	C	D	E	F
10	Температура, К	70	71	72	73	74
11	Энтропия, кДж/кг·К	1,152511	1,179225	1,205669	1,231859	1,257807
12	Энтальпия, кДж/кг	-439,144	-437,257	-435,361	-433,457	-431,544
13	Поиск позиции	19				
14	Ближайшая м. энтропия	4,044052				
15	Ближайшая б. энтропия	4,055878				
16	Ближайшая м. температура	88				
17	Температура 2s, К	88,18042				
18	Ближайшая м. энтальпия	-215,675				
19	Ближайшая б. энтальпия	-214,621				
20	Энтальпия 2s Дж/кг	B18)				

Рисунок 38 – Поиск энтальпии h_{2s}

Найденное значение энтальпии h_{2s} позволяет определить значение энтальпии h_2 , исходя из формулы адиабатного КПД детандера:

$$h_2 = h_1 - \eta_s(h_1 - h_{2s}).$$

$$h_2 = 160,71 \text{ Дж/кг.}$$

По аналогии с поиском температуры в точке 2s необходимо определить искомое значение температуры в точке 2 после детандера (рисунок 39).

	A	B	C	D
16	Ближайшая м. температура	88		
17	Температура 2s, К	88,18042		
18	Ближайшая м. энтальпия	-215,675		
19	Ближайшая б. энтальпия	-214,621		
20	Энтальпия 2s Дж/кг	-215,485		
21	Энтальпия 2 Дж/кг	-160,709		
22	Поиск позиции	71		
23	Ближайшая м. энтальпия	-161,24		
24	Ближайшая б. энтальпия	-160,195		
25	Ближайшая м. температура	140		
26	Температура 2, К	140,5082		

Рисунок 39 – Определение температуры T_2

Таким образом, температура T_2 в конце процесса расширения газа в детандере найдена.

Задания для самопроверки

- Определить холодопроизводительность детандера и температуру в конце процесса расширения. Рабочее вещество – метан, начальное давление $p = 6,4$ МПа, конечное давление $p = 0,2$ МПа, температура $T_1 = 273$ К, $T_2 = 291$ К, $T_3 = 315$ К. Адиабатный КПД детандера $\eta_s = 0,82$. Сделать вывод о влиянии начальной температуры на конечную температуру процесса расширения.

- Определить конечную температуру газа после расширения в детандере. Сделать вывод о влиянии начального давления на конечную температуру процесса расширения. Рабочее вещество – кислород. $p_1 = 3,4$ МПа, $p_2 = 12,5$ МПа, $p_3 = 20$ МПа. Давление конца процесса расширения $p = 0,5$ МПа. Температура начала процесса расширения $T = 313,8$ К. Адиабатный КПД детандера $\eta_s = 0,75$.

- Определить температуру начала процесса расширения в детандере для азота. Температура в конце процесса расширения $T = 137$ К.

Начальное давление $p = 6,5$ МПа, конечное давление $p = 0,15$ МПа. Определить значение изотермического процесса дросселирования. Адиабатный КПД детандера $\eta_s = 0,7$.

- Определить холодопроизводительность детандера и температуру в конце процесса расширения. Рабочее вещество – природный газ, начальное давление $p = 9,8$ МПа, конечное давление $p = 1$ МПа, температура $T = 283,5$ К. Адиабатный КПД детандера $\eta_{s1} = 0,7$, $\eta_{s2} = 0,8$, $\eta_{s3} = 0,85$. Сделать вывод о влиянии значения адиабатного КПД детандера на конечную температуру процесса расширения.

Список литературы

1. Акулов Л.А. , Борзенко Е.И., Зайцев А.В. Теплофизические свойства и фазовое равновесие криопродуктов: Справ. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2008. – 567 с.
2. Герш С.Я. Глубокое охлаждение. Ч.1: Термодинамические основы сжижения и разделения газов – Л.: Госэнергоиздат. – 1957, 392с.
3. Криогенные системы: учебник для вузов: в 2 т. - М. - Машиностроение, 1996. - ISBN 5-217-02854-8. Т. 1 - Основы теории и расчёта / Архаров А. М., Марфенина И. В., Микулин Е. И. - 3-е изд., перераб. и доп. - 1996. - 575 с. - ил.
4. Микулин Е.И. Криогенная техника. М., «Машиностроение», 1969, стр. 272.

Кравченко Юлия Андреевна
Баранов Александр Юрьевич
Кравченко Денис Владимирович

**Автоматизированные инженерные расчеты в области
криогенных технологий
Часть 1**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел

Университета ИТМО

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А