

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОЖИЖЕНИЯ ГАЗА

К. Ш. АГАБАБЯН, Р. Т. МИНА

Проведен термодинамический анализ процесса ожижения газа за счет теплообмена с более низкокипящим газом для следующих комбинаций «испаряемый хладагент-ожижаемый газ»: гелий—водород, гелий—дейтерий, гелий—неон, водород—дейтерий, водород—неон и азот—аргон. Вычислены соотношения потоков этих газов. Проведено сравнение термодинамической эффективности такого способа ожижения с другими способами.

Введение

Небольшие количества жидких газов, таких, как водород, дейтерий, неон, аргон и др. удобно получать, используя для их ожижения в качестве хладагента теплоту отогрева других жидких газов, имеющих более низкую точку кипения. Этот способ, который можно назвать испарительным ожижением, довольно распространен в физике элементарных частиц и применяется при создании различного рода криогенных устройств. Широко используются жидководородные [1] и жидкодейтериевые [2] мишени, в которых ожижение газов происходит за счет испарения гелия. Описано также ожижение дейтерия с помощью жидкого водорода [3]. Испарительное ожижение аргона с помощью азота используется в слоистых ливневых детекторах на основе эффекта переходного излучения [4].

Представляет интерес оценить экономичность такого способа ожижения газа, а также сравнить его с другими способами. Такой анализ для случая ожижения водорода за счет испарения гелия проведен в работе [5]. Целью настоящей работы является термодинамический анализ процесса испарительного ожижения для следующих комбинаций «испаряемый хладагент-ожижаемый газ»: гелий—водород, гелий—дейтерий, гелий—неон, водород—дейтерий, водород—неон и азот—аргон.

Расчетные соотношения

Для ожижения газа необходимо охладить его до температуры кипения T_k и отнять от него теплоту конденсации λ . Этот процесс осуществляется в теплообменнике, для которого, если пренебречь падением давления на нем и не учитывать кинетическую энергию движущегося газа, справедливо соотношение [6]

$$m'\Delta h' = m''\Delta h'', \quad (1)$$

где m' и m'' — потоки газов, участвующих в теплообмене, $\Delta h'$ и $\Delta h''$ — разность величин удельной энтальпии каждого из газов на концах теплообменника. Одним штрихом здесь и далее обозначены величины, относящиеся к хладагенту, двумя — к газу.

Теплообменник, в котором осуществляется рассматриваемый процесс охлаждения газа, должен состоять из двух частей. Это, во-первых, предварительный противоточный теплообменник, в котором происходит охлаждение газа от 300°K до T_k^* и нагрев хладагента от T_k^* до 300°K . Во-вторых, конденсатор, в котором происходит конденсация газа и нагрев хладагента от T_k^* до T_k . Отношения потоков газов, при теплообмене которых осуществляются указанные процессы, можно называть коэффициентом охлаждения L конденсатора и коэффициентом охлаждения G теплообменника. По определению и из соотношения (1) следует

$$L = m'_i/m_i = \Delta h'_i/\Delta h_i, \quad (2)$$

$$G = m'_i/m_i = \Delta h'_i/\Delta h_i; \quad (3)$$

значками l и t обозначены величины, относящиеся соответственно к конденсатору и теплообменнику.

На рис. 1 приведены кривые зависимости молярной энтальпии $h(T)$ различных газов от температуры. Начало отсчета энтальпии ведется от значений, которые имеют эти газы в жидком состоянии. Данные для построения

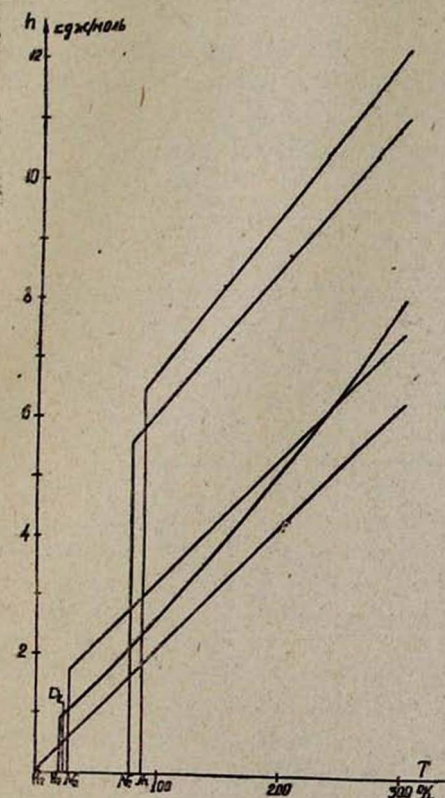


Рис. 1. Зависимость молярной величины энтальпии от температуры при атмосферном давлении для гелия, водорода, неона, азота и аргона. Для дейтерия показана теплота испарения. Начало отсчета энтальпии ведется от значения, которое имеет жидкость.

ния кривых взяты из соответствующих $T-S$ диаграмм [7]. Поскольку $\Delta h'_i$ представляет собой теплоту испарения λ'' , формулу (2) можно представить в виде

$$L = \lambda''/h' (T_K). \quad (4)$$

В случае, когда при ожижении не используется теплота испарения хладагента, коэффициент ожижения, который обозначим через R , имеет вид

$$R = \lambda''/[h' (T_K) - \lambda']. \quad (5)$$

Как видно на рис. 1, зависимость $h(T)$ для рассмотренных газов, кроме водорода, линейна во всем интервале температур. Поэтому для всех комбинаций, кроме тех, в которых в качестве хладагента выступает водород, недорекуперация на концах теплообменника равна нулю. С учетом этого формулу (3) можно записать в виде

$$G = [h''(300^\circ\text{K}) - \lambda'']/[h'(300^\circ\text{K}) - h'(T_K)]. \quad (6)$$

Если в качестве хладагента используется водород, то формула (4) справедлива при равной недорекуперации ΔT на концах теплообменника с заменой $h'(300^\circ\text{K}) - h'(T_K)$ на $h'(300^\circ\text{K} - \Delta T) - h'(T_K - \Delta T)$.

Результаты расчета

Вычисления производились по формулам (4)–(6) для различных комбинаций газов. Полученные результаты сведены в таблицу. Значения L , G и R вычислены как для весового отношения потоков m , так и для отношения объемов жидкостей V и газов g при нормальных условиях.

Таблица

	Комбинации хладагент—газ	L	R	G
Весовые отношения L_m, R_m, G_m	He—H ₂	4,1	5,0	2,5
	He—D ₂	2,4	2,9	—
	He—Ne	0,59	0,68	0,2
	H ₂ —D ₂	0,64	9,6	—
	H ₂ —Ne	0,17	1,2	0,077
	N ₂ —Ar	0,77	13,8	0,54
Отношения объемов жид- костей L_V, R_V, G_V	He—H ₂	2,3	2,9	1,4
	He—D ₂	3,2	3,8	—
	He—Ne	5,7	6,6	1,9
	H ₂ —D ₂	1,5	22,3	—
	H ₂ —Ne	2,8	20,3	1,3
	N ₂ —Ar	1,3	23,9	0,94
Отношения объемов газов при нормаль- ных условиях L_g, R_g, G_g	He—H ₂	2,1	2,6	1,2
	He—D ₂	2,3	2,8	—
	He—Ne	3,0	3,5	1,7
	H ₂ —D ₂	1,2	18,2	—
	H ₂ —Ne	1,6	11,7	1,2
	N ₂ —Ar	1,1	19,7	0,83

Как видно из данных таблицы, для всех комбинаций, для которых найден коэффициент G , его величина меньше, чем L и тем более R . Это означает, что для охлаждения газа требуется меньшее количество хладагента.

чем для ожижения. Таким образом, во-первых, соотношение потоков, необходимое при испарительном ожижении, определяется коэффициентом L (или R , если не используется теплота испарения хладагента). Во-вторых, часть потока хладагента может быть направлена на охлаждение тепловых экранов. Пример такого использования содержится в работе [8].

Экспериментальные результаты, достаточные для проверки данных таблицы для комбинации гелий—водород, приведены в работе [1], где было установлено, что в пределах точности эксперимента коэффициент R соответствует расчетной величине.

Термодинамическая эффективность

Эффективность всякого процесса ожижения характеризуется холодильным коэффициентом (ХК). Если съем тепла на температурном уровне T производится за счет испарения жидкости, то ХК равен отношению теплоты испарения λ к количеству работы A , затраченной на конденсацию испаренной жидкости. Для температурных уровней T'_k и T''_k ХК соответственно равны

$$\epsilon' = \lambda' / A', \quad (7)$$

$$\epsilon'' = \lambda'' / A''. \quad (8)$$

Так как при испарительном ожижении газа из L (или R , если не используется теплота испарения) единиц количества хладагента получается одна единица количества ожиженного газа, то ХК испарительного ожижения равен

$$\tilde{\epsilon}'' = \lambda'' / LA' = \lambda'' \epsilon' / \lambda'. \quad (9)$$

Представляет интерес оценить эффективность испарительного ожижения для следующих холодильных циклов: идеального цикла и циклов, реализуемых в действующих ожижителях. ХК идеального цикла, в котором осуществляется обратимое ожижение газа при постоянном давлении [9], равен

$$\epsilon_{ид} = \lambda / (T_{oc} \Delta S - \Delta h), \quad (10)$$

где T_{oc} — температура окружающей среды, ΔS и Δh — разности энтропии и энтальпии газа при нормальных условиях и в жидком состоянии. Зависимость $\epsilon_{ид}(T)$, вычисленная по формуле (10), приведена на рис. 2. Там же горизонтальными линиями показаны ХК действующих ожижителей, взятые из [9]. Вычисленные по формуле (9) значения $\tilde{\epsilon}''$, относящиеся к идеальному циклу и к действующим ожижителям, также показаны на рис. 2.

Анализ данных, приведенных на рис. 2, позволяет сделать следующие выводы.

1. Для идеального цикла эффективность испарительного ожижения, характеризуемая отношением $F_{ид} = \tilde{\epsilon}_{ид}'' / \epsilon_{ид}'$, меньше единицы, и тем более меньше единицы, чем больше отличаются температуры кипения хладо-

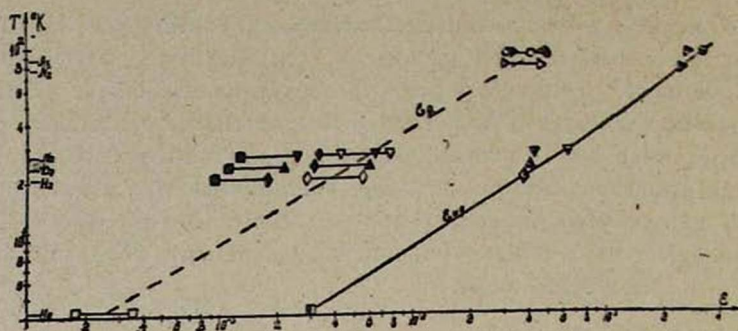


Рис. 2. Холодильные коэффициенты (ХК) ε различных циклов в логарифмических координатах. Данные приведены для шести температурных уровней, отвечающих температурам кипения T_k при атмосферном давлении гелия, водорода, дейтерия, неона, азота и аргона. Они изображены значками, имеющими одинаковый контур для одного и того же температурного уровня. На сплошной кривой $\varepsilon_{ид}$ полузалитыми значками показаны ХК идеального цикла. Для него ХК испарительного ожижения изображены значками, полузалитыми таким же образом, как и значок соответствующего хладагента. Пунктирная кривая $\varepsilon_{д}$ проходит через значения ХК действительных циклов, показанные интервалами, в начале и в конце которых стоят одинаковые полые значки. Для этих циклов ХК испарительного ожижения изображены интервалами, в начале которого стоит залитый значок, отвечающий хладагенту, а в конце—залитый значок, отвечающий газу.

агента и газа. Это связано с потерями эксергии в конденсаторе, происходящими благодаря необратимому процессу — теплообмену, протекающему при конечной разности температур хладагента и охлаждаемого газа.

2. Для циклов, реализуемых в действующих ожижителях, эффективность испарительного ожижения практически такая же, как и для идеального цикла ($F_d = \tilde{\varepsilon}_d / \varepsilon_d^* \approx F_{ид}$).

Подводя итоги, можно констатировать, что присущие испарительному ожижению потери энергии, связанные с теплообменом, сравнительно велики. Однако благодаря большому разбросу ХК реальных ожижителей испарительное ожижение по своей эффективности может оказаться сравнимым с обычными методами ожижения газа. Это хорошо видно из рис. 2, на котором имеются области, где значения ε_d^* и $\tilde{\varepsilon}_d$ перекрываются, как, например, для комбинации водород—неон или азот—аргон. Кроме того, следует учитывать и другие обстоятельства, связанные, например, с большими эксплуатационными расходами, обусловленными высокой стоимостью или взрывоопасностью охлаждаемого газа. Они могут обусловить выбор в пользу испарительного ожижения.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Ш. Агабабян и др. Научное сообщение ЕФИ 160 (76).
2. J. F. Bubb. Nucl. Instr. Meth., 92, 29 (1971).
3. V. Montelatici. Nucl. Instr. Meth., 29, 121 (1964).
4. C. W. Fabjan et al. Nucl. Instr. Meth., 141, 61 (1977).
5. Р. Т. Мина. Научное сообщение ЕФИ 142 (75).
6. Р. В. Скотт. Техника низких температур, ИЛ, М., 1962.
7. Справочник по физико-техническим основам криогеники, Изд. Энергия, М., 1973.
8. К. Ш. Агабабян. Научное сообщение ЕФИ 268 (61) 77.
9. В. Г. Фастовский и др. Криогенная техника, Изд. Энергия, М., 1974.

ԳԱԶԻ ԳՈՒՐՇԻԱՑՈՒՄՈՎ ՀԵՂՈՒԿԱՑՄԱՆ
ԹԵՐՄՈՂԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ԱՆԱԼԻԶ

Կ. Շ. ԱՂԱԲԱԲՅԱՆ, Ռ. Տ. ՄԻՆԱ

Կատարված է գազի հեղուկացման պրոցեսի թերմոդինամիկական անալիզ ալելի ցածր ջերմաստիճանում եռացող գազի հետ ջերմափոխանակման հիման վրա շարժվող խառնուրդներում—հեղուկացող գազի հետևյալ կոմբինացիաների համար՝ հելիում—ջրածին, հելիում—դեյտերիում, հելիում—նեոն, ջրածին—դեյտերիում, ջրածին—նեոն, ազոտ—արգոն: Հաշված են ալգ գազերի հոսքերի հարաբերությունները: Կատարված է հեղուկացման նշված մեթոդի և մյուս մեթոդների թերմոդինամիկական էֆեկտիվության համեմատություն:

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF VAPOUR-LIQUEFACTION
OF GASES

K. Sh. AGABABYAN, R. T. MINA

The process of gas liquefaction due to the heat exchange with another gas as a cooling agent was analyzed for the following combinations of liquefying gas and the cooling agent: helium-hydrogen, helium-deuterium, helium-neon, hydrogen-deuterium, hydrogen-neon, hydrogen-argon. The relations between gas fluxes were obtained. The comparison of thermodynamic efficiency of such a method of liquefaction with other methods is made.