

Перспективы использования вихревых аппаратов в криогенике

© В.Л. Бондаренко¹, Д.П. Тишко^{2,3}, Ю.М. Симоненко³

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ООО «Криоин Инжиниринг», Одесса, 65026, Украина

³ Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 65039, Украина

Рассмотрены проблемы использования малорасходных низкотемпературных безмашинных аппаратов. Даны примеры применения газодинамических охладителей в технологиях извлечения редких газов. В частности, показано, что понижение температуры фазового равновесия смеси в процессе очистки неона-гелиевого компонента от азота позволяет вдвое уменьшить содержание побочного компонента на выходе из фазового сепаратора. При этом указанный положительный эффект достигается за счет использования существующего перепада давлений, вследствие чего исключается необходимость в дополнительных затратах энергии.

Ключевые слова: криогенная техника, редкие газы, газодинамический охладитель, вихревая труба

Введение. В газодинамических устройствах, к которым, в частности, относятся вихревые аппараты и резонансные охладители, энергия сжатого газа трансформируется в тепловую и отводится во внешнюю среду через стенки или в виде истекающего газа. При этом происходит понижение температуры основного потока на выходе из устройства. Безмашинные криогенераторы характеризуются рядом неоспоримых эксплуатационных и конструктивных преимуществ: высокой надежностью, малой инерционностью, компактностью. Эти особенности обусловили распространение вихревых труб и пульсационных охладителей в самых различных сферах: от вакуумной техники и медицины — до криогеники [1, 2].

Цель настоящей работы — выявить возможности применения газодинамических устройств в технике низких температур несмотря на серьезные препятствия на пути расширения их использования ввиду низкой энергетической эффективности, а также отрицательного влияния масштабного фактора, обусловленного специфическими эксплуатационными параметрами.

Размеры проточной части газодинамических аппаратов. Рассмотрим проблемы, связанные с неблагоприятным влиянием масштабного фактора на примере вихревых аппаратов. Для криогенных технологий получения редких газов характерны относительно малые расходы перерабатываемых продуктов, низкая температура и повышенное давление потоков. Каждая из этих характеристик при названных условиях ведет к сокращению сечения соплового ввода F_c .

Данный параметр является базовым конструктивным фактором газодинамических устройств, так как с ним связаны основные размеры проточной части (рис. 1).

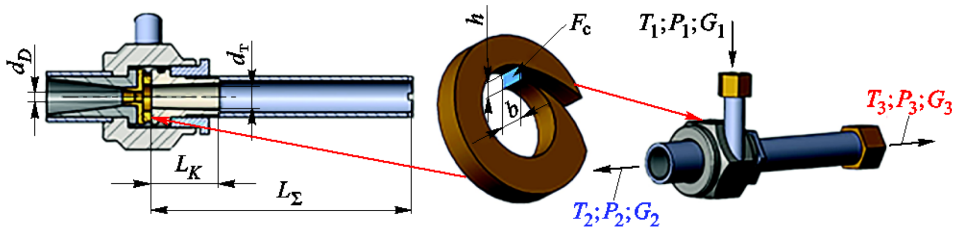


Рис. 1. Проточная часть вихревой трубы с характеристикой определяющих размеров:

T — температура сжатого газа; P — давление потоков; G — массовый расход газа

Большинство безмашинных криогенераторов, используемых в установках получения редких газов, эксплуатируются при закритических режимах истечения. Эти условия продиктованы значительными располагаемыми перепадами давлений в технологических циклах. Для процесса истечения идеального газа критическое отношение давлений ϵ_C определяется показателем адиабаты k [3, 4]:

$$\epsilon_C = \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (1)$$

где P_1 и P_2 — давление сжатого и холодного потоков соответственно.

Значение величины k для инертных газов (He, Ne, Ar, Kr и Xe) составляет $1,67 \pm 0,01$. В соответствии с формулой (1) $\epsilon_C = 2,05 \dots 2,06$. Отношения значений давления, характерных для технологии получения редких газов, в несколько раз превышают критический уровень. Для этого случая при $\epsilon > \epsilon_C$ давление холодного потока P_2 не оказывает влияния на условия истечения газа и существует вполне определенная взаимосвязь между сечением сопла F_c и массовым расходом G_1 (кг/с),

$$F_c = \frac{G_1 \sqrt{R^* T_1}}{P_1 \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}}, \quad \text{мм}^2, \quad (2)$$

где T_1 и P_1 — температура, К, и давление, Па, сжатого газа перед соплом; $R^* = \frac{R_0}{M}$ — газовая постоянная рабочего тела, Дж/(кг · К);

$R_0 = 8314$ Дж/(кмоль · К) — универсальная газовая постоянная; M — молекулярная масса.

Присутствие в формуле (2) массового расхода G_1 , кг/с, несколько затрудняет ее использование в инженерных расчетах. Более удобным и простым представляется вариант соотношения, в котором расход V_1 , м³/ч, представлен в нормальном виде:

$$V_1 = 3600 \frac{G_1}{\rho_0} = 3600 G_1 \frac{R^* T_0}{P_0}, \quad (3)$$

где $P_0 = 0,1013$ МПа и $T_0 = 293$ К — параметры, характеризующие принятые нормальные условия.

При давлении холодного потока P_2 , близком к атмосферному, справедливы соотношения: $\varepsilon = P_1 / P_2 \approx P_1 / P_0$ и

$$F_c = \frac{0,948 V_1 \sqrt{T_1}}{\varepsilon \sqrt{R^* \frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}}, \text{ мм}^2. \quad (4)$$

Зависимости основных размеров вихревых аппаратов в соответствии с формулой (4) для $V_1 = 40$ м³/ч (норм.) и $T_1 = 78$ К представлены на рис. 2. Как следует из графиков, для данных условий работы вихревых труб их диаметр $d_T = 2 \dots 6$ мм.

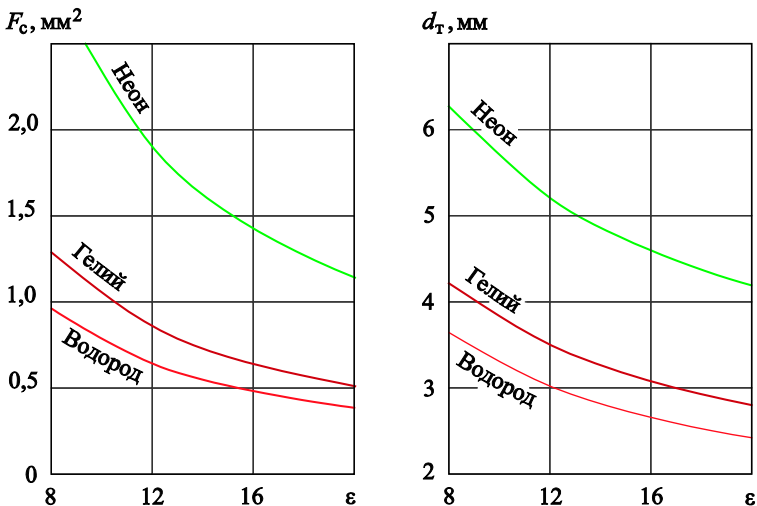


Рис. 2. Зависимость площади критического сечения соплового ввода F_c и диаметра вихревой трубы d_T от величины отношения давлений $\varepsilon = P_1/P_2$ (расход через сопло $V_1 = 40$ м³/ч; температура на входе $T_1 = 78$ К)

Конструктивные особенности малорасходных вихревых устройств для криогеники. Переход к криогенным сферам применения практически всегда сопровождается миниатюризацией аппаратов. Известно, что уменьшение размеров газодинамических охладителей приводит к снижению их эффективности. Если для вихревой трубы с большим диаметром d'_T характерна температура холодного потока T'_2 , то для вихревой трубы меньшим диаметром $d_T < d'_T$ температура холодного потока окажется выше: $T_2 > T'_2$. Эта закономерность выражается соотношением

$$T_2 - T'_2 = T_1 m (d'_T - d_T) \left(1 - \varepsilon^{\frac{1-k}{k}} \right), \quad (5)$$

где ε — отношение давлений; k — показатель адиабаты; T_1 — начальная температура газа; m — эмпирический коэффициент.

В интервале $d_T = 40 \dots 10$ мм коэффициент влияния масштаба $m = 0,005$ [1]. При переходе к малым вихревым камерам ($d_T = < 4$ мм) его значение уменьшается до $m = 0,008$. Область диаметров $d_T < 3$ мм практически не изучена даже для «высокотемпературных» вихревых аппаратов. Создание и исследование подобных устройств для криогенных температур сопряжены с рядом конструктивных и эксплуатационных препятствий. Возрастают требования к точности станочного оборудования, особенно при изготовлении сопловой улитки (см. рис. 1). Для снижения влияния пограничных эффектов требуется обеспечить минимальную шероховатость поверхностей проточной части. Следует также учитывать влияние теплоперетоков. Для этого уменьшают сечение элементов, контактирующих с охлажденным газом, и применяют менее теплопроводные материалы.

Для большинства вихревых криогенных устройств характерна еще одна особенность. Независимо от температурного режима эффективная работа газодинамических охладителей обеспечивается в диапазоне отношений давления $\varepsilon < 2 \cdot \varepsilon_C$ (см. формулу (1)). Как отмечено выше, интервал значений давления, характерных для криогенной сферы применения, существенно превышает это условие, поэтому низкотемпературные охладители предполагают ступенчатое включение вихревых труб. При этом отношение давлений в отдельных ступенях выражается соотношением

$$\varepsilon_i = \sqrt[n]{\varepsilon_\Sigma}, \quad (6)$$

где ε_Σ — полное отношение давлений (т. е. отношение входного давления к выходному последней ступени каскада вихревых труб)

ступенчатого охладителя; n — количество ступеней; ε_i — отношение давлений в отдельной ступени.

В соответствии с формулой (2) в случае последовательного расширения потока в каскаде вихревых труб вторая и последующие ступени имеют большие размеры, чем первая. Соответственно, возрастает и их эффективность вследствие уменьшения отрицательного влияния масштабного фактора.

Конструкции маломасштабных вихревых труб и их отдельных элементов показаны на рис. 3–5.

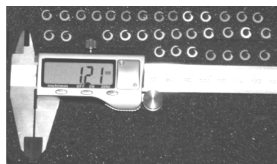


Рис. 3. Серия спиральных сопловых вводов ($F_T = 0,34 \text{ мм}^2$)

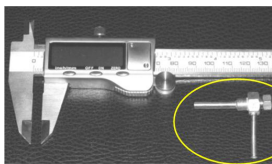


Рис. 4. Вихревая труба ($d_T = 2,2 \text{ мм}$)



Рис. 5. Каскад вихревых труб ($d_{T_1} = 3,5 \text{ мм}$,
 $d_{T_2} = 5,0 \text{ мм}$)

Заключение. Газодинамические охладители уступают по эффективности детандерам, однако этот недостаток нивелируется конструктивными и эксплуатационными достоинствами таких аппаратов [5–7]. Вихревые трубы легко «вписываются» в схемы низкотемпературных установок, поскольку они многофункциональны, способны охлаждать поток газа, выполнять функции эжектора, сепаратора и генератора колебаний.

Перспективной сферой применения безмашинных охладителей являются производства с применением технологий извлечения редких газов, в которых в результате понижения температуры достигается эффективное разделение смесей в фазовых сепараторах. При указанном положительном эффекте, обеспечиваемом за счет использования существующего перепада давлений, не требуются дополнительные затраты энергии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Меркулов А.П. *Вихревой эффект и его применение в технике*. Москва, Энергия, 1977, 343 с.
- [2] Arkharov A.M., Bondarenko V.L., Simonenko, Iu.M. Oscillatory and Vortex Devices and Their Use in Rare Gases Extraction. *Proceedings of a 11th IIR International Conference on Cryogenics*. Slovakia, Bratislava, 2010, pp. 180–182.
- [3] Кириллин В.А., Сычёв В.В., Шейндлин А.Е. *Техническая термодинамика*. Москва, Энергия, 1974, 447 с.
- [4] Prakabaran J., Vaidyanathan S. Effect of orifice and pressure of counter flow vortex tube. *Indian Journal of Science and Technology*, 2010, no. 4, pp. 374–376.

- [5] Bondarenko V.L., Arkharov A.M., Simonenko Yu.M. Wave Cryogenerators Applied in Technologies of Rare Gas Separation. *The 22nd International Congress of Refrigeration*, China, Beijing, 2007, ICR-A2-132.
- [6] Гуляев А.И. Эффект Ранка при низких температурах. *Инженерно-физический журнал*, 1965, № 9, с. 354–358.
- [7] Yunpeng Xue. *The working principle of a Ranque-Hilsch Vortex Tube*. The University of Adelaide, Australia, 2012, 121 p. URL: <http://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/bitstream/2440/82139/8/02whole.pdf>

Статья поступила в редакцию 13.02.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бондаренко В.Л., Тишко Д.П., Симоненко Ю.М. Перспективы использования вихревых аппаратов в криогенике. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1657>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на 13-й Международной научно-практической конференции «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития», состоявшейся 1–2 ноября 2016 г., Москва

Бондаренко Виталий Леонидович — д-р техн. наук, академик МАХ, заведующий кафедрой «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: очистка и извлечение редких газов. e-mail: vbondarenko@cryoin.com

Тишко Дмитрий Павлович — аспирант кафедры «Криогенная техника и технологии» Одесской национальной академии пищевых технологий; инженер-исследователь компании ООО «Криоин Инжиниринг». e-mail: dtishko@cryoin.com

Симоненко Юрий Михайлович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Криогенная техника и технологии» Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: очистка и извлечение редких газов. e-mail: ysim1@yandex.ru

Prospects of using vortex devices in cryogenics

© V.L. Bondarenko¹, D.P. Tyshko^{2,3}, Yu. M. Simonenko³

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 107005, Russia

² Cryoin Engineering Ltd, Odessa, 65026, Ukraine

³ Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 65039, Ukraine

The study focuses on the problems of using low-consumption low-temperature machine-less apparatuses. We give examples of using gas-dynamic coolers in technologies for extracting rare gases and show, in particular, that a decrease in the phase equilibrium temperature of the mixture during the purification of Ne-He-concentrate from nitrogen makes it possible to halve the presence of the secondary component at the exit from the phase separator. In this case, this positive effect is achieved by using the existing pressure difference, which eliminates the need for additional energy costs.

Keywords: cryogenic engineering, rare gases, gas-dynamic cooler, vortex tube

REFERENCES

- [1] Merkulov A.P. *Vikhrevoiy effekt i ego primeneniye v tekhnike* [Vortex effect and its application in engineering]. Moscow, Energiya Publ., 1977, 343 p.
- [2] Arkharov A.M., Bondarenko V.L., Simonenko, Yu.M. Oscillatory and Vortex Devices and Their Use in Rare Gases Extraction. *Proceedings of a 11th IIR International Conference on Cryogenics*. Slovakia, Bratislava, 2010, pp. 180–182.
- [3] Kirillin V.A., Sychoy V.V., Sheyndlin A.E. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Engineering thermodynamics]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 447 p.
- [4] Prakabaran J., Vaidyanathan S. *Indian Journal of Science and Technology*, 2010, no. 4, pp. 374–376.
- [5] Bondarenko V.L., Arkharov A.M., Simonenko Yu.M. Wave Cryogenerators Applied in Technologies of Rare Gas Separation. *The 22nd International Congress of Refrigeration*, China, Beijing, 2007, ICR-A2-132.
- [6] Gulyaev A.I. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1965, no. 9, pp. 354–358.
- [7] Yunpeng Xue. *The working principle of a Ranque-Hilsch Vortex Tube*. The University of Adelaide, Australia, 2012, 121 p. URL: <http://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/bitstream/2440/82139/8/02whole.pdf>

Bondarenko V.L. (b. 1955) graduated from Odessa Technological Institute of Refrigeration Industry in 1977. Dr. Sc. (Eng.), Academician of the International Academy of Refrigeration, Head of the Department of Refrigerating and Cryogenic Technology, Systems of Air Conditioning and Life Support Department of the Bauman Moscow State Technical University. Research interests include technology of high purity inert gases, cryogenic systems separators, gas-dynamic coolers. e-mail: vbondarenko@cryoin.com

Tyshko D.P., post-graduate student of the Department of Cryotechnologies, Odessa National Academy of Food Technologies; research engineer of Cryoin Engineering Ltd. e-mail: dtishko@cryoin.com

Simonenko Yu.M. (b. 1952) graduated from Odessa Technological Institute of Refrigeration Industry in 1974. Dr. Sc (Eng.), Professor, Head of the Department of Cryotechnologies of Odessa National Academy of Food Technologies. Research interests include cryogenic separation technology of multi-component gas mixtures. e-mail: ysim1@yandex.ru