

Ю. В. Н и к и ф о р о в, С. Д. Г л у х о в,  
А. А. К а з а к о в а

## ПОЛУЧЕНИЕ ЖИДКОГО АЗОТА С ПОМОЩЬЮ АДСОРБЦИОННОЙ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И КРИОГЕННОЙ ГАЗОВОЙ МАШИНЫ

*Предложена новая технологическая схема установки для получения жидкого азота. Установка состоит из адсорбционной воздуходелительной установки для получения газообразного азота и машины “Филипс” и позволяет снизить на удельные энергозатраты на единицу получаемого продукта по сравнению с установкой, состоящей из машины “Филипс” и азотной колонны. Предлагаемая схема может быть использована и для получения жидкого кислорода, если адсорбционную воздуходелительную установку АВРУ-А заменить на АВРУ-К.*

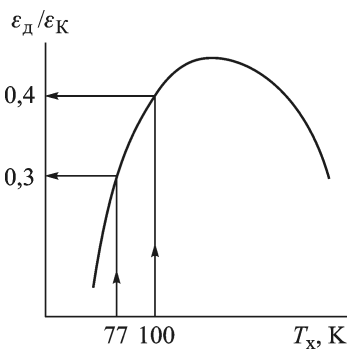
**E-mail:** [crio@power.bmstu.ru](mailto:crio@power.bmstu.ru); [2367817@mail.ru](mailto:2367817@mail.ru)

**Ключевые слова:** азот, машина “Филипс”, азотная колонна, холодильный коэффициент, цикл Стирлинга, адсорбция, воздуходелительная установка.

После распада СССР резко сократилось число работающих воздуходелительных установок (ВРУ) малой производительности для получения жидкого азота, хотя спрос на жидкий азот в ограниченных количествах сохранился. В настоящей статье рассматривается один из вариантов решения данного вопроса.

Известен способ получения жидкого азота в небольших количествах ( $50 \dots 60 \text{ дм}^3/\text{ч}$ ) с помощью ВРУ типа АЖ-0,05 [1, 2], включающей в себя криогенную газовую машину (КГМ), работающую по обратному циклу Стирлинга (холодопроизводительностью  $9000 \text{ Вт}$  при  $T = 77 \text{ К}$ ), и азотную колонну. Известно [3–5], что оптимальная область температур охлаждения подобной КГМ, реализованной впервые фирмой “Филипс”, находится в диапазоне температур от  $100$  до  $160 \text{ К}$  (рис. 1). Следует отметить, что в установке АЖ-0,05 на головке КГМ конденсируется азот высокой чистоты ( $99,5 \dots 99,8 \% \text{ N}_2$ ) при температуре, близкой к  $77 \text{ К}$ , образуя азотную флегму для колонны ректификации и продукционный поток азота. При этом отношение холодильных коэффициентов (реального цикла и цикла Карно) равно  $\sim 0,3$ , а удельные затраты энергии —  $2,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}_{\text{N}_2}$ . Из анализа составляющих холодопроизводительности КГМ (АЖ-0,05) [1, 2] следует, что непосредственно на сжижение продукционного азота расходуется  $73 \%$  холодопроизводительности КГМ, т.е.  $6,6$  из  $9 \text{ кВт}$ . Остальное расходуется на компенсацию теплопритоков из окружающей среды, потери с отбросным кислородом, потери в колонне и вымораживание влаги (при производительности по жидкому азоту  $55 \text{ кг}/\text{ч}$ ).

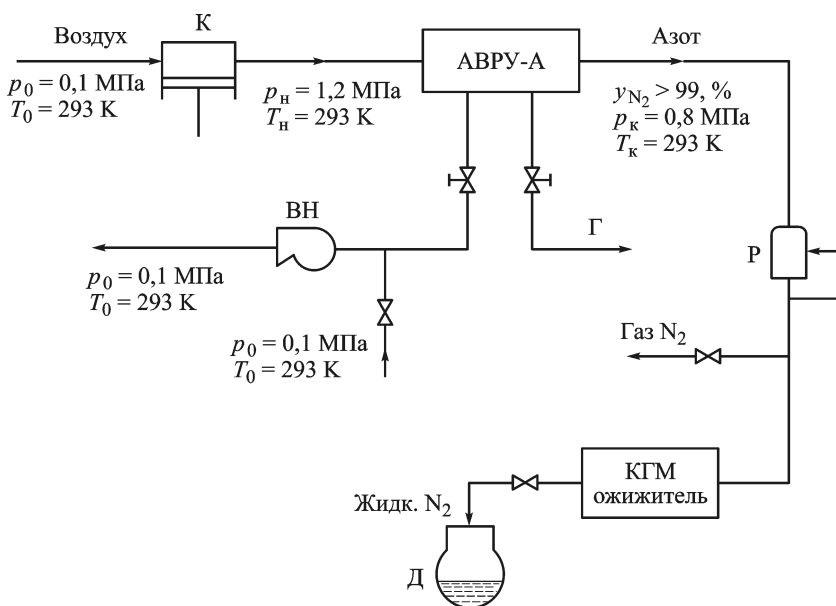
Альтернативой использованию ВРУ с КГМ Стирлинга с азотной колонной может служить АВРУ-А, после которой, полученный азот полностью или частично охлаждается с помощью КГМ (без использования колонны). Поскольку производственный азот выходит из АВРУ-А под давлением, то температура сжижения азота будет выше 77 К. Например, при 0,8 МПа температура конденсации азота при чистоте 99,5 % будет близка к 100 К. При такой температуре охлаждения холодильный коэффициент машины Стирлинга будет на 30...35 % выше, чем при 77 К (см. рис. 1).



**Рис. 1.** Отношение действительного холодильного коэффициента к холодильному коэффициенту цикла Карно в зависимости от минимальной температуры камеры машины “Филипс”

Принципиальная схема установки АВРУ-А с КГМ Стирлинга для сжижения производственного газообразного азота (всего или части) представлена на рис. 2 и включает в себя компрессор (К), непосредственно установку адсорбционного разделения (АВРУ-А), вакуумный насос (ВН) для откачки кислорода, ресивер (Р) производственного азота, охладитель азота (КГМ), сборник жидкого азота (Д). Имеется также отбор газообразного азота  $N_2$  и линия сброса газа в атмосферу (Г).

Большинство современных адсорбционных установок АВРУ-А работают в циклическом режиме, при этом поглощают нецелевой ком-



**Рис. 2.** Принципиальная схема установки АВРУ-А для получения жидкого азота

понент (в рассматриваемом случае — это кислород из потока воздуха). Для этого были созданы специальные адсорбенты, селективно поглощающие кислород, которые получили название “углеродно-молекулярные сита” (УМС). Основополагающая работа в этом направлении была выполнена в 1973 г. [3]. Серийное производство таких адсорбентов было освоено к началу 80-х гг. XX в. Современные АВРУ-А с использованием УМС позволяют получать азот с чистотой выше 99,5 %, при этом воздух на входе в установку может сжиматься до давления 1,2 МПа. В случае получения менее чистого азота (менее 95 %) используют более простые технологические схемы и более низкое давление воздуха.

Как следует из рис. 1, желательно иметь температуру охлаждения на холодной головке КГМ примерно 100 К, что соответствует давлению производственного азота на выходе из АВРУ-А 0,8 МПа. Использование машины КГМ-9000/80-1 (как в установке Аж-0,05) в случае конденсации азота с концентрацией 99,5 % приведет к экономии энергии привода на 27 %, а за счет увеличения холодильного коэффициента вследствие увеличения температуры конденсации азота с 77 К до 100 К (из-за роста давления азота) дополнительно на 30 % [3]. Однако при этом не учтены затраты энергии на получение  $N_2$  на установке АВРУ-А, которые составляют 0,45...0,5 кВт·ч/кг $N_2$ . С учетом этих затрат и экономии энергии привода КГМ на сжижение азота под давлением 0,8 МПа получим общий расход энергии 1,5...1,6 кВт·ч/кг $N_2^*$ . При дросселировании жидкости до атмосферного давления удельный расход энергии сравнивается с соответствующими показателями Аж-0,05. К техническим преимуществам предложенной установки следует отнести короткий пусковой период АВРУ-А и КГМ Стирлинга, что позволяет быстро запустить установку, а также обеспечивает ее автономность.

Предлагаемая в настоящей статье схема получения жидкого азота может быть реализована и для получения жидкого кислорода при замене АВРУ-А на АВРУ-К (кислород). Поскольку температура конденсации кислорода выше, чем у азота, сжижение кислорода может быть проведено при более низком давлении, чем сжижение азота (0,5...0,6 МПа вместо 0,8 МПа).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архаров А. М., Марфенина И. В., Микунин Е. И. Криогенные системы: В 2 т. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1996.
2. Архаров А. М., Марфенина И. В., Микунин Е. И. Криогенные системы: В 2 т. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987.

3. Келер, Джонкерс. Газовая холодильная машина “Филипс” // В сб. Вопросы глубокого охлаждения / Пер. с англ.; Под ред. М.П. Малкова. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – С. 7–42.
4. Вандер Стер, Келер. Установка для получения жидкого азота с газовой холодильной машиной “Филипс” // В сб. Вопросы глубокого охлаждения / Пер. с англ. под ред. М.П. Малкова. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – С. 43–51.
5. Марфенина И. В. Машина “Филипс” с азотной колонной. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1967. – 42 с.
6. Yuntgen H., Kuoblach K., Munrher H., Peters W. BF-Verfahren zur Sauerstoff-Anreicherung der Luft nit Moleckularsieb Koksenceus Stein Kohle // Chemic Ingenieur Technic, 1973, b. 45. – No. 8. – S. 533–537.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012