

В. П. Леонов, Т. М. Розеноер,
А. В. Поликарпов

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНЫХ ТУРБОДЕТАНДЕРОВ В СОСТАВЕ ВОЗДУШНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К БЫСТРОЙ ЗАМОРОЗКЕ ПРОДУКТОВ

Приведено описание экспериментального стенда для исследования работы турбодетандера в составе воздушной холодильной установки быстрого замораживания пищевых продуктов. Представлены результаты испытаний.

E-mail: crio@power.bmstu.ru

Ключевые слова: воздушная турбохолодильная установка, турбодетандер, холодильная камера.

Современные запреты на использование различных хлорфторсодержащих фреонов и ограничения по объему заправки взрывоопасных хладагентов в парокompрессионных установках при постоянно растущем потреблении холода привели к тому, что наряду с поиском альтернативных хладагентов рассматриваются различные методы получения холода для нужд пищевой промышленности. В этой связи актуальным становится применение циклов газовых холодильных машин, которые были известны еще до появления парокompрессионных холодильных машин.

Одним из частных случаев установки, выполненной на базе газовой холодильной машины, является турбохолодильная установка, в которой в качестве рабочего тела используется атмосферный воздух. Можно выделить несколько решений по созданию воздушных турбохолодильных установок (ВТХУ), в частности воздушных турбохолодильных машин, работающих в составе ВТХУ.

Первое решение — с помощью осевых машин, применяемых в авиации (турбин и компрессоров), решен широко известный “русский цикл” В.С. Мартыновского, С.К. Туманского и М.Г. Дубинского (наличие в цикле давления ниже атмосферного позволило применить осевые машины из-за увеличения геометрических размеров), на котором основана воздушная турбохолодильная машина, появившаяся в 1960-е годы. Тогда же была определена граница рационального использования ВТХУ на уровне $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1].

Второе решение по созданию ВТХУ пришло из криогеники, где в основном использовались центростремительные турбодетандеры и центробежные компрессоры, работающие в составе воздухоразделительных установок (ВРУ) и различного рода ожижителей (ОЖ)

газов (гелия, водорода, природного газа и т.д.). В середине XX в. на кафедре Э-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством профессора И.В. Марфениной была построена и испытана низкотемпературная воздушная холодильная установка с турбодетандером на уровне -170°C .

Появление азотных систем хладоснабжения для производства быстрозамороженных пищевых продуктов [2], возможность применения ВТХУ вместо таких систем и современный взгляд на проблему накопления холода как на способ энергосбережения и оптимизации энергопотребления [3] добавили преимуществ ВТХУ и позволили расширить границы их использования. В конце 1990-х годов коллективом специалистов под руководством канд. техн. наук А.Ш. Кобулашвили (выпускника МГТУ им. Н.Э. Баумана) был создан ряд ВТХУ по простейшей схеме [4], в основу которой легли уже известные из криогенной техники основные технические решения. Например, использование радиально-осевых турбодетандеров привело к значительному уменьшению размеров холодильной машины (в частности, этому способствовало появление магнитных, газовых и масляных подшипников различного типа, позволяющих поддерживать не просто высокие числа оборотов ротора, но и оптимальное их значение в целях получения максимального КПД турбодетандера). Раздельная компоновка турбодетандерного агрегата (ТДА) и основной системы подготовки сжатого воздуха (аналога блоков компримирования и блоков комплексной очистки в криогенных ожижителях) позволила расположить ТДА в непосредственной близости к охлаждаемому объекту (камере, туннелю и т.п.).

Настоящая работа — это продолжение дела, начатого А.Ш. Кобулашвили; она нацелена на создание и внедрение эффективных ВХТУ для пищевой промышленности. На базе НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова был создан стенд для исследования центробежных турбодетандеров в составе воздушной холодильной установки (рис. 1). Стенд позволяет изучать работу ВТХУ в рабочих условиях, т.е. на нем параллельно можно исследовать процессы заморозки различных продуктов в холодильной камере. Целью всех испытаний является не только проверка результатов всех теоретических расчетов, но и действительная оценка работоспособности ВТХУ при постоянно изменяющемся режиме работы (особенно при заморозке в холодильной камере, куда продукт поступает периодически).

Схема измерений основных параметров, необходимых для оценки работы турбодетандера, приведена на рис. 2. Температуры измеряются платиновыми термопреобразователями сопротивления (ДТС-50П.А3, класс точности А по трехпроводной схеме). Давление измеряется преобразователями избыточного давления (ПД100-ДИ, класс

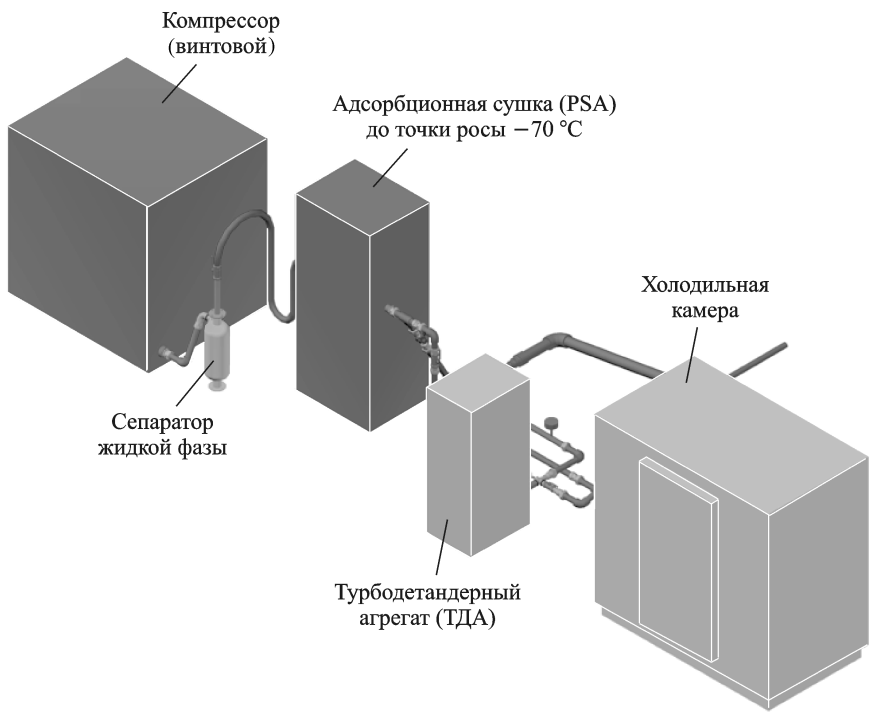


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда (ВТХУ)

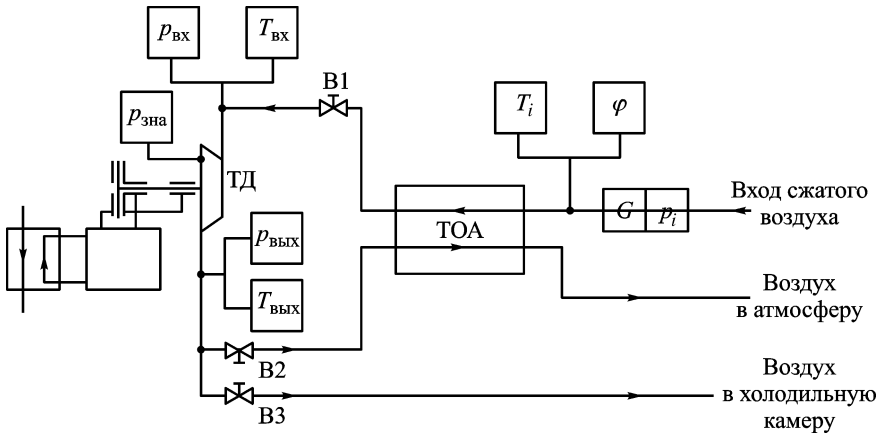


Рис. 2. Схема измерения параметров турбинной ступени:

T_i — точка замера температуры, p_i — точка замера давления, G — точка замера расхода, φ — точка замера относительной влажности

точности 0,5, с унифицированным аналоговым выходом 4...20 мА), показания которых дублируются манометрами, предназначенными для точных измерений (МТИ, класс точности 0,6). Расход — счетчиком газа вихревого типа (Метран 331, предел допускаемой основной относительной погрешности измерения расхода газа в рабочих условиях не более $\pm 1\%$). Влагосодержание воздуха (точки росы) контролируется с помощью прибора КИП-20 и преобразователя давления. Все

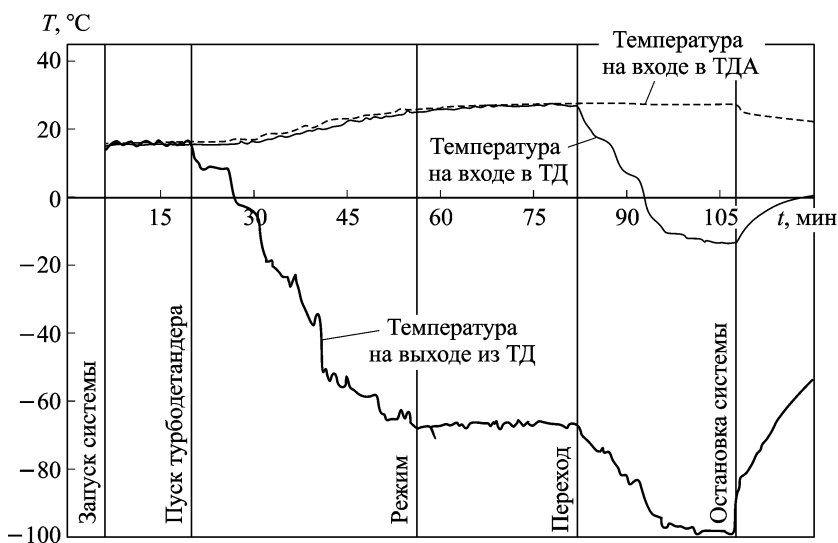


Рис. 3. Зависимость изменения температур до и после турбодетандера в процессе методических опытов

датчики (преобразователи температур, давлений и т.п.) подключены к вторичным измерительным приборам, которые объединены в одну коммуникационную сеть.

Регистрация всех результатов измерений на стенде автоматизирована и проводится в реальном времени с интервалом опроса 15 с (минимальный период опроса может составлять 1 с), соответственно опрос и запись показаний всех датчиков проводится в одно и то же время менее чем за 1 с. На рис. 3 представлены зависимости изменения некоторых температур в процессе методических испытаний. Испытуемый турбодетандер имел колесо диаметром 59 мм, лопаточный направляющий аппарат; параметры двух основных режимов представлены в таблице.

Таблица

Пример установившихся режимов работы турбодетандера

$P_{\text{вх}}$	$P_{\text{зна}}$	$P_{\text{вых}}$	$T_{\text{вх}}$	$T_{\text{вых}}$	n , об/мин	G , кг/с ($\text{нм}^3/\text{ч}$)	η_s , %	N , кВт	U_1/C_s	ρ_t	U_1 , м/с
бар			°C								
5,77	2,23	1,11	25,7	-67,6	91'700	0,127 (383)	82,7	11,8	0,598	0,366	283
5,90	2,27	1,05	-12,8	-98,1	91'000	0,141 (426)	83,5	11,9	0,625	0,378	281

Как для теоретических расчетов, так и для обработки полученных результатов испытаний используются термодинамические свойства реальных веществ (в частности, воздуха). Обработка полученных данных также осуществляется в автоматическом режиме с помощью специально созданной программы. В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости изменения изоэнтропийного КПД и степени

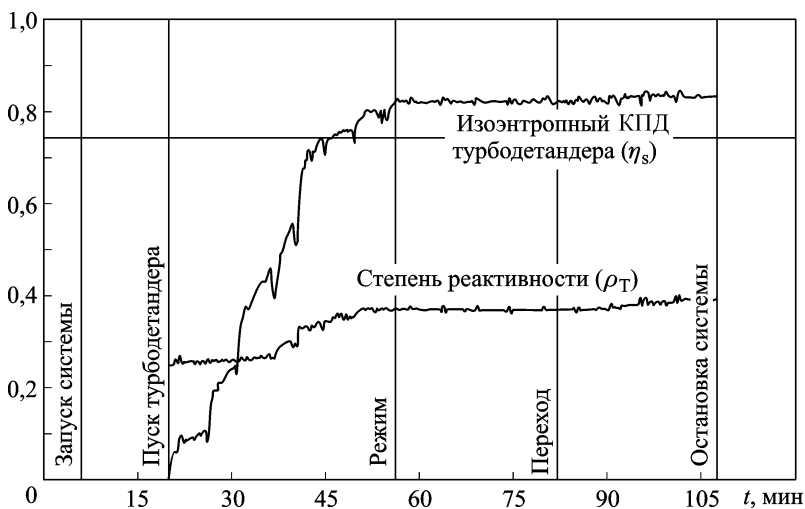


Рис. 4. Зависимость изменения изоэнтропийного КПД и степени реактивности турбодетандера в процессе методических опытов

реактивности турбодетандера в процессе работы. В конечном итоге выполняется анализ полученных результатов, определяется область достоверных значений и проводится их сравнение с результатами теоретических расчетов.

Предварительные опыты показали, что при работе ВТХУ (например, в процессе замораживания определенного продукта) температура отработавшего воздуха из холодильной камеры может значительно изменяться (данное изменение определяется типом, количеством замораживаемого продукта, т.е. теплообменом между воздухом и продуктом) и в основном значение выходной температуры находится ниже 0°C . Для повышения энергоэффективности очевидным является возврат “недоиспользованного холода” в установку. В этом случае при изменении температурного режима охлаждаемого объекта происходит значительное изменение режима работы турбодетандера, особенно при использовании основного компрессора постоянной производительности (изменяются не только температуры, но и давления). На стенде предусмотрена различная регулировочная арматура, установленная таким образом, чтобы проводить испытания без полезной нагрузки в камере, т.е. моделировать условия работы ВТХУ непосредственно без самого объекта охлаждения.

В процессе пуска–наладки стенда было решено большое число прикладных вопросов, что необходимо учитывать при проектировании и создании серийной ВТХУ.

При испытании совместно с полезной нагрузкой в камере возникла проблема доставки низкотемпературного воздуха после детандера ($-70^{\circ}\text{C} \dots -100^{\circ}\text{C}$) непосредственно до продукта. Совместные работы с аспирантами профессора К.П. Венгер (МГУ ПБ) по заморозке продукции различного вида помогли решить данную проблему, в частности работа с аспирантом Н.Б. Панышиным (МГУ ПБ). В холодильной

камере была установлена изолированная система распределения воздуха, отличающаяся относительной простотой конструкции, которая позволила получить равномерные поля скоростей и температур обдува продукта во всей камере.

Частные данные по воздуху, полученные в результате испытаний, научный труд И.В. Марфениной (“Исследование процессов и циклов рефрижераторных криогенных установок с детандерами”) и современные подходы к анализу реальных энергетических потерь в низкотемпературных машинах и установках [5, 6] предполагается использовать в дальнейшем при рассмотрении замкнутых циклов газовых турбохолодильных машин на аргоне, азоте, криптоне и других веществах. Данный анализ позволит найти оптимальное решение не только для пищевой промышленности, но и для других сфер человеческой деятельности, например, использование обратного цикла Брайтона для космических спутников и обитаемых космических станций в системах терморегулирования [7, 8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М а р т ы н о в с к и й В. С., М е л ь ц е р Л. З. Температурные границы рационального использования воздушных холодильных машин // Холодильная техника. – 1955 – № 2.
2. А н т о н о в А. А., В е н г е р К. П. Азотные системы хладоснабжения для производства быстрозамороженных пищевых продуктов. – Рязань: Изд-во “Узорочье”, 2002. – 207.
3. К п р о б л е м е накопления холода как способу энергосбережения и оптимизации энергопотребления / А.М. Архаров, А.И. Леонтьев, В.В. Сычев и др. // Междунар. науч. конф. Промышленные газы, 2009.
4. Н о в ы е установки быстрого замораживания пищевых продуктов низкотемпературным воздухом, расширенным в турбодетандере / А.М. Архаров, А.Ш. Кобулашвили, Т.М. Розеноер, И.Н. Журавлева, К.П. Венгер, А.А. Антонов // Холодильная техника. – 2004. – № 9.
5. А р х а р о в А. М., С ы ч е в В. В. Основы энтропийно-статистического анализа реальных энергетических потерь в низкотемпературных и высокотемпературных машинах и установках // Холодильная техника. – 2005. – № 12.
6. С о п о с т а в л е н и е эффективности парокompрессионных и воздушных холодильных машин / В.М. Бродянский, Е.Н. Серова, И.М. Калнинь // Холодильная техника. – 1999. – № 11.
7. E v a l u a t i o n of reverse Brayton cycle heat pump for Lunar base cooling / K.R. Sridhar, Ashok Nanjundan, Matthias Gottmann, Theodore D. Swanson, Jeffrey Didion // 24th International Conference on Environmental Systems. Friedrichshafen, Germany June 20–23, 1994.
8. Я д е р н а я замкнутая газотурбинная энергоустановка геостационарного информационного спутника / Б.И. Каторгин, В.И. Архангельский, А.И. Леонтьев и др. // Междунар. конф. Ядерная энергетика в космосе – 2005, Москва–Подольск, 1–3 марта, 2005.
9. Д ь я ч е н к о Ю. В. Исследование термодинамических циклов воздушных холодильных машин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 404 с.

Статья поступила в редакцию 1.07.2010