ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ XXI ВЕКА: ЖИДКИЙ АЗОТ КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЙ ХЛАДАГЕНТ

Канд. техн. наук **Н.Г. КИРИЛЛОВ**,
федеральный эксперт научно-технической сферы
ВКА им. А.Ф. Можайского, ООО «ИИЦ «Стирлинг-технологий»

A possibility of use of low-temperature Stirling machines (KGM) for development of nitrogen cooling closed systems which are the alternative to straight-flow nitrogen systems is considered. The advantages of closed systems based on KGM Stirling are their independence, long operation time, low weight and dimensions. These systems can be used for thermostatting of the objects, for elimination of losses during storage of oil products and cryogenic liquids, in construction for production of high-quality concrete.

В последнее время в связи с ужесточением экологических требований к современной холодильной технике все более актуальной становится проблема поиска и создания экологически безопасных способов получения холода. Одним из перспективных направлений в этой области являются низкотемпературные технологии на основе жидкого азота.

Замкнутые системы азотного охлаждения

В настоящее время в России созданы и эксплуатируются безмашинные проточные (расходные) системы азотного охлаждения. По сравнению с традиционной холодильной техникой они отличаются высокой надежностью в эксплуатации и скоростью замораживания, обеспечивающей практически полное сохранение качества и внешнего вида охлаждаемого продукта.

Однако проточные системы азотного охлаждения имеют ряд недостатков, препятствующих их широкому применению:

- относительно невысокая рентабельность из-за высокой стоимость жидкого азота;
- однократное использование ценного криоагента – азота с последующим выбросом его в атмосферу и т.д.

Область применения проточных систем азотного охлаждения ограничивается в основном переработкой и хранением продуктов питания.

Практика показывает, что при существующем уровне цен на жидкий азот системы азотного охлаждения расходного типа целесообразно применять, только если потенциальный потребитель расположен в непосредственной близости от производителя дешевого жидкого азота и при этом имеется достаточно транспортных средств с криогенными емкостями. По мнению многих специалистов, проточные системы азотного охлаждения могут составить конкуренцию традиционным решениям только в случае снижения цены жидкого азота в 2 раза [1].

Однако проблема значительного удешевления и быстрого внедрения технологий с применением жидкого азота на территории Российской Федерации может быть решена путем применения замкнутых систем азотного охлаждения. Такие системы, разработанные специалистами ООО «Инновационно-исследовательский центр «Стирлинг-технологий» ВКА им. А.Ф. Можайского,

Характеристики низкотемпературных машин Стирлинга, применяемых для замкнутых систем сезонного охлаждения

Модель КГМ	Тип привода	Холодопроизводительность, кВт	Мощность электродвигателя, кВт	Масса машины, кг	Фирма-изготовитель
PLA-107 (1)	Кривошипно-шатунный механизм (КШМ)	0,87	11	250	Philips
PLA-433 (4)		3,5	40	1000	
PPG-2500		25	120	5500	
SGL-1 (1)	То же	0,7	11	250	Stirling Cryogenics
SGL-4 (4)		3,0	34	1000	
Werkspoor (1)	Ромбический привод	9,2	110	1600	Werkspoor
Werkspoor (2)	То же	18,4			
Werkspoor (3)	КШМ	36	240	6000	
Модель B (4)	КШМ	3,4	34		North American Philips
Модель C (1)		11,6	87		
Модель D		46,9	352	7000	
ЗИФ-1000	КШМ	1,0	17	500	МЗ "Арсенал"
ЗИФ-2002		2,0	30	500	
КГМ-9000/80	Ромбический привод	9,6	110	1500	НПО "Гелий-маш"
КГМ-1500/80		1,5	38	840	
КГМ-15		6,0	70	3600	

включают процессы охлаждения объекта, регенерации и хранения жидкого азота. Это позволяет использовать холодильный потенциал жидкого азота при полном исключении безвозвратных потерь самого криоагента [3].

В замкнутых системах азотного охлаждения применены криогенные газовые машины (КГМ) Стирлинга (для переконденсации паров жидкого азота и исключения его безвозвратной потери). При использовании этих систем отпадает (или значительно сокращается) необходимость в постоянном приобретении и транспортировке большого количества жидкого азота, обеспечивается постоянное криогенное охлаждение при резком снижении потребления жидкого азота.

В настоящее время в России и за рубежом серийно выпускается достаточно много различных модификаций низкотемпературных высокоэффективных машин Стирлинга, работающих на температурном уровне жидкого азота, т. е. 77 К (–196 °С).

Основные технические характеристики зарубежных и отечественных низкотемпературных машин Стирлинга, которые могут быть использованы при создании замкнутых систем азотного охлаждения, представлены в таблице [2, 4, 6].

Уже создан необходимый научно-технический и патентный задел для создания замкнутых систем азотного охлаждения в кратчайшие сроки.

В отличие от применяемых до настоящего времени расходных систем с жидким азотом замкнутые системы азотного охлаждения с КГМ Стирлинга для термостатирования объектов имеют следующие преимущества:

- автономность (нет необходимости постоянной дозаправки системы жидким азотом, возможна эксплуатация без обслуживающего персонала);
- большая продолжительность работы, гарантируемая высоким ресурсом современных КГМ Стирлинга;
- малые масса и габариты (небольшой исходный объем жидкого азота при продолжительном сроке эксплуатации) и т.д.

Области применения замкнутых систем азотного охлаждения

Термостатирование объектов.

На рис. 1 представлена принципиальная схема автономной замкнутой системы азотного охлаждения для термостатирования объектов с одновременной выработкой электроэнергии (патент № 2159910).

Система работает следующим образом. Жидкий азот из емкости *1* подается погружным центробежным насосом *2* в воздухоохлаждающую панель *4*, расположенную в теплоизолированном охлаждаемом объеме *3*, охлаждает его до нужной температуры, при этом сам переходит в газообразное состояние. Затем азот расширяется, производя полезную работу, в расширительных турбинах *5* и *8* высокого и низкого давлений с промежуточным подогревом в теплообменнике *7*.

Из расширительной емкости *10* азот засасывается в конденсатор *12* криогенной холодильной машины (КХМ) Стирлинга *11*, где конденсируется, переходя в жидкую фазу, и сливается самотеком в сосуд Дьюара *14*, из которого насосом высокого давления *15* снова подается в емкость *1*. Нагре-

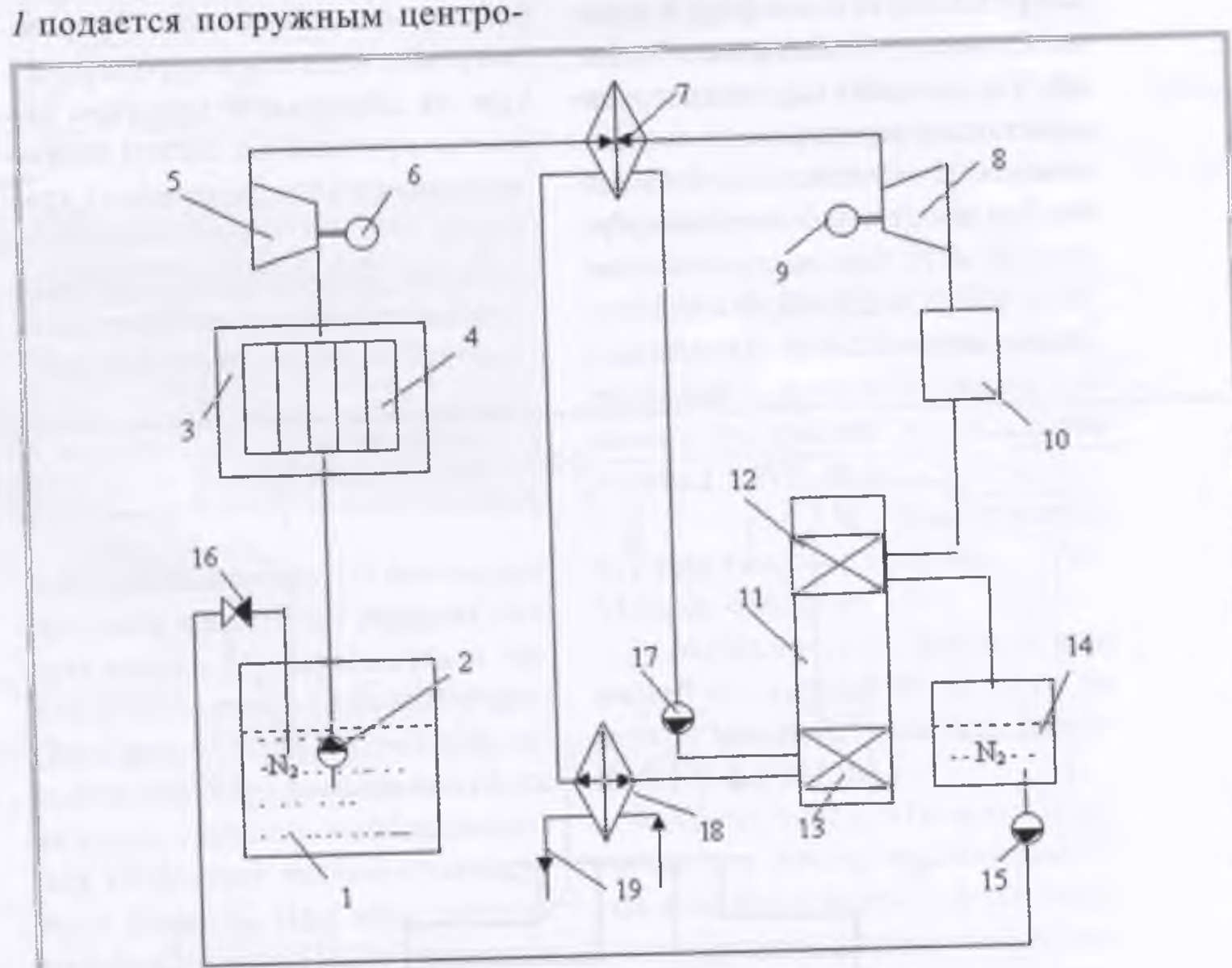

Рис. 1. Автономная замкнутая система азотного охлаждения для термостатирования объектов с одновременной выработкой электроэнергии: азотный контур: 1 – емкость с жидким азотом; 2 – погружной центробежный насос; 3 – теплоизолированный охлаждаемый объем; 4 – воздухоохлаждающая панель; 5 – расширительная турбина высокого давления; 6 – электрогенератор на одном валу с турбиной; 7 – теплообменник подогрева азота; 8 – расширительная турбина низкого давления; 9 – электрогенератор; 10 – расширительная емкость; 11 – криогенная холодильная машина Стирлинга; 12 –конденсатор КХМ; 13 – холодильник КХМ; 14 – сосуд Дьюара; 15 – насос высокого давления; 16 – обратный клапан. Контур охлаждения криогенной машины: 17 – насос; 18 – теплообменник; 19 – трубопроводы

МИКОЛАЇВСЬКА ДЕРЖАВНА
ОБЛАСНА УНІВЕРСАЛЬНА
НАУКОВА БІБЛІОТЕКА
ім. О. Гончарова

тая рабочим телом КХМ охлаждающая жидкость из холодильника *13* подается для охлаждения в теплообменник *18* (теплообмен с окружающей средой) и далее в теплообменник *7* (охлаждение азотом). Привод холодильной машины Стирлинга *11* может осуществляться от электродвигателя, специального теплового двигателя или двигателя транспортного средства.

Хранение нефтепродуктов. Одна из специфических особенностей хранения нефтепродуктов (бензина, керосина, дизельного топлива и др.) – испаряемость легких фракций углеводородов (ЛФУ), что является основной причиной технологических потерь ценного сырья, вредных выбросов в окружающую атмосферу и ухудшения качества моторного топлива. Так, за одно наполнение вертикального резервуара вместимостью 5000 м^3 теряется в среднем 4 т бензина, так как каждый кубический метр паровоздушной смеси в таком резервуаре содержит летом около 0,56 кг бензиновых паров, а зимой – до 0,35 кг. В зависимости от условий (температуры окружающей среды, объема газового пространства в резервуаре и т.д.) концентрация бензина в паровоздушной смеси может повыситься до 1,2 кг в 1 м^3.

Исключение потерь нефтепродуктов возможно при применении замкнутой системы азотного охлаждения на основе криогенной машины Стирлинга в установке для улавливания легких фракций углеводородов с барботажем ЛФУ, подробное описание работы и принципиальная схема которой даны в [5].

Хранение криогенных жидкостей. Одним из наиболее перспективных путей борьбы с потерями криогенных жидкостей (жидкого кислорода, сжиженного природного газа, жидкого водорода и т.д.) при их длительном хранении является применение систем долговременного (бездренажного) хранения.

На рис. 2 представлена принципиальная схема установки для долговременного хранения криогенных жидкостей на основе азотного экрана с использованием системы азотного охлаждения замкнутого типа (патент РФ № 2150057).

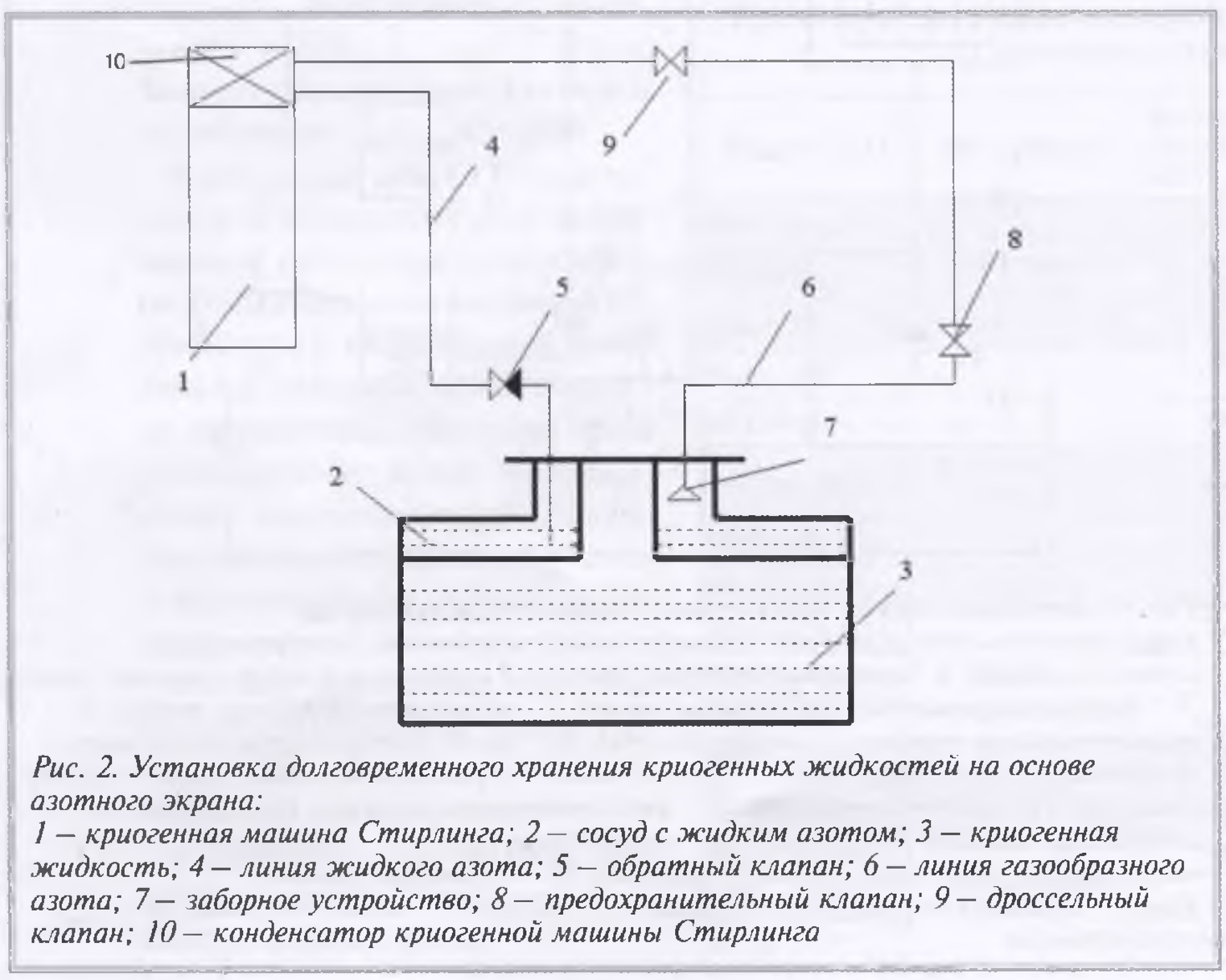

Рис. 2. Установка долговременного хранения криогенных жидкостей на основе азотного экрана:
1 – криогенная машина Стирлинга; 2 – сосуд с жидким азотом; 3 – криогенная жидкость; 4 – линия жидкого азота; 5 – обратный клапан; 6 – линия газообразного азота; 7 – заборное устройство; 8 – предохранительный клапан; 9 – дроссельный клапан; 10 – конденсатор криогенной машины Стирлинга

В состав установки входит криогенная машина Стирлинга *1* с рабочим телом – гелием, замкнутый контур азота, соединяющий теплоизолированный сосуд *2* с жидким азотом с конденсатором *10* КГМ Стирлинга. Внутри сосуда с жидким азотом *2* расположен теплоизолированный сосуд с сохраняемой криогенной жидкостью *3*, защищенной от внешних теплопритоков жидким азотом.

За счет внешних теплопритоков в верхней части сосуда *2* образуются пары азота. При достижении определенного давления срабатывает предохранительный клапан *8*, что служит сигналом для включения КГМ Стирлинга. В результате этого по линии *6* газообразный азот высокого давления через заборное устройство *7* и предохранительный клапан *8* проходит в дроссельный клапан *9*, предварительно охлаждается, а затем поступает в конденсатор *10* КГМ Стирлинга. Переход паров азота в жидкую фазу в конденсаторе *10* КГМ создает необходимый перепад давлений в линии *6*. Сжиженный азот по линии *4* через обратный клапан *5* сливается в теплоизолированную емкость *2*.

Строительное дело. Жидкий азот давно применялся в строительном деле в основном для замораживания грунтов при подземной проходке туннелей. Разработанные специалистами ООО «ИИЦ «Стирлинг-технологий» ВКА им. А.Ф. Можайского замкнутые системы азотного охлаждения позволяют значительно расширить область применения жидкого азота в строительстве. Так, совместно со специалистами «ЛенСпецСМУ» была разработана технология криопомола для производства высокомарочных и

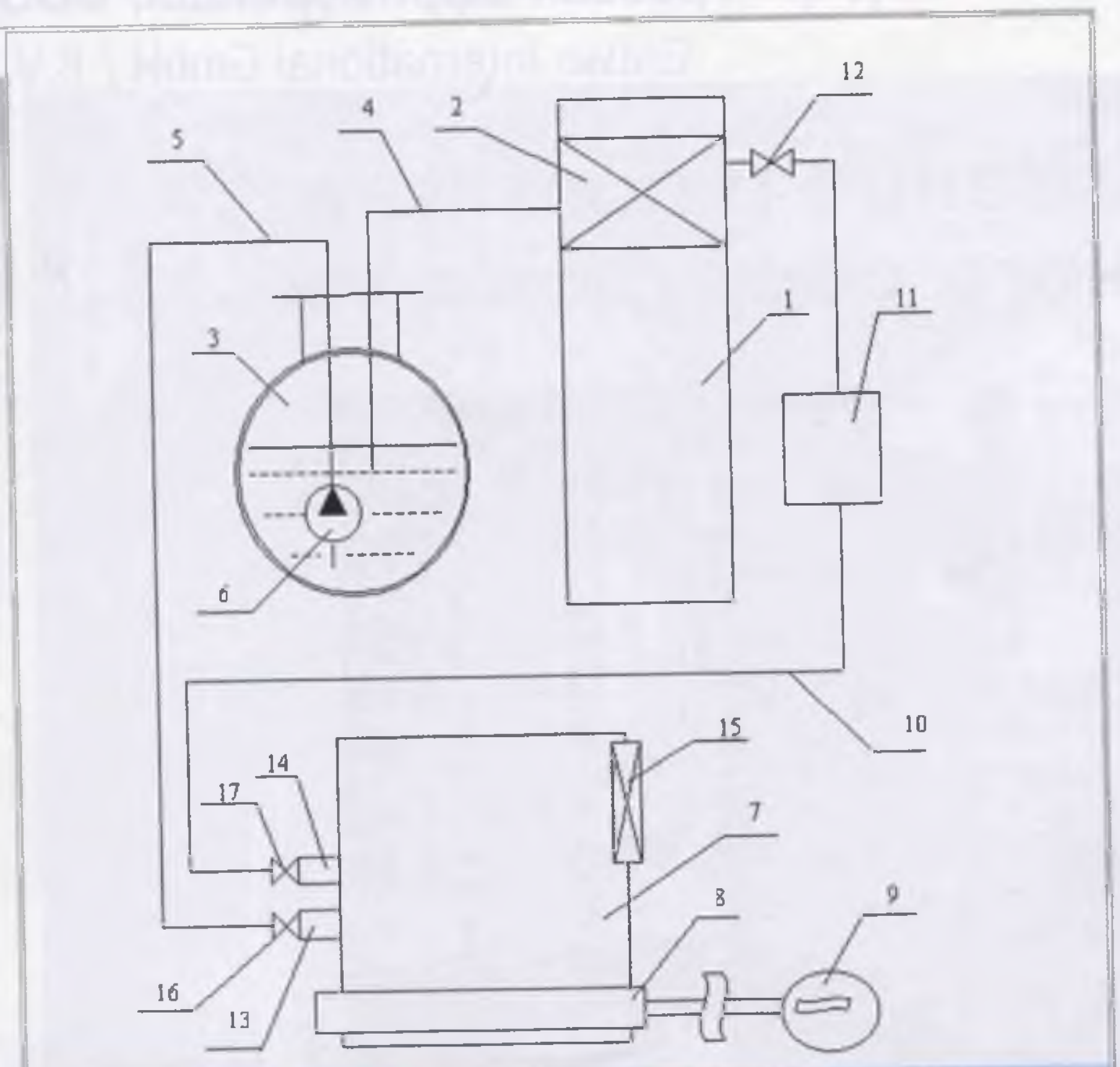

Рис. 3. Криогенный комплекс по производству высококачественного цемента: 1 – криогенная машина Стирлинга (КГМ); 2 – конденсатор КГМ; 3 – емкость для хранения жидкого азота; 4 – линия слива жидкого азота; 5 – линия подачи жидкого азота; 6 – насос высокого давления; 7 – помольный криостат; 8 – приводной ролик криогенной мельницы; 9 – электродвигатель; 10 – линия подачи выпара жидкого азота из криостата; 11 – механический фильтр; 12 – дроссельный вентиль; 13 – патрубок для периодического соединения криостата с линией подачи жидкого азота; 14 – патрубок для периодического соединения криостата с линией подачи выпара жидкого азота; 15 – отверстие со съемной крышкой; 16, 17 – запорные вентили

быстротвердеющих марок цементов (патенты РФ № 2184614, 2191632). Криоизмельчение в среде жидкого азота является новым технологическим приемом получения высокомарочных и быстротвердеющих цементов на основе рядовых клинкеров.

Схема криогенного комплекса по производству высококачественного цемента на основе криопомола (патент РФ № 2191632) представлена на рис. 3.

Из емкости *3* с помощью насоса *6* по линии подачи жидкого азота *5* через патрубок *13* и запорный клапан *16* жидкий азот поступает в помольный криостат *7*, куда предварительно через отверстие *15* загружаются измельчающиеся материалы и шихта. По окончании заправки криостата *7* жидким азотом клапан *16* закрывается и линия *5* отсоединяется от криостата. Электродвигатель *9* через приводной ролик *8* вращает криостат *7* в течение времени, необходимого для получения высококачественного цемента. При этом жидкий азот испаряется. После остановки криостата к нему через патрубок *14* с закрытым запорным клапаном *17* подсоединяется линия выпара *10*. Клапан *17* открывается, и выпар жидкого азота через механический фильтр *11* и дроссельный вентиль *12* поступает по линии *10* в конденсатор *2* криогенной машины Стирлинга *1*. Значительная часть выпара жидкого азота сжижается и самотеком сливается в емкость *3*. Запорный клапан *17* закрывается, и линия *10* отсоединяется от криостата. Полученный цемент выгружается из криостата *7* через отверстие *15*, после чего в криостат загружается новый исходный материал, к патрубку *13* подсоединяется линия *5*, открывается клапан *16* и рабочий цикл повторяется.

Использование высокоэффективных криогенных машин Стирлинга и созданных на их основе замкнутых систем азотного охлаждения позволит уже в ближайшем будущем значительно расширить область применения жидкого азота в различных отраслях народного хозяйства: промышленности, медицине, холодильной технике, строительстве и т.д. Открытие в Российской Федерации больших запасов (до 340 млрд м^3) подземных высокоазотных газов также будет способствовать внедрению технологий на основе жидкого азота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Азот* – для замораживания, хранения и транспортировки пищевых продуктов//Холодильная техника. 1998. № 9.

2. *Архаров А.М.* Низкотемпературные газовые машины. – М.: Машиностроение, 1969. – 223 с.

3. *Кириллов Н.Г.* Перспективы развития судовой энергетики на основе машин Стирлинга// Морской флот. 2002. № 2.

4. *Кириллов Н.Г.* Машины Стирлинга для высокоэффективных и экологически чистых систем автономного энергоснабжения//Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2000. № 12.

5. *Кириллов Н.Г.* Холод и системы бездренажного хранения нефтепродуктов// Холодильная техника. 2003. № 10.

6. *Новотельнов В.Н., Суслов А.Д., Полтараус В.Б.* Криогенные машины. – СПб.: Политехника. 1991.