

## Низкотемпературный холодильный комплекс для замораживания литейных форм и стержней

*Представлено оригинальное решение проблемы по замораживанию литейных форм. Разработанный комплекс является собой альтернативное решение проблемы. Реализация предлагаемой системы обеспечит не только стабильные условия для замораживания литейных форм при полной автономности и независимости от сторонних источников холода, но и позволит обслуживать других потребителей холода на любое продолжительное время.*

**Ключевые слова:** низкотемпературный холодильный комплекс, замороженные литейные формы, замороженные стержни, хладоноситель.

В современном литейном производстве известно более ста различных способов литья. Учеными-литейщиками обстоятельно изучены современные процессы формообразования, разработаны рекомендации по рациональной реализации технологических процессов. Однако, улучшение экологии производства и уменьшение стоимости процесса литья является весьма актуальным. Удачное сочетание низкой стоимости формообразования и экологической чистоты производства наблюдается при литье в низкотемпературные формы (НТФ) [1].

В настоящей работе приведено оригинальное решение проблемы по замораживанию литейных форм. Многочисленные литературные источники, а также патентный фонд, посвященные изучаемому вопросу, свидетельствуют о важном значении этой проблемы для металлургической и машиностроительной промышленности. В подавляющем большинстве публикаций, авторских свидетельств и патентов отечественных и зарубежных авторов проблема замораживания литейных форм решается однообразно, то есть с помощью эпизодических источников холода, например, дробленым водным льдом, сухой углекислотой, жидким азотом. Использование перечисленных источников холода приводит к значительным затратам, связанным с наработкой продукта, его транспортировкой и сохранением. Кроме этого, ограниченное количество хладоносителя вынуждает к сокращению и прерыванию намеченных циклов исследований, а иногда – и к отказу от дальнейшей работы.

Разработанный комплекс представляет собой альтернативное решение проблемы. Реализация предлагаемой системы обеспечит не только стабильные условия для замораживания литейных форм при полной автономности и неза-

висимости от сторонних источников холода, но и позволит обслуживать других потребителей холода на любое продолжительное время.

Низкотемпературный холодильный комплекс (рис. 1) включает в себя три основных блока. Первый блок – машинное отделение, где размещены надежные в работе герметичные хладоновые компрессоры, теплообменные аппараты, пусковая и регулирующая аппаратура. Второй блок состоит из камеры замораживания, емкости для сбора промежуточного хладоносителя, воздухоохладителя с электровентилем и воздуховодами, а также циркуляционного насоса для перекачивания промежуточного хладоносителя. Третий блок представляет собой низкотемпературную камеру хранения замороженных литейных форм, где возможно предварительное охлаждение формовочной смеси или форм в сборе.

В качестве генератора холода применена каскадная хладоновая установка, работающая на хладагоне R 22 и R 13, которая при температуре кипения хладагона  $-70^{\circ}\text{C}$  обеспечит замораживание формовочной смеси до  $-40^{\circ}\text{C}$ . С целью достижения максимальной эффективности при охлаждении система предусматривает два варианта работы установки.

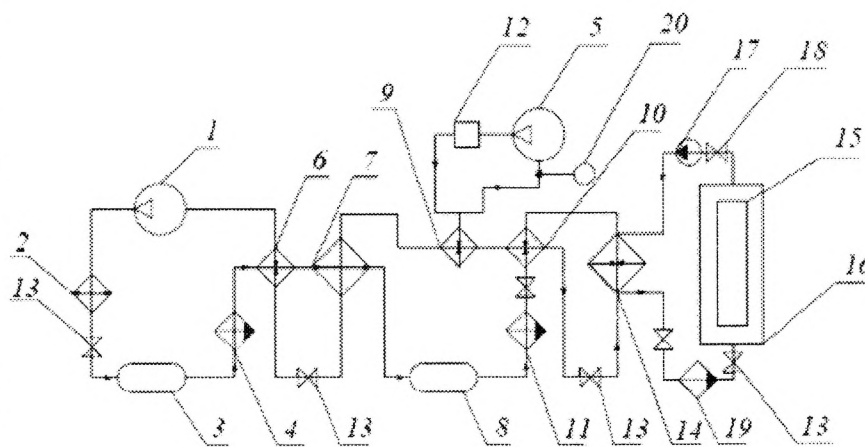


Схема низкотемпературного холодильного комплекса для замораживания литейных форм

При небольшой толщине слоя формовочной смеси литейная форма будет охлаждаться только охлажденным воздухом, нагнетаемым в камеру вентилятором. Если толщина слоя формовочной смеси увеличена – тогда охлаждение предусмотрено комбинированное: во внутреннюю полость формы подается охлажденный воздух, а наружные поверхности формы омываются охлажденным в испарителе промежуточным хладагентом.

Холодильный комплекс оснащен приборами автоматической защиты и оперативного управления.

Экологической опасности установка не представляет, так как система полностью герметична и, благодаря специальной конструкции теплообменных аппаратов, емкость по хладагентам незначительна.

Целью настоящей работы является проведение анализа и выбор рабочих веществ и промежуточного хладагента для низкотемпературного комплекса по замораживанию литейных форм.

Для получения качественных замороженных форм необходимо в середине слоя формовочной смеси понизить температуру до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 10 минут.

Поставленные жесткие условия привели к необходимости создания комбинированной системы охлаждения: воздушной и с помощью промежуточного хладагента.

При этом вариант чисто воздушной системы предусматривает охлаждение литейной формы как снаружи, так и изнутри.

Комбинированный вариант отличается тем, что наружные поверхности формы омываются охлажденным в испарителе промежуточным хладагентом, а внутрь формы по-прежнему подается охлажденный воздух.

Воздух охлаждается в воздухоохладителе за счет отвода тепла кипящему низкотемпературному хладагенту. Тот же низкотемпературный хладагент охлаждает и промежуточный хладагент, циркулирующий с помощью насоса в кожухозмеевиковом испарителе.

Для низкотемпературных машин применяют холодильные агенты нормальной температуры кипения ( $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и ниже. Причем, существуют и свои особенности при выборе хладагентов для каскадных машин. В нижних ступенях, в основном, применяются агенты с температурой кипения ниже, чем для верхних ступеней.

Для проектируемой холодильной машины были выбраны наиболее распространенные, сравнительно экологически чистые и хорошо зарекомендовавшие себя в эксплуатации следующие холодильные агенты [2, 3]: для верхней ветви – R 22 и R 502; для нижней ветви – R 13 и R 23.

Хладон R 22. Широко применяемый холодильный агент для верхних ветвей каскадных машин, а также для низкотемпературных одноступенчатых (до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и двухступенчатых (до  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Химическая формула  $\text{CHF}_2\text{Cl}$  – дифтормонохлорметан. Нормальная температура кипения ( $-40, -81\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [4].

Хладон R 502. В последнее время получил распространение как более энергетически выгодный в сравнении с R 22. Представляет собой азеотропную смесь холодильных агентов R 22/R 115 в массо-

вой пропорции 48,8/51,2. Нормальная температура кипения ( $-45, -62\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [5]. Однако, в связи с большими трудностями в приобретении второго компонента R 115 и его чрезмерно высокой стоимости, хладагент R 502 в настоящее время получил ограниченное применение.

Хладон R 13. Наиболее широко применяемый холодильный агент для нижних ветвей каскадных машин при температурах кипения от  $-60$  до  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Химическая формула  $\text{CF}_3\text{Cl}$  – трифторхлорметан. Нормальная температура кипения ( $-81, -59\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [2].

Хладон R 23. Применяется в нижних ветвях каскадных машин на уровнях как и R 13. Химическая формула  $\text{CHF}_3$  – трифторметан. Нормальная температура кипения ( $-82, -14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [3]. Принимая во внимание дефицитность R 502 и близкие характеристики R 13 и R 23, а также сравнительную доступность в приобретении R 22 и R 13, считаем целесообразным рассматривать в реальных циклах каскадную машину с использованием R 22 – в верхней ветви и R 13 – в нижней ветви каскада.

В качестве промежуточного хладагента в заданном температурном диапазоне могут быть использованы – водный раствор хлористого кальция  $\text{CaCl}_2$ , полиметилсилоксановая жидкость ПМС-1,5.

Хлористый кальций ( $\text{CaCl}_2$ ). Раствор соли  $\text{CaCl}_2$  в воде в зависимости от концентрации позволяет достичь рабочей температуры порядка  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (233 K) и ниже.

Небольшая стоимость, нетоксичность и низкая трудоемкость приготовления предположили широкое распространение этого хладагента в системах охлаждения до температуры  $-20 \dots -25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (253-248 K). Более низким температурам соответствует значительное повышение вязкости, в результате чего теплоотдача ухудшается.

Были проведены расчеты значений коэффициентов теплопередачи для скорости движения 1,5; 2,0 и 2,5 м/с. При этом определяли также величину гидравлического сопротивления всех элементов системы, работающей на  $\text{CaCl}_2$ .

В табл. 1 и 2 приведены сравнительные характеристики хладагентов.

Фреон-30 (метилхлорид,  $\text{CHCl}_2$ ). В работе К. Д. Кана [6], посвященной описанию особенностей этого фреона, говорится, что по сравнению со многими хладагентами фреон-30 обладает целым рядом положительных преимуществ, благодаря которым можно его применять в низкотемпературных установках с промежуточным хладагентом. Фреон-30 – это бесцветная жидкость со слабым запахом ацетона, вода во фреоне-30 растворима в очень малых количествах (мг/кг при  $t, ^{\circ}\text{C}$ ): 1,62 при  $+20^{\circ}$ ; 1,15 при  $+5,75^{\circ}$ ; 0,537 при  $-9,4^{\circ}$ ; 0,321 при  $-20,75^{\circ}$ ; 0,24 при  $-40^{\circ}$ .

Температура замерзания –  $36,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при температуре  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  давление насыщения – 1,033 ата.

Фреон-30 в чистом виде и в присутствии воды (с кислородом) практически не действует на алюминий, медь, олово, свинец и железо. Указанная особенность расширяет область применения его в качестве хладагента. Однако при температуре  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 1

Теплофизические свойства хладоносителей при температуре  $t_{cp} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Наименование	$t_s$ при 760 мм.рт.ст. $^{\circ}\text{C/K}$	$t_i$ замерзания $^{\circ}\text{C/K}$	$c$ , кКал/ кг гр/ кДж/(кг К)	$\lambda$ ,	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Хлористый кальций $\text{CaCl}_2$		-53	0,63	0,41	26,9	191,3	1286
Фреон-30	40 313	-96,7 176,5	0,262 1,098	0,143 0,166	0,619	5,68	1390
Фреон-21	8,9 282	-135 130	0,239 1,001	0,106 0,123	0,415	5,1	1514
Фреон-11	23,7 296,8	-111 162	0,201 0,842	0,092 0,107	0,605	7,72	1621
Полиметилсилоксановая жидкость ПМС-1,5		-100 173	0,397 1,663	0,103 0,119	5,8	73,2	910
Керосин Е-1			0,417 1,747	0,109 0,127	10	120	865
Этиленгликоль А-65		-65 208	0,551 2,310	0,365 0,425	3091	22200	1143

Таблица 2

К определению значений  $t_n$  и  $t_u$  по величине  $Bi$  и  $Fo$  ( $t_n = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Параметры	Хладоноситель $\text{CaCl}_2$						Хладоноситель R 30					
	$w = 1\text{ м/с}$			$w = 1,5\text{ м/с}$			$w = 1\text{ м/с}$			$w = 1,5\text{ м/с}$		
	$t_{cp},\text{ }^{\circ}\text{C}$			$t_{cp},\text{ }^{\circ}\text{C}$			$t_{cp},\text{ }^{\circ}\text{C}$			$t_{cp},\text{ }^{\circ}\text{C}$		
	-44	-49	-54	-44	-49	-54	-54	-59	-64	-54	-59	-64
Bi	8,9	7,68	5,88	13,4	12,3	8,14	15,8	15,4	14,8	21,8	21,3	20,4
Fo	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
$1-\theta_{ct}$	1,0	0,96	0,97	0,98	0,98	1,0	0,98	0,98	0,98	0,99	1,0	1,0
$1-\theta_o$	0,7	0,68	0,67	0,72	0,72	0,72	0,7	0,68	0,68	0,73	0,73	0,72
$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	503	434	332	757	696	460	891	871	834	1234	1205	1155
$t_{cr},\text{ }^{\circ}\text{C}$	-44	-46,2	-51,8	-42,7	-47,6	-54	-46,6	-57,4	-62,3	-53,3	59	-64
$t_o,\text{ }^{\circ}\text{C}$	-24,8	-27	-29,6	-26,1	-29,7	-33,3	-31,8	-37,7	-37	-34	-38	-40,3

фреон-30 вытравливает из латуни цинк, разрушает бронзу. Вследствие этого латунная арматура и элементы циркуляционных насосов не должны нагреваться выше 80 °С.

При температуре около 120 °С чистый фреон-30 начинает распадаться, наибольший распад имеет место при 400 °С. При температуре до 140 °С на фреон-30 не влияют ни чистый кислород, ни кислород воздуха.

Горючесть – незначительна, при удалении источника воспламенения фреон-30 гаснет в собственных продуктах горения, при температуре выше 650 °С дает с воздухом слабые горючие смеси.

По физиологическому воздействию фреон-30 можно отнести к четвертой группе (при 6-ти групповой системе) и поставить между фреоном-II и хлорметилом.

Опасность отравления фреоном-30 почти исключена, однако вследствие высокого удельного веса по отношению к воздуху последний вытесняется, и при наличии в воздухе 5,1-5,3% фреона-30 (по объему) удушье наступает через полчаса.

С целью предотвращения несчастных случаев необходимо обеспечить надежный и постоянный отсос воздуха из нижней части помещения, в котором на-

ходятся аппараты и магистрали, заполненные фреоном-30.

Величина гидравлических сопротивлений и значений коэффициентов теплопередачи приведены в табл. 3.

Фреон-21 (дихлорфторметан  $\text{CHCl}_2\text{F}$ ). По данным [7] фреон-21 используется, главным образом, на установках для конденсирования воздуха с высокими температурами конденсации.

Благодаря низкой температуре замерзания -135 °С и сравнительно высокой нормальной температуре кипения 8,92 °С оказалось возможным применение фреона-21 в качестве промежуточного хладоносителя.

Растворимость фреона-21 в воде при 25 °С составляет 0,95 весовых процента.

Растворимость воды (%мас.) во фреоне-21 в зависимости от температуры ( $t,^{\circ}\text{C}$ ) следующая: 0,16 при +30°; 0,13 при +25°; 0,094 при +10°; 0,055 при 0°; 0,042 при -10°; 0,027 при -20°; 0,016 при -30°; 0,006 при -50°.

По токсичности фреон-21 относится к группе 5а, по биологическому действию представляет собой наркотик.

Результаты сравнений приведены в упомянутых выше таблицах. Фреон-11 (трихлорфторметан,



**Значения  $\alpha$  и  $K$  в зависимости от скорости движения, полученные аналитическим и графическим методами**

$\alpha$ и $K$ Вт/м <sup>2</sup> ·К	Хладоноситель							
	CaCl			фреон-30			фреон-21	
	w 1,5 м/с	w 2,0 м/с	w 2,5 м/с	w 1,5 м/с	w 2,0 м/с	w 2,5 м/с	w 1,5 м/с	w 2,0 м/с
$\alpha_a$ граф.	552	872	588	974	1032	1070	972	1034
$\alpha_a$ анал.	565	588	598	982	1062	1093	980	1075
$K_k$ граф.	87	96	101	312	353	387	309	349
$K_k$ анал.	87	95	101	312	358	392	308	355

CCl<sub>3</sub>F) выпускается двух сортов А и Б с нормальной температурой кипения соответственно 23,2° и 19,2 °С и температурой замерзания –111 °С. Указанные обстоятельства также позволили применять для сравнения фреон-11 в качестве хладоносителя.

В обычных условиях фреон-11 применяется в турбокомпрессорных агрегатах с большой теплопроизводительностью до –40 °С при давлениях конденсации до 1 атм.

Фреон-11 несколько токсичнее фреона-12, но безопаснее фреона-30.

Растворимость фреона-11 в воде составляет 0,11 %мас. при 25 °С.

Растворимость воды (%мас.) во фреоне в зависимости от температуры (t,°С) следующая: 0,013 при +30°; 0,011 при +25°; 0,009 при +21,01; 0,005 при +10°; 0,0036 при 0°; 0,0018 при –10°; 0,0015 при –17,7°; 0,0006 при –30°.

По токсичности фреон-11 относится к группе 5а, по биологическому действию является наркотиком.

Вентиляцию, вытяжку необходимо выполнять с отсосом из нижней зоны помещения.

Результаты сравнений представлены в табл. 1, 2.

Полиметилсилоксановая жидкость ПМС-1,5 отличается от других кремнийорганических полимеров более пологой температурной кривой вязкости.

Вязкость этих жидкостей в зависимости от молекулярного веса может меняться от  $0,65 \cdot 10^{-6}$  до  $1 \cdot 10^{-6}$  спз.

Выбранная нами жидкость ПМС-1,5 применяется в качестве охлаждающего или демпфирующего агента в различных приборах и механизмах при температуре до –100 °С. Вязкость ее при 20 °С составляет 1,5-1,7 сст или  $(1,5-1,7) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Коэффициент теплопроводности лежит в пределах  $(0,082-0,137) \cdot 1,163$  Вт/м·К.

Температура вспышки – выше 50 °С.

Стоимость 1 кг жидкости определяется по прейскуранту.

В силу изложенного выше, указанная жидкость получила ограниченное применение, однако для сравнения с другими хладоносителями расчеты выполнены и для нее.

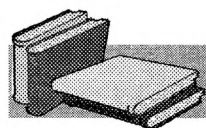
Керосин Т-1. В качестве промежуточного хладоносителя рассматривали также и топливо Т-1 (керосин).

Приведенные выше сравнительные характеристики хладоносителей позволяют осуществить выбор хлористого кальция CaCl<sub>2</sub> и хладона R 30 как наиболее доступных, экологически чистых, пожаро-взрывобезопасных, с высокими значениями теплотехнических параметров.

## Выводы

Разработанный комплекс представляет собой альтернативное решение проблемы. Реализация предлагаемой системы обеспечит не только стабильные условия для замораживания литейных форм при полной автономности и независимости от сторонних источников холода, но и позволит обслуживать других потребителей холода на любое продолжительное время.

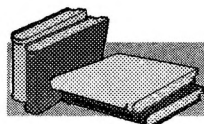
Приведенные выше сравнительные характеристики хладоносителей позволяют осуществить выбор хлористого кальция CaCl<sub>2</sub> и хладона R 30 как наиболее доступных, экологически чистых, пожаро-взрывобезопасных, с высокими значениями теплотехнических параметров.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов С. Н., Иванов О. П., Куприянова А. В. Холодильная техника. Свойства веществ. Справочник. – М.: Агропромиздат, 1985. – 208 с.
2. Холодильная техника. Энциклопедический справочник. I книга. – М.: Госторгиздат, 1960. – 544 с.
3. Розенфельд Л. М., Ткачев А. Г. Холодильные машины и аппараты. – М.: Госторгиздат, 1960. – 366 с.
4. Гоголин А. А., Данилова Г. Н., Азарков В. М. Интенсификация теплообменов в испарителях холодильных машин. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 244 с.
5. Чулкин О. Г., Мартыновский В. С., Мельцер Л. З. Холодильные установки. – М.: Госторгиздат, 1961. – 472 с.
6. Вейнштейн В. Д., Конторович В. И. Низкотемпературные холодильные установки. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 362 с.





## REFERENCES

1. Bogdanov S.N., Ivanova O.P., Kuprianov A.V. (1985). Holodil'naia tekhnika. Svoistva veshchestv. Spravochnik. [Refrigerating technique. Properties of substances. Reference book]. Moscow: Agropromizdat, 208 p. [in Russian].
2. Kholodil'naia tekhnika. Entsiklopedicheskii spravochnik. I kniga. (1960). [Refrigerating technique. Encyclopedic reference book. I-st book]. Moscow: Gostorgizdat, 544 p. [in Russian].
3. Rozenfel'd L. M., Tkachev A. G. (1960). Holodil'nye mashiny i apparaty. [Refrigerators and devices]. Moscow: Gostorgizdat, 366 p. [in Russian].
4. Gogolin A. A., Danilova G. N., Azarkov V. M. (1982). Intensifikatsiia teploobmenov v ispariteliakh kholodil'nykh mashin. [Intensification of heat exchanges in evaporators of refrigerators]. Moscow: Legkaia i pishchevaia promyshlennost', 244 p. [in Russian].
5. Chuklin O. G., Martynovskii V. S., Mel'tser L. Z. (1961). Kholodil'nye ustanovki. [Refrigerating systems]. Moscow: Gostorgizdat, 472 p. [in Russian].
6. Veinshtein V. D., Kontorovich V. I. (1972). Nizkotemperaturnye kholodil'nye ustanovki. [Presintering refrigerating systems]. Moscow: Pishchevaia promyshlennost', 362 p. [in Russian].

### Анотація

Шинський О. І., Лисенко Т. В., Ясюков В. В., Солоненко Л. І., Васильєв Д. С.  
Низькотемпературний холодильний комплекс для заморожування ливарних форм та стрижнів

Представлено оригінальне рішення проблеми по заморожуванню ливарних форм. Розроблений комплекс являє собою альтернативне рішення проблеми. Реалізація запропонованої системи забезпечить не тільки стабільні умови для заморожування ливарних форм при повній автономності і незалежності від сторонніх джерел холоду, але і дозволить обслуговувати інших споживачів холоду на будь-який тривалий час.

### Ключові слова

Низькотемпературний холодильний комплекс, заморожені ливарні форми, заморожені стрижні, холодоносії.

### Summary

Shinskiy O., Lysenko T., Yasiukov V., Solonenko L., Vasiliev D.  
The low-temperature refrigerating complex for freezing of casting molds and cores

This paper presents an original solution for the freezing molds. Developed complex represents an alternative solution to the problem. Implementation of the proposed system will not only provide a stable environment for freezing molds with the full autonomy and independence from third-party sources of cold, but will allow to serve other consumers of cold for any long period of time.

### Keywords

Low-temperature refrigerating complex, frozen casting molds, frozen cores, coolant.

Поступила 03.11.16