

**М.Г. Хмельнюк, М.О. Мартынюк**

Одесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082  
e-mail: maximmar@rambler.ru

**А.В. Зозуля**

Кубанский государственный технологический университет, ул. Красная, 135, г. Краснодар, РФ, 350049

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

*Рассматриваются возможности повышения эффективности процесса переработки попутного нефтяного газа на установке низкотемпературной конденсации (НТК). Для этого предложена замена пропана в пропановой холодильной установке (ПХУ), входящей в состав НТК в качестве внешнего охладителя, на смесь пропан/этан (R290/R170). При работе на смеси удаётся получать более низкие температуры, которые позволяют увеличить степень извлечения продукционных углеводородов. Смесь R290/R170 даёт возможность производить холод на двух температурных уровнях. Для этого предложено внести изменения в схему существующей ПХУ.*

**Ключевые слова:** Турбокомпрессор. Работа. Подобие процессов течения. Холодопроизводительность. Фракция. Коэффициент извлечения. Смесь хладагентов. Пропан. Этан. Холодильная установка.

**M.G. Khmelnyuk, M.O. Martynuk, V.V. Zozulya**

## INCREASE OF EFFICIENCY ON UNIT OF LOW-TEMPERATURE CONDENSATION OF NATURAL GAS

*Opportunities of increase of efficiency of reprocessing of associated petroleum gas on unit of low-temperature condensation (LTC) are considered. For this purpose is offered to replacement of propane in propane refrigerating unit (PRU) included at LTC as an external cooler, on a mixture propane/ethane (R290/R170). At work on a mixture is possible to receive lower temperatures which allow to increase a degree of extraction of productional hydrocarbons. Mixture R290/R170 enables to make a cold at two temperature levels. For this purpose is offered to make changes to the circuit of existing PRU.*

**Keywords:** Turbocompressor. Work. Similarity of flow processes. Refrigerating capacity. Fraction. Factor of extraction. A mixture of coolants. Propane. Ethane. Refrigerating unit.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальной является задача утилизации и переработки попутного нефтяного газа на установках низкотемпературной конденсации (НТК) с получением сухого отбензиненного газа и широкой фракции лёгких углеводородов (ШФЛУ). Поступающий на переработку сырой газ, а также попутный нефтяной газ из месторождений подвергаются предварительной обработке, где из них удаляется влага и другие примеси. Затем они направляются в установку низкотемпературной конденсации, где происходит отделение углеводородов  $C_{3+}$  в виде ШФЛУ и образование сухого отбензиненного газа  $C_1+C_2$ . Качественным показателем этого процесса является коэффициент извлечения целевых углеводородов, который достигает 90-93 %. Анализ процессов, реализуемых в установках НТК, показывает, что значение температуры охлаждения

потока в значительной мере влияет на степень извлечения целевых углеводородов. Так, скомпримированный и охлаждённый в установке НТК поток углеводородов, из которого выпадает и удаляется в виде конденсата часть фракций состава  $C_{3+}$  детандируется (либо дросселируется) перед колонной-деметанизатором. Количество жидкости, которое получается при предварительном захолаживании, является важным показателем, поскольку именно оно качественно определяет дальнейший процесс отпаривания лёгких углеводородов в колонне-деметанизаторе для получения отбензиненного газа  $C_1+C_2$  (метан и этан) и нестабильной жидкой фракции, содержащей этан. Последняя не соответствует требуемым стандартам на готовую продукцию. Поэтому дальнейшая переработка включает в себя процесс массообмена в колонне-деметанизаторе, где происходит окончательная отпарка лёгких фракций углеводородов  $C_1+C_2$  с получением в

кубе колонны стабильного конденсата, который является широкой фракцией лёгких углеводородов.

Анализ соответствия режимных параметров расчётным значениям даёт представление об общей тенденции, которая отображает устойчивую зависимость количества вырабатываемой продукции от температурного уровня ряда процессов в установке НТК углеводородов. В ней существенную роль играет начальная температура потока газа и, соответственно, количество получаемого конденсата. Приведённая на рис. 1 зависимость указывает на целесообразность применения в установке НТК более низкотемпературного охлаждения. Для его организации можно использовать несколько решений.

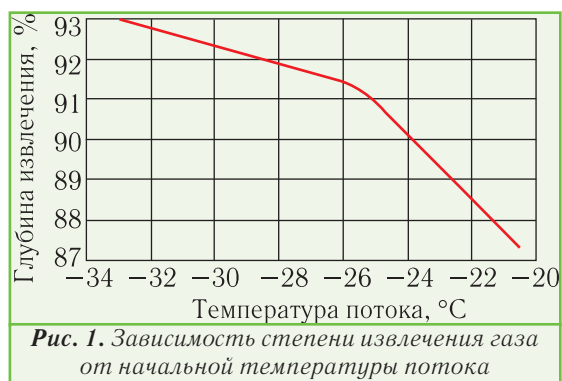


Рис. 1. Зависимость степени извлечения газа от начальной температуры потока

## 2. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОГО ХЛАДАГЕНТА

В настоящее время в холодильной установке, входящей в состав НТК, используется пропан. Снижение температуры кипения пропана ниже  $t_0 = -38$  °C невозможно вследствие недопустимого уменьшения давления кипения. К тому же в процессе эксплуатации холодильной установки может происходить накопление бутанов в хладагенте. Технологические процессы, связанные с обеспечением хладагентом пропановой холодильной установки (ПХУ), предусматривают отбор инертнов из линейного ресивера через уравнительную линию на свечу и пополнение системы хладагентом состава: 97 % пропана и 3 % бутана и изобутана. Это приводит к тому, что фактически кипение происходит при  $-33$  °C. Добавление в пропан (R290) некоторого количества более низкокипящих углеводородов, например, этана (R170), позволяет при сохранении давления в испарителе на требуемом уровне достичь более низкой температуры кипения. Получаемая в результате неazeотропная смесь даёт возможность осуществить её частичное разделение в процессе конденсации на лёгкую и тяжёлую фракции и тем самым осуществить цикл с производством холода на нескольких температурных уровнях.

В общем случае рассмотрим характеристики холодильной установки на предлагаемой смеси с целью определения диапазона возможных концентраций. Для начальной оценки примем величину удельной работы сжатия потока и давление всасывания, харак-

терные для условий работы установки на чистом пропане. В нормальном режиме работы ПХУ давление всасывания равно 0,12 МПа. При расчётной температуре конденсации  $t_k = 30$  °C удельная адиабатная работа сжатия пропана  $l_{ad} = 113$  кДж/кг. Это означает, что рабочая точка характеристики турбокомпрессора будет лежать в допустимых пределах в случае равной объёмной производительности на всасывании. В связи с тем, что смесь обладает отличными от чистого пропана свойствами, конечное давление нагнетания с учётом принятых ограничений будет отличаться при компримировании смеси от такового при работе на пропане (см. рис. 2).

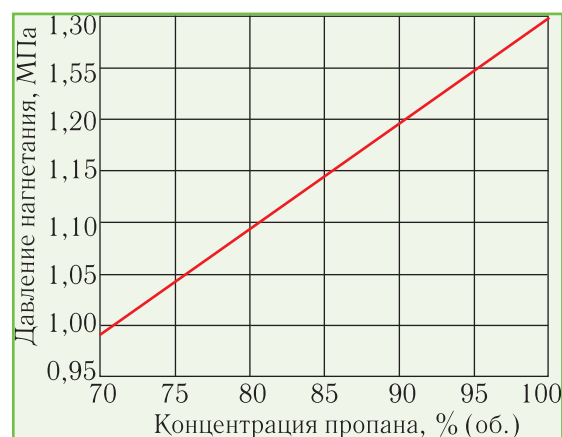


Рис. 2. Давления нагнетания компрессора при одной и той же удельной работе сжатия смеси R290/R170  $l_{ad} = 113$  кДж/кг в зависимости от её концентрации

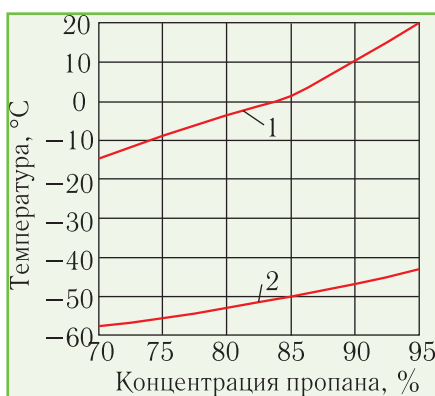
Следует отметить, что крайне нежелательно производить замену холодильного компрессора из-за недопустимого повышения отношения давлений нагнетания и всасывания в расчётном режиме [1,2]. По этой причине будем учитывать фактические возможности ныне работающего компрессорного оборудования.

По располагаемому давлению нагнетания при каждом значении концентрации смеси можно судить также о требуемой температуре окружающего воздуха для нормальной работы воздушного конденсатора и о конкретных значениях температур начала и конца конденсации неazeотропной смеси.

На рис. 3 представлено изменение требуемой температуры окружающего воздуха  $t_{o,в}$  для полной конденсации смеси при допустимом давлении нагнетания и соответствующей ей температуре кипения при фиксированном давлении всасывания 0,12 МПа в зависимости от концентрации смеси. Таким образом, определяющим параметром является температура конца процесса конденсации смеси. Фактическая температура конденсации выше  $t_{o,в}$  на величину температурного напора, принятого на уровне 10 °C, как типичного для теплообменного аппарата воздушного охлаждения.

Как видно, температура кипения смеси R290/R170 ниже температуры кипения чистого пропана. Одновременно с этим при сохранении парамет-

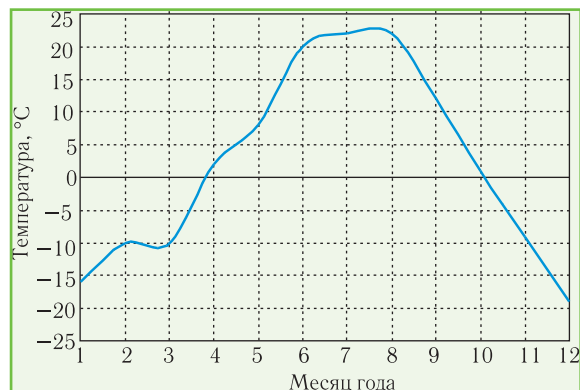
ров работы турбомашин в номинальных пределах температура конденсации также становится ниже. Таким образом, две линии температур на рис. 3 характеризуют область температурного интервала работы холодильной установки. Видно, что температурный интервал сужается при увеличении концентрации этана. Это является прямым следствием того, что коэффициент уменьшения удельного объема смеси с увеличением доли легкокипящего компонента, при одном и том же количестве сообщаемой потоку удельной работы, становится ниже (см. рис. 6). Этот фактор можно рассматривать в качестве определяющего. Он позволяет судить об отличиях процесса течения сжимаемого протока в проточной части компрессора между чистым пропаном и смесью [3]. Для поддержания степени повышения давления в пределах допустимой величины, как отмечалось, необходимо при снижении температуры охлаждения уменьшать также и температуру конденсации.



**Рис. 3.** Характер изменения требуемой температуры окружающего воздуха  $t_{o,в}$  (1) с учётом допустимого давления нагнетания R290/R170 и соответствующей концентрациям смеси R290/R170 температуры кипения  $t_0$  (2)

Снижение температурного уровня работы ПХМ допустимо производить с учётом климатических особенностей местности, где организована рассматриваемая переработка природного газа. По данным метеонаблюдений местности, где находится производство (замеры проводились трижды в день на протяжении 12-ти лет), построен график сезонного изменения максимальной температуры окружающего воздуха для каждого месяца (см. рис. 4). Очевидно, что большую часть года температура окружающей среды является таковой, что располагает к применению смеси и позволяет обеспечить нормальную работу воздушного конденсатора. Анализируя рисунки 3 и 4 совместно, можно судить о применимости смеси того или иного состава в то или иное время года. Таким образом, возможно определять добавки этана в пропан с учётом реальной температуры окружающей среды при сохранении прочих параметров работы установки в допустимых пределах в непосредственной близости

от номинальных. К ним, прежде всего, относится степень повышения давления, удельные объёмы на всасывании и нагнетании, которые при идентичной тепловой нагрузке на испаритель будут определять величину объёмного расхода в характерных сечениях элементов конструкции холодильной установки, а также скорости потока [2].



**Рис. 4.** Значения максимальных температур воздуха в районе расположения установки по данным метеонаблюдений

Выбор концентраций смеси с учётом данных о температурах окружающей среды может производиться двумя возможными способами. Это обеспечивает работу холодильной установки в следующих режимах:

**1. Постоянно-круглогодичный режим работы.**

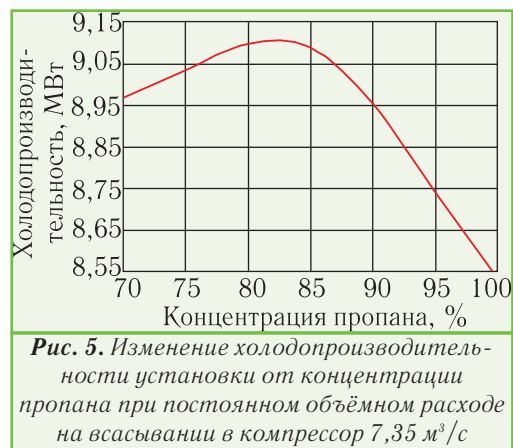
Определяющей является максимальная годовая температура окружающей среды. Концентрация смеси постоянна и соответствует некоторому значению. Этот режим лишает возможности использовать значительные колебания сезонных значений температур для организации работы установки с минимально возможной средней температурой кипения смеси при максимальной концентрации легкокипящего компонента.

**2. Динамично-переменный режим работы.**

Концентрация смеси переменна и зависит от температуры окружающего воздуха. Она является наиболее приемлемой для каждого сезона года. При реализации таких режимов можно ориентироваться на показатели работы холодильной установки в то или иное время года.

Постоянно-круглогодичный температурный режим работы холодильной установки в зимнее время не является оптимальным в случае применения смеси с минимальным содержанием этана, которое будет соответствовать нормальной работе в самое теплое время. Первостепенной задачей является достижение минимально возможной средней температуры кипения. При таком подходе к определению концентрации смеси R290/R170 в зимнее время года не используется значительный потенциал температуры окружающего воздуха. При низкой температуре окружающего воздуха и при постоянной температуре кипения естественно снижается удельная работа сжатия при работе на чистом пропане либо на смеси постоянной кон-

центрации. Поэтому в зимнее время часть холода окружающей среды целесообразно использовать для снижения температуры кипения смеси в результате увеличения в ней содержания этана. Расчёт цикла холодильной установки при фиксированном объёмном расходе хладагента на всасывании в компрессор указывает на рост её холодопроизводительности при увеличении концентрации этана до некоторого предела (см. рис. 5).



Снижение холодопроизводительности установки с увеличением содержания этана выше 17 %, как следует из рис. 5, вызвано значительным падением массового расхода из-за того, что смесь обладает большим значением удельного объёма на всасывании при одинаковом объёмном расходе (значение объёмного расхода на всасывании не является произвольным и зависит от режима работы компрессора).

При переводе ПХУ на новое рабочее тело следует принимать во внимание некоторые факторы, связанные с работой её оборудования. Для минимизации капитальных затрат на переоборудование установки проанализируем возможности использования существующего штатного оборудования.

Центробежный компрессор типа ТП5-5, который является базовым в установках охлаждения природного газа, рассчитан для работы на пропане (R290) при соответствующих температурных уровнях. Применение этана в качестве второго компонента смеси продиктовано тем, что его можно легко отводить из верхней части колонны деэтанатора в требуемом количестве и с достаточной чистотой. Его целесообразно добавлять в поток пропана на всасывании в третью ступень компрессора.

Перевод центробежного компрессора для работы с пропана на рабочее вещество с несколько другими свойствами требует как теоретических, так и экспериментальных исследований его характеристик. В идеальном случае необходимо вносить изменения в конструкцию проточной части компрессора для обеспечения оптимального режима течения сжимаемого потока смеси с целью достижения приемлемых значений коэффициентов расхода, напора и КПД ступеней турбокомпрессора [1]. Однако такой подход по вполне

понятным причинам нельзя признать целесообразным. Покажем расчётно, что возможна работа компрессора и на смеси R290/R170 с сохранением его основных характеристик на прежнем уровне.

Поскольку свойства смеси R290/R170 отличны от свойств R290, необходимо провести расчёт характеристик компрессора ТП5-5 при его работе на новом хладагенте. Как показал предварительный анализ, несмотря на различия в свойствах R290 и смеси R290/R170, её можно использовать в турбокомпрессоре ТП5-5, хотя и с некоторыми изменениями параметров термодинамического цикла, при которых он остаётся работоспособным.

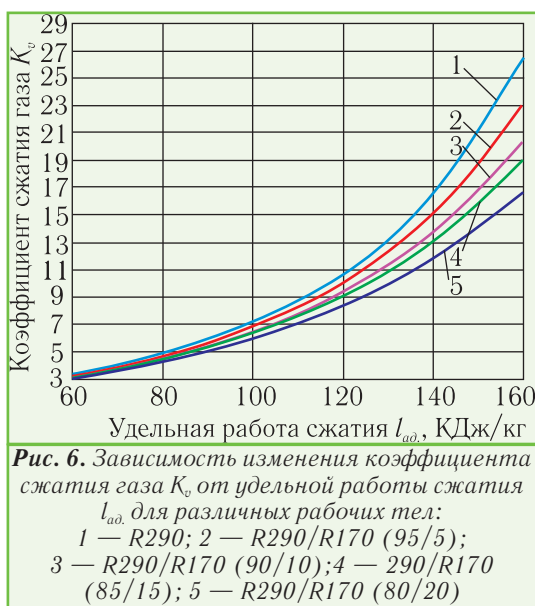
Важной задачей является определение параметров ступеней при их работе на смеси. Для её решения учитываются условия подобия режимов течения в проточной части компрессора. Так, изменение скоростей газа в его проточной части при работе на различных агентах вызывает изменения удельного объёма газа в процессе сжатия. Это оказывает влияние на значения коэффициентов расхода, напора и КПД.

Таким образом, в случае применения существующего компрессора для работы его на смеси R290/R170 следует обеспечить подобие процесса течения как геометрическое (углы входа-выхода потока для элементов проточной части), так и термодинамическое [1]. Например, для согласованной работы ступеней необходимо, чтобы изменения удельного объёма было одинаковым при соответствующей работе сжатия R290 и смеси. Расчёты показывают, что смесь обладает большим значением удельного объёма при прочих равных условиях. Поэтому для уменьшения его на одну и ту же величину требуется затрата большей работы. Этот вывод легко проиллюстрировать с помощью функции  $K_v=f(l)$ . На рис. 6 приведены зависимости изменения коэффициента сжатия газа  $K_v$  от удельной работы сжатия  $l_{ад}$  для исследуемых смесей R290/R170 как заменителей R290. Составы смесей укажем в объёмных процентах. Значение  $K_v=v_1/v_2$ , где  $v_1$  — удельный объём перед рабочим колесом,  $v_2$  — удельный объём на выходе из рабочего колеса компрессора, а  $l_{ад}$  — работа сжатия, необходимая для ответственного уменьшения удельного объёма.

При расчётном исследовании режимов работы компрессора учитывались переменность температур кипения и конденсации смеси R290/R170. Как видно из рис. 6, увеличение концентрации легкокипящего компонента (этана) приводит к росту работы сжатия для одного и того же значения  $K_v$ . Меньшее изменение коэффициента  $K_v$  для процессов сжатия смесей вызывает увеличение коэффициентов расхода на выходе из рабочего колеса, на входе во вторую ступень при одинаковом, как для пропана, начальном объёмном расходе. Это может приводить к снижению КПД и коэффициента напора ступени [3]. Однако в компрессорах с регулированием производительности, — а компрессор ТП5-5 как раз снабжён регулируемым входным направляющим аппаратом, — следует предусматривать возможность работы с широким диапазоном изменения коэффициента расхода при постоянных КПД



и коэффициентах напора.

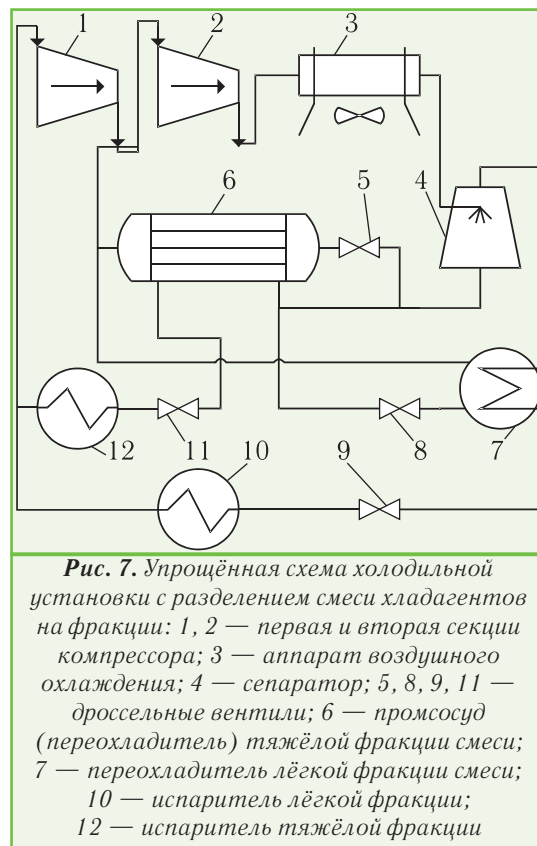


### 3. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА НОВОМ РАБОЧЕМ ТЕЛЕ

При использовании предлагаемой неазеотропной смеси возникает ряд трудностей, связанных с обеспечением работы некоторых аппаратов, в частности испарителя, где кипение происходит в свободном объеме. В связи с этим будет наблюдаться изменение состава смеси и в неполной мере использоваться её потенциал.

С другой стороны, неазеотропность смеси при правильном учёте её особенностей позволит повысить термодинамическую эффективность ряда процессов в установке НТК. Наиболее перспективным вариантом является разделение смеси после конденсатора на два потока, которые отличаются фракционным составом исходных компонентов — лёгкий и тяжёлый. Лёгким хладагентом будем называть тот, который обогащён этаном и имеет более низкую среднюю температуру кипения. Тяжёлым хладагентом — тот, который содержит больше пропана и соответственно имеет более высокую среднюю температуру кипения при том же давлении. Как показали исследования различных схемных решений холодильной установки, представляется наиболее эффективным вариант, который позволяет, во-первых, с минимальными затратами реконструировать ПХУ для работы на смеси R290/R170 определённой концентрации, во-вторых, обеспечить эффективное производство холода на двух температурных уровнях (см. рис. 7). В разработанной нами холодильной установке (см. рис. 7) после конденсатора 3 производится разделение потока на лёгкую и тяжёлую фракции, которые раздельно кипят в испарителях 10 и 12 и затем вновь объединяются перед всасыванием в компрессор 1, 2. Каждая из этих фракций обеспечивает выработку холода на вполне определённых отличающихся уровнях. В схеме установки раздельно переохлаждаются потоки указанных

фракций с целью достижения максимально возможной эффективности.



Ряд аппаратов ПХУ изменений не претерпевает. Происходит лишь дополнение схемы необходимыми аппаратами для производства холода с помощью лёгкой фракции смеси. Последовательное захлаживание ШФЛУ в испарителях тяжёлой, а затем лёгкой фракций позволяет эффективно использовать низкопотенциальный холод лёгкой фракции.

В холодильной установке, схема которой изображена на рис. 7, сжатый поток смеси R290/R170 поступает из последней ступени второй секции турбокомпрессора 2 на охлаждение в аппарат воздушного охлаждения (АВО) 3, где частично конденсируется. При температуре окружающего воздуха ниже +6 °С (для района Губкинского ГК — это период с сентября по май, как следует из рис. 4) необходимо последовательное охлаждение и конденсация хладагента с целью получения требуемого фракционного состава. Из АВО смесь направляется в сепаратор фракций 4. В нём смесь разделяется на два потока хладагента соответствующих составов. Иначе, если производить конденсацию без промежуточной сепарации, не удастся выдержать требуемый фракционный состав.

Поток тяжёлого хладагента поступает в промысуд 6, где переохлаждается за счёт испарения части этого же потока, сдросселированного до промежуточного давления. Испарившийся хладагент из межтрубного пространства промысуда при промежуточном давлении направляется на всасывание во вторую секцию компрессора 2, где смешивается с

потоком после первой его секции 1. Основная часть потока после дросселирования подаётся в испаритель тяжёлого хладагента 12, где кипит при некоторой температуре, захлаживая поток газа. Из испарителя пары тяжёлого хладагента направляются на всасывание в первую ступень первой секции турбокомпрессора 1. Вторая часть потока расходуется для переохлаждения лёгкой фракции хладагента. Поток пара лёгкого хладагента из сепаратора 4 подаётся в переохладитель лёгкого хладагента 7, где переохлаждается за счёт испарения части потока тяжёлого хладагента. Пары тяжёлого хладагента также направляются в промежуточную ступень второй секции компрессора 2. Сконденсированный и переохлаждённый лёгкий хладагент дросселируется и поступает в соответствующий испаритель 10, где кипит при более низкой температуре, чем тяжёлый хладагент. Потоки лёгкого и тяжёлого хладагентов смешиваются перед всасыванием в первую ступень компрессора 1.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Понижение температурного уровня работы ПХУ при использовании смеси R290/R170 возможно без существенных изменений режима работы ряда аппаратов установки. Применение неазеотропной смеси хладагента позволяет дифференцировать температурные уровни технологических процессов путём её разделения на различные фракции. Так, захлаживать поток ШФЛУ перед продуктопроводом во избежание размораживания грунта до требуемых  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  при

средней температуре кипения  $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$  фракцией хладагента, обогащённого высококипящим компонентом, а не при температуре  $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ , как это делается в существующей ПХУ. Особенно это актуально, когда нужно увеличить холодопроизводительность. Наиболее низкую температуру поток газа должен иметь перед детандером. Доохладить его удаётся хладагентом, обогащённым этановой фракцией. Учитывая то, что установка НТК требует различное количество холода на разных температурных уровнях, представляется ещё более удачным вариант трёхкомпонентной смеси бутан-пропан-этан, которая позволит получать холод в одном цикле на уровнях от  $-5$  до  $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это приведёт к дальнейшему повышению термодинамической эффективности установки НТК.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Козорез А.И., Хмельнюк М.Г., Мартынюк М.О. Работа холодильных турбокомпрессоров типа ТКФ на альтернативных рабочих телах// Холодильная техника и технология. — 2007. — № 1. — С. 25-28.
2. Перевод холодильных центробежных компрессоров на озонобезопасные хладагенты/ И.Я. Сухомлинов, М.В. Головин, В.Ю. Иванов и др.// Труды XIII-ой междунаучно-технической конф. по компрессоростроению «Компрессорная техника и пневматика в XXI веке». — Сумы: Изд-во СумГУ, 2004. — Т. III. — С. 5-7.
3. Козорез А.И. Основные параметры работы холодильных турбомашин// Холодильная техника. — 2001. — № 3. — С. 9-11.



## Седьмая международная специализированная выставка

# Криоген-Экспо

11-13 ноября 2008 г. Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР», пав.5

**Организатор:**



**Проводится при содействии:**

- ▣ Международного института холода
- ▣ Международной академии холода
- ▣ Украинской ассоциации производителей технических газов «УА-СИГМА»

**Информационная поддержка:**



**ТЕМАТИКА ВЫСТАВКИ:**

- ▣ Криогенное оборудование
- ▣ Гелиевое оборудование
- ▣ Вакуумное оборудование
- ▣ Холодильное и компрессорное оборудование
- ▣ Микрокриогенная техника
- ▣ Сжиженный природный газ
- ▣ Промышленные и редкие газы
- ▣ Применение криогенных технологий в промышленности
- ▣ Системы безопасности

- ▣ Применение криогенных технологий в медицине и биологии, научно-технических исследованиях
- ▣ Емкости для хранения и транспортировки
- ▣ Метрология и средства измерения при низких температурах
- ▣ Комплектующие, вспомогательное оборудование, системы управления и программное обеспечение
- ▣ Сертификация и технические регламенты в криогенной отрасли
- ▣ Образование и ярмарка вакансий

**Деловая программа:** 5-я международная научно-практическая конференция: «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития»

**Дирекция выставки:**  
 115533, Москва, пр-т Андропова, 22 | E-mail: info@mirexpo.ru | Сайт: www.mirexpo.ru  
 Тел./факс: 8 499 618-05-65, 8 499 618-36-88, 8 499 618-36-83

**ВНИМАНИЕ!**  
 Заявки на участие в выставке и конференции принимаются до 1 октября 2008 года