

УДК 621.59

**М.Б. Кравченко**Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, 65039, Украина  
e-mail: kravtchenko@i.ua.**НОВЫЙ ЦИКЛ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОЖИЖЕНИЯ ВОЗДУХА И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ**

*Предложен новый цикл среднего давления для ожижения воздуха, который позволяет снизить термодинамические потери в теплообменных аппаратах. На конкретных примерах с применением  $q$ - $1/T$  диаграмм проведен анализ и сопоставление термодинамических потерь в классическом цикле Клода, холодильном цикле воздухооразделительных установок (ВРУ) среднего давления и в предложенном цикле. Рассмотрена возможность использования цикла в ВРУ для получения жидких продуктов разделения воздуха.*

**Ключевые слова:** криогенная техника; термодинамические потери; разделение воздуха.

**М.Б. Кравченко**

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

**НОВИЙ ЦИКЛ СЕРЕДНЬОГО ТИСКУ ДЛЯ ЗРІДЖЕННЯ ПОВІТРЯ І МОЖЛИВІСТЬ ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В ПОВІТРОРІЗДІЛЬНИХ УСТАНОВКАХ**

*Запропоновано новий цикл середнього тиску для зрідження повітря, який дозволяє знизити термодинамічні втрати в теплообмінних апаратах. На конкретних прикладах із застосуванням  $q$ - $1/T$  діаграм проведено аналіз і зіставлення термодинамічних втрат в класичному циклі Клода, холодильному циклі повітророздільних установках (ПРУ) середнього тиску і в запропонованому циклі. Розглянуто можливість використання циклу в ПРУ для отримання рідких продуктів розділення повітря.*

**Ключові слова:** криогенна техніка; термодинамічні втрати; розділення повітря.

DOI: 10.15673/0453-8307.3/2015.39275



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**1. ВВЕДЕНИЕ**

После цикла низкого давления, предложенного П.Л. Капицей в конце 30-х годов прошлого века, не появилось ни одного нового базового цикла, для ожижения воздуха. По-видимому, это объясняется тем, что известные циклы высокого, среднего и низкого давлений исчерпывают все возможные варианты построения циклов с одним детандером и одним дроссельным вентилем. Поэтому дальнейшее совершенствование циклов для ожижения воздуха возможно только при использовании нескольких детандеров.

Включение нескольких детандеров, на разных температурных уровнях, как это делается, например, в циклах для ожижения гелия, в воздухооразделительных установках не целесообразно, так как в этом случае часть сжатого в компрессоре воздуха не попадает в ректификационную колонну, и из этого воздуха не может быть извлечен целевой продукт.

В работе [1] была предложена ступень охлаждения с тепловой машиной, которая позволяет производить охлаждение прямого потока газа без уменьшения его давления и расхода. Это делает такую ступень охлаждения особенно привлекательной для установок разделения воздуха, в которых для извлечения целевого продукта весь воздух, поступающий в установку, пропускают через ректификационную колонну.

В данной статье предложен новый детандерный цикл для сжижения воздуха, позволяющий существенно повысить холодопроизводительность воздухооразделительных установок за счет применения тепловой машины в качестве дополнительной ступени охлаждения.

При использовании подобных циклов для криогенного обеспечения ВРУ появляется возможность значительно увеличить выход жидких криогенных продуктов разделения воздуха за счет уменьшения термодинамических потерь в цикле.

Кроме воздуходелительных установок, предложенный цикл может найти применение для сжижения природного газа.

## II. АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ КЛАССИЧЕСКОГО ДЕТАНДЕРНОГО ЦИКЛА СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОЖИЖЕНИЯ ВОЗДУХА (ЦИКЛА КЛОДА)

Предлагаемый цикл можно отнести к циклам среднего давления, так как перерабатываемый в нем воздух сжимается компрессором до давления 40-60 бар. Поэтому в качестве аналога для сравнения и сопоставления термодинамических потерь выбран цикл Клода.

Для глубокого анализа термодинамических потерь в цикле Клода рассмотрим работу цикла не на воздухе, а на азоте, так как при этом не требуется учитывать изменение состава смеси газов, которой является воздух.

Температуру азота, выходящего из компрессора примем равной 300К, а давление – 4 МПа. Зададимся недорекуперацией на теплом конце теплообменника равной 10К. К.п.д детандера примем равным 0,75, а температуру азота на входе в детандер – 220К. При этих параметрах в классиче-

ском цикле Клода получаем коэффициент ожижения равный 15,1% при доле детандерного потока 64%.

Анализ термодинамических потерь в аппаратах низкотемпературных установок, работающих по циклу Клода, будем проводить при помощи q-1/T диаграмм, описанных в статье [2].

Напомним, что q-1/T диаграмма сохраняет основные свойства q-T диаграмм, а именно, позволяет судить о возможности теплообмена между потоками теплоносителей. Помимо этого, q-1/T диаграмма дает ясное и наглядное представление о термодинамических потерях, связанных с передачей тепла при конечной разности температур.

На рисунке 1 приведена q-1/T диаграмма для теплообменников цикла Клода. Площадь области q-1/T диаграммы под линией прямого потока (красная линия) пропорциональна эксергии прямого потока (зеленая заливка). Площадь области под линией обратного потока (синяя линия), соответственно, пропорциональна эксергии обратного потока. Отсюда, эксергетические потери от несовершенства теплообмена пропорциональны площади q-1/T диаграммы, заключенной между линиями прямого и обратного потоков.

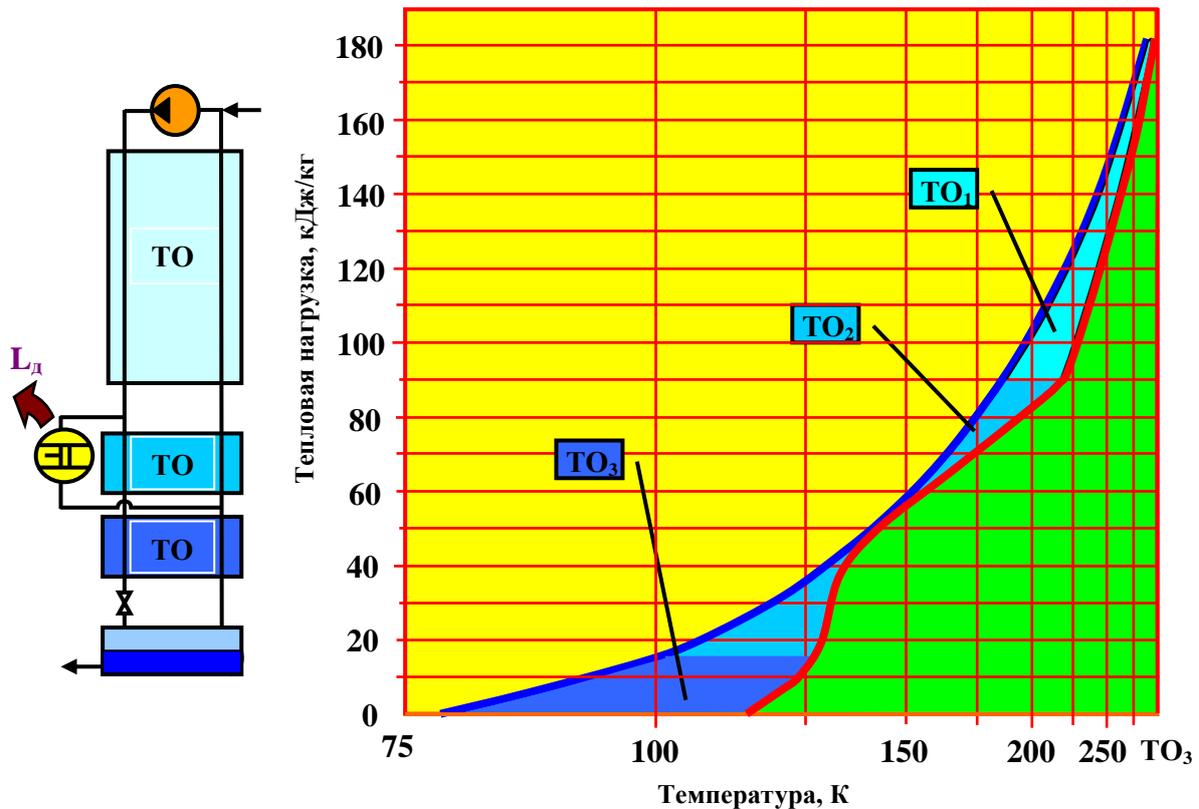


Рисунок 1 – q-1/T диаграмма теплообменников в цикле Клода для ожижения азота.

Из диаграммы видно, что предельная степень термодинамического совершенства теплообменников цикла Клода ограничивается сближением температур прямого и обратного потоков вблизи критической температуры. Это объясняется тем, что вблизи критической точки теплоемкость прямого потока резко возрастает.

Следует сразу же отметить, что реальные воздухоразделительные установки работают не по классическому циклу Клода. Основное отличие криогенного цикла воздухоразделительных установок заключается в том, что у них воздух из детандера выходит с параметрами близкими к параметрам насыщения. Это делается для того, чтобы

детандерный поток воздуха можно было направить в ректификационную колонну для извлечения из него целевого продукта.

В классическом же цикле Клода, описанном в учебниках по криогенной технике, температура газа, выходящего из детандера, существенно выше температуры насыщения.

При понижении температуры газа, работа его расширения в детандере уменьшается. Поэтому, понижение температуры воздуха на входе в детандер приводит к уменьшению холодопроизводительности детандера, и, соответственно, к снижению коэффициента оживания цикла реальной ВРУ по сравнению с классическим циклом Клода.

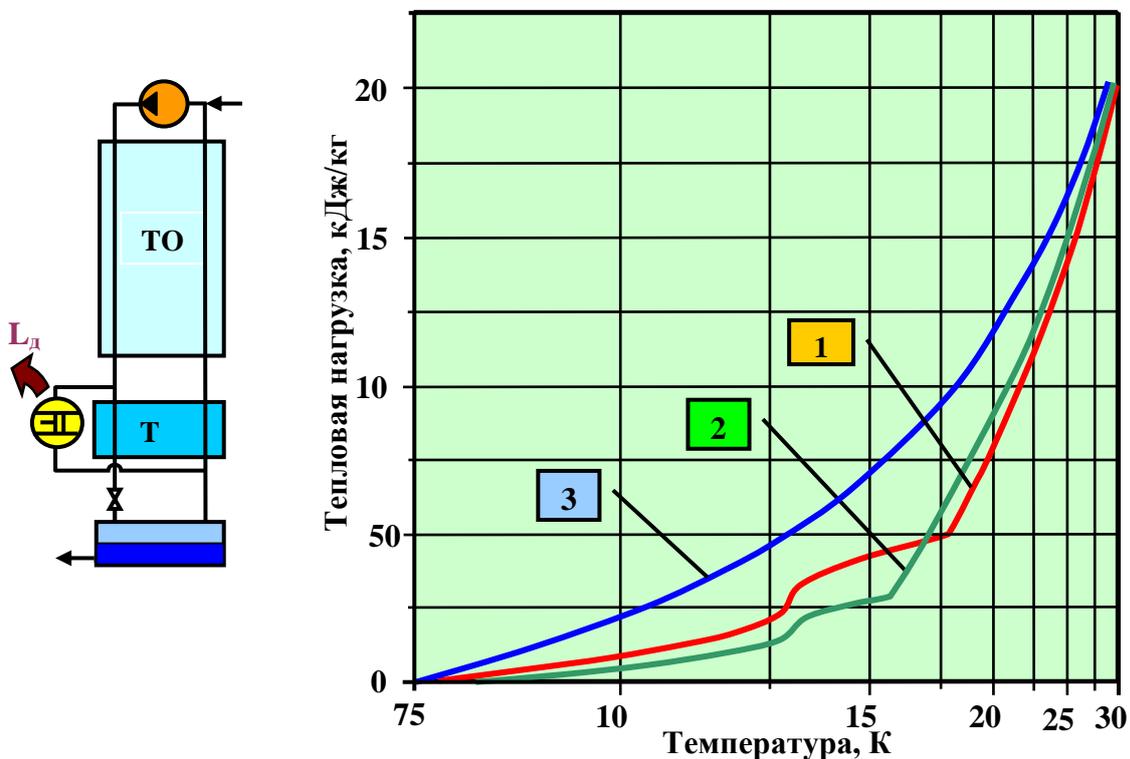


Рисунок 2 – Q-1/T диаграммы теплообменников в цикле ВРУ среднего давления.

- 1 – прямой поток при температуре на входе в детандер – 174,9 К;
- 2 – прямой поток при температуре на входе в детандер – 156,5 К;
- 3 – обратный поток

На рисунке 2 приведена q-1/T диаграммы для криогенного цикла среднего давления, в котором поток воздуха на выходе из детандера имеет температуру насыщения.

Для того чтобы получить на выходе из детандера азот при параметрах насыщения, в цикле понижена температура отвода газа в детандер до 174,9 К. В результате этого, при прочих равных условиях, коэффициент оживания в цикле понижился до 14,7% при доле детандерного потока 83%.

Еще одним существенным признаком, отличающим теоретический цикл Клода от криогенных

циклов ВРУ, является то, что в цикле ВРУ среднего давления воздух расширяется не до давления обратного потока, а до давления в нижней колонне аппарата двукратной ректификации, т. е. до давления порядка 0,6 МПа. Поэтому работа детандера при том же адиабатном к.п.д. получается существенно меньше. При значении адиабатного к.п.д. детандера равном 0,75 и давлении азота с параметрами насыщения при 0,6 МПа на выходе из детандера, температура азота на входе в детандер получается равной 156,5 К.

В воздуходелительных установках часть энергии, недополученная в детандере при расширении воздуха до давления 0,6 МПа, не теряется, а используется для разделения воздуха. Поэтому

азот и кислород, которые отбираются из ректификационной колонны, поступают в канал обратного потока основного теплообменника при давлении близком к атмосферному.

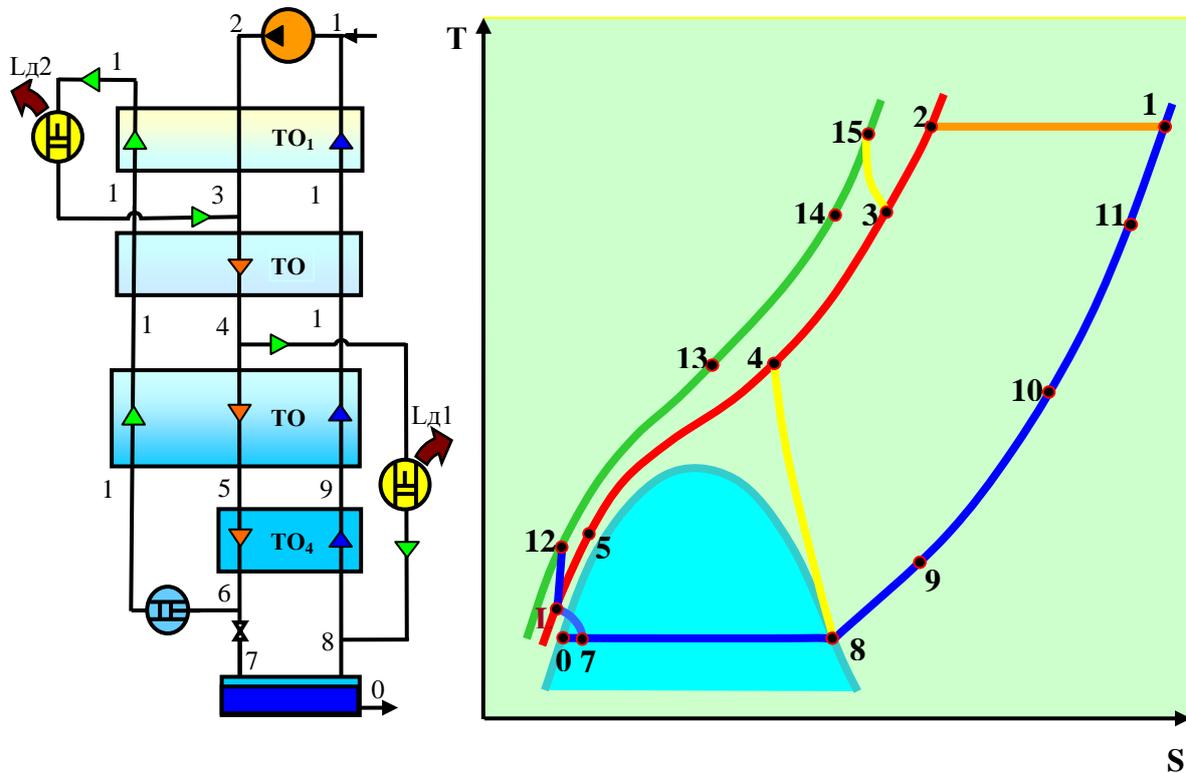


Рисунок 3 – Принципиальная схема установки для реализации предлагаемого цикла

Если в качестве объекта для сравнения принять цикл в котором азот на расширение в детандер отбирается при давлении 4 МПа и температуре 156,5 К, а выходит с параметрами насыщения при давлении 0,1 МПа, то, при прочих равных условиях, получим значение коэффициента ожижения 9,9% при доле детандерного потока 87,9%. Полученное значение коэффициента ожижения близко к доле жидких продуктов разделения воздуха, которую можно получить на установках среднего давления.

Как видно из q-1/T диаграммы, приведенной на рисунке 2, для теплообменников этого цикла, область наибольших термодинамических потерь сместилась в сторону более высоких температур. Кроме этого вид q-1/T диаграммы теплообменников цикла указывает на то, что при температуре выше 150 К от прямого потока может быть отобрано некоторое количество тепла без нарушения условий осуществимости теплообмена между прямым и обратным потоками. Отбор тепла от прямого потока и передачу его на более низкий температурный уровень целесообразно произвести при помощи тепловой машины использующей азот в качестве рабочего вещества.

Таблица 1. Параметры расчетных точек цикла

Номер точки	Давление, бар.	Температура, К.	Энтальпия, кДж/кг.
0	1	77,244	-122,25
1	1	290	300,78
2	40	300	302,94
3	40	218,78	210,39
4	40	156,63	127,11
5	40	89	-95,65
6	40	80	-113,93
8	1	77,244	77,073
9	1	82,7	83,14
10	1	148	152,63
11	1	217,5	225,26
12	120	83,754	-100,76
13	120	144,52	28,15
14	120	290	276,5

Как известно из термодинамики, тепловая машина отбирает от горячего источника больше тепла, чем отдает холодному источнику, так как часть тепла, отведенная от горячего источника,

превращается в работу. Работа тепловой машины, отведенная из цикла, и обеспечивает дополнительную холодопроизводительность предлагаемого криогенного цикла.

### III. НОВЫЙ ДЕТАНДЕРНЫЙ ЦИКЛ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СЖИЖЕНИЯ ВОЗДУХА

В данной работе предложен новый детандерный цикл среднего давления для ожижения воздуха. Принципиальная схема установки для реализации предлагаемого цикла показана на рисунке 3.

Установка работает следующим образом. Газ сжимается компрессором до давления 4 МПа и при температуре близкой к температуре окружающей среды поступает в первый теплообменник, где происходит его охлаждение двумя обратными потоками высокого и низкого давлений. Далее прямой поток смешивается с расширившимся

в детандере обратным потоком высокого давления и продолжает охлаждение двумя обратными потоками во втором теплообменнике. При температуре 156,5 К часть прямого потока отбирается на расширение в основной детандер. Оставшаяся часть прямого потока охлаждается в третьем и четвертом теплообменниках до температуры порядка 80 К. Перед дросселированием часть газа из прямого потока отбирается и сжимается до давления обратного потока высокого давления – порядка 12 МПа. Эта часть газа поступает в каналы теплообменников  $ТО_3-ТО_1$  для обратного потока высокого давления. Оставшаяся часть прямого потока дросселируется до давления близкого к атмосферному.

Образовавшаяся в результате дросселирования парожидкостная смесь разделяется на жидкую и паровую фазы. Жидкая фаза выводится из установки, а паровая фаза поступает в каналы для обратного потока низкого давления теплообменников  $ТО_4-ТО_1$ , где нагревается, отбирая тепло от прямого потока газа.

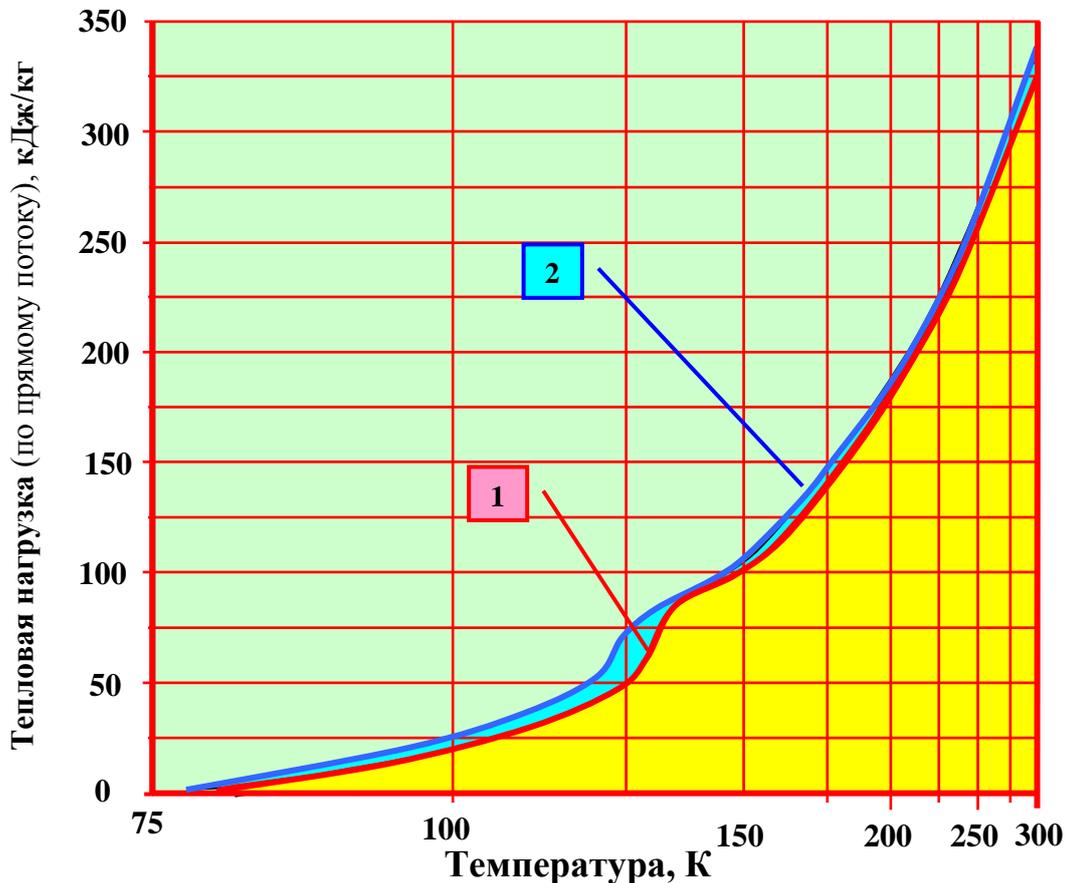


Рисунок 4 – Q-1/T диаграмма теплообменников в предлагаемом цикле.

Принципиальное отличие предлагаемого цикла от других известных циклов криогенных установок заключается в том, что в нем часть прямого потока газа сжимается при низкой температуре до более высокого давления, нагревается в

теплообменниках, и поступает на расширение в детандер высокого давления. Так как температура при которой происходит сжатие существенно меньше температуры расширения газа, то работа расширения газа оказывается больше работы сжа-

тия. Поэтому, предлагаемый цикл можно рассматривать как комбинацию обратного цикла Клода с предварительным охлаждением прямого потока, и прямого силового цикла газотурбинной установки, работающего за счет тепла, отбираемого от прямого потока.

С точки зрения первого начала термодинамики увеличение холодопроизводительности установки объясняется дополнительной работой, полученной в прямом силовом цикле и отведенной из установки.

Отбор тепла от прямого потока приводит к понижению его температуры, что уменьшает разность температур между прямым потоком и двумя обратными потоками газа и, следовательно, уменьшает термодинамические потери от несовершенства теплообмена. Поэтому, с точки зрения второго начала термодинамики повышение холодопроизводительности цикла достигается за счет уменьшения термодинамических потерь от несовершенства теплообмена.

По сравнению с обычным детандерным циклом, в котором мы можем варьировать только долей детандерного потока, предлагаемый цикл позволяет варьировать тремя параметрами: долями газа проходящими через детандеры и давлением обратного потока высокого давления. Это открывает дополнительные возможности для настройки цикла с целью повышения его эффективности.

Повышение давления в обратном потоке высокого давления при прочих равных условиях приводит к росту работы детандера высокого давления и повышению холодопроизводительности цикла. К сожалению, мы не можем неограниченно повышать давление второго обратного потока при неизменной доле этого потока. Ограничения, связанные с возможностью организации теплообмена в трехпоточных теплообменниках приводят к тому, что по мере возрастания давления второго обратного потока приходится уменьшать долю этого потока. В результате взаимодействия этих факторов, действие одного из которых приводит к росту холодопроизводительности установки, а действие другого снижает эту холодопроизводительность, мы получаем некоторое оптимальное сочетание параметров, при котором достигается максимум холодопроизводительности установки и, соответственно, максимальная величина коэффициента оживления.

Для установок работающих на азоте, при давлении прямого потока 40 бар и к.п.д. детандера 75%, оптимальные значения давления второго обратного потока и его доли составляют, соответственно, 12 МПа и 28,5% при доле газа проходящей через основной детандер равной 84,7%. При этом коэффициент оживления азота в цикле достигает величины 13,1%. Это примерно на 32% больше чем в цикле ВРУ среднего давления, рассмотренном выше.

На рисунке 4 показана  $q-1/T$  диаграмма для теплообменников предлагаемого цикла.

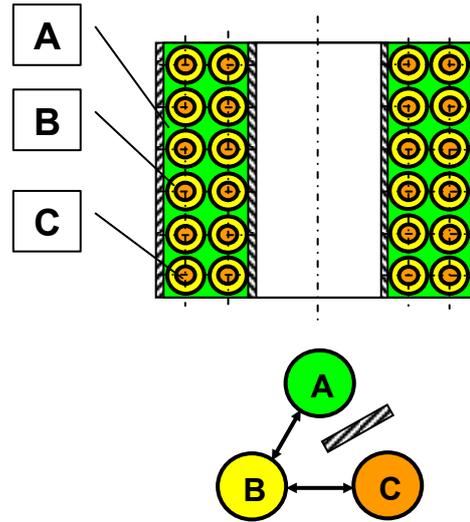
Так как все теплообменники установки, кроме теплообменника  $ТО_4$ , трехпоточные, то на приведенной  $q-1/T$  диаграмме в качестве линии обратного потока показана линия средневзвешенной температуры двух обратных потоков. Как показано в работе [3] замена двух потоков одним, водяной эквивалент, которого равен сумме водяных эквивалентов этих двух потоков, а температура равна средневзвешенной температуре этих потоков, позволяет проверить работоспособность многопоточного теплообменника в том случае, когда эти два потока не обмениваются теплом между собой.

Так как линия средневзвешенной температуры двух обратных потоков не пересекает линию прямого потока, то теплообмен между этими тремя потоками в принципе возможен. Для того, чтобы реализовать теплообмен между одним прямым и двумя обратными потоками, при заданных температурах потоков на концах теплообменника, требуется обеспечить соответствующую поверхность теплообмена. В качестве одного из вариантов реализации теплообмена между рассматриваемыми тремя потоками можно рассмотреть случай, когда температуры обоих обратных потоков равны их средневзвешенной температуре. Такой вариант распределения температур обратных потоков удобен для анализа схемы, но малоприспособлен для практической реализации.

Вид приведенной  $q-1/T$  диаграммы говорит о том, что температуры прямого и обратных потоков очень близки, что указывает на значительное снижение термодинамических потерь от несовершенства теплообмена. Следует обратить внимание на то, что при добавлении второго сверхкритического обратного потока, на линии средневзвешенной температуры обратных потоков появился характерный выступ, соответствующий максимуму теплоемкости обратных потоков. При оптимальном соотношении долей детандерных потоков и давления второго обратного потока, форма этого выступа практически повторяет форму линии прямого потока.

Замена двух обратных потоков одним со средневзвешенной температурой означает, что мы фактически уже выбрали схему теплообмена в трехпоточном теплообменнике. Эта схема приведена на рисунке 5. В трехпоточном теплообменнике прямой поток взаимодействует с каждым из обратных потоков, а теплообмен между обратными потоками практически отсутствует. Именно такая схема теплообмена характерна для трехпоточных теплообменных аппаратов, используемых в ВРУ для получения кислорода или азота под высоким давлением.

Конечно же, предлагаемый цикл имеет и недостатки. Таких недостатков, по крайней мере, два. Первый – это большая тепловая нагрузка теплообменников, что потребует увеличения поверхности теплообмена и размеров теплообменных аппаратов. Второй – то, что предлагаемый цикл содержит дополнительный детандер и машину для



**Рисунок 5** – Схема теплообмена в трехпоточном теплообменнике предлагаемого цикла.

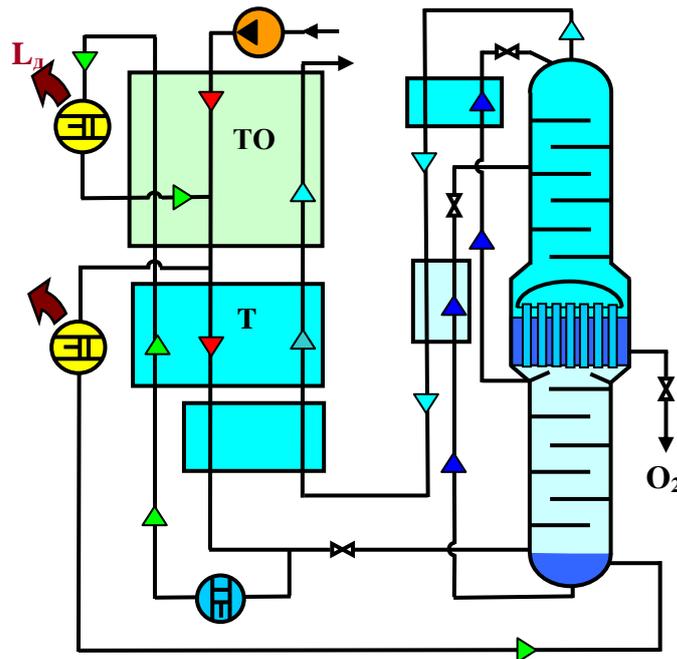
A – обратный поток низкого давления; B – прямой поток;  
C – обратный поток высокого давления.

сжатия газа. В качестве такой машины можно использовать серийно выпускаемые насосы сжиженных газов, которые по диапазону рабочих температур и рабочих давлений идеально подходят для поставленной задачи. Так как работа детандера больше работы насоса, то возможно использование турбомашин с двумя рабочими колесами на одном валу.

Перспективы применения предлагаемого детандерного цикла в ВРУ обусловлены тем, что воздухоразделительные установки среднего давления для получения газообразного кислорода под

давлением уже имеют в своем составе насос сжиженного газа и трехпоточный теплообменник с каналом для газа высокого давления. Причем, схема теплообмена в трехпоточном теплообменнике точно такая же, как требуется для работы предлагаемого цикла. Поэтому производство новых установок для работы по предлагаемому циклу или модернизация уже существующих установок не потребует использования новых технологий.

На рисунке 6 приведена схема ВРУ для получения жидкого кислорода на базе предлагаемого цикла.



**Рисунок 6** – Схема ВРУ для получения жидкого кислорода на базе предлагаемого цикла

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый детандерный цикл среднего давления для ожижения воздуха, позволяющий существенно повысить холодопроизводительность криогенных установок за счет снижения термодинамических потерь.

Принципиальное отличие предлагаемого цикла от других известных циклов криогенных установок заключается в том, что в нем часть прямого потока сжимается при низкой температуре, нагревается в теплообменнике отбирая тепло от прямого потока, и поступает на расширение в детандер.

Перспективы применения нового детандерного цикла в ВРУ обусловлены тем, что воздухоразделительные установки среднего давления для получения газообразного кислорода под давлением уже имеют в своем составе насос сжиженного газа и трехпоточный теплообменник с каналом для газа высокого давления. Причем, схема теплооб-

мена в трехпоточном теплообменнике точно такая же, как требуется для работы предлагаемого цикла. Поэтому производство новых установок для работы по предлагаемому циклу не потребует серьезной перестройки производства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Лавренченко Г.К., Кравченко М.Б.** Тепловая машина как ступень охлаждения в циклах криогенных систем. // Технические газы, №2, 2011 г.
2. **Кравченко М.Б.** Анализ термодинамических циклов низкотемпературных установок с помощью  $q-1/T$  диаграмм. // Технические газы, №2, 2004 г.
3. **Кравченко М.Б.** Достаточные условия работоспособности многопоточных теплообменников. // Технические газы, №3, 2009 г.
4. **Бродянский В.М., Семенов А.М.** Термодинамические основы криогенной техники. Москва. Энергия. 1980 г.

**М.Б. Kravchenko**

Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatnaya str., Odessa, 65082, Ukraine  
e-mail: kravtchenko@i.ua.

## NEW CYCLE OF AVERAGE PRESSURE FOR AIR LIQUEFYING AND POSSIBILITY OF ITS APPLICATION IN VRU

*The new cycle of average pressure for air liquefaction permitting lowering of thermodynamic losses in heat exchange devices is offered. On specific examples with application of the  $q-1/T$  diagrams analysis and comparison of thermodynamic losses in a classical Cloude cycle, in air separation units cycle and offered cycle is carried out. The opportunity to use offered cycle in air separation units for obtaining the liquid components of air fractionation is considered.*

**Key words:** cryogenic engineering; thermodynamic losses; air fractionation.

## REFERENCES

1. **Lavrenchenko, G.K., Kravchenko, M.B. 2011.** Teplovaya mashina kak stupen okhlazhdeniya v tsiklakh kriogennykh sistem. *Tekhnicheskie gasy*, No.2. (in Russian)
2. **Kravchenko, M.B. 2004.** Analiz termodinamicheskikh tsiklov nizkotemperaturnykh ustanovok

3. **Kravchenko, M.B. 2009.** Dostatochnye usloviya rabotosposobnosti mnogopotchnykh teploobmennikov. *Tekhnicheskie gasy*, No.3. (in Russian)
4. **Brodyanskiy, V.M., Semenov, A.M. 1980.** Termodinamicheskie osnovy kriogennoi tekhniki. M.: Energiya (in Russian)

Отримана в редакції 27.02.2015, прийнята до друку 23.04.2015