

УДК 536.483.001.24 (075)

Г.К. Лавренченко, А.В. Плесной

ООО «Институт низкотемпературных энерготехнологий», а/я 188, г. Одесса, Украина, 65026

e-mail: lavrenchenko@paco.net

СНИЖЕНИЕ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ В ВРУ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ С ДЕТАНДЕР-КОМПРЕССОРНЫМ АГРЕГАТОМ

Растёт спрос на жидкие продукты разделения воздуха, особенно на жидкий кислород. Для их производства в больших количествах применяются воздухоразделительные установки (ВРУ), работающие по циклам двух давлений. В тех случаях, когда потребность в жидком кислороде составляет до 1000 кг/ч, можно использовать схемы с одним средним давлением. Анализируются показатели ВРУ среднего давления, в схему которой включен детандер-компрессорный агрегат (ДКА). Сравнение её с ВРУ, содержащей низкотемпературную холодильную машину, показало, что удельные затраты энергии могут быть снижены при использовании ДКА с 1,12 до 1 кВтч/кг жидкого кислорода.

Ключевые слова: Криогенная техника. Воздухоразделительная установка. Кислород. Азот. Жидкие криопродукты. Холодильная машина. Детандер-компрессорный агрегат. Ректификация. Удельные затраты энергии.

G.K. Lavrenchenko, A.V. Plesnoy

COST REDUCTIONS ENERGY TO PRODUCE LIQUID PRODUCTS IN ASP MEDIUM PRESSURE WITH EXPANDER-COMPRESSOR UNITS

There is a growing demand for liquid air separation products, especially in the liquid oxygen. For their production in large quantities air separation units (ASU) is applied, which work in cycles of two pressures. In cases when the demand for liquid oxygen up to 1000 kg/h, it's possible to use the scheme with one medium pressure. The rates of ASU average pressure in the circuit which included expander-compressor unit (ECU) are analyzed. Its comparison with ASU, containing low-temperature refrigeration machine showed that the specific energy consumption can be reduced by using ECU from 1.12 to 1 kWh/kg of liquid oxygen.

Keywords: Cryogenic engineering. Air separation unit. Oxygen. Nitrogen. Liquid cryoproducts. Refrigerator. Expander-compressor unit. Rectification. Specific expenses of energy.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается рост спроса на жидкие продукты разделения воздуха. Для их производства в относительно больших количествах применяются воздухоразделительные установки (ВРУ), работающие по циклам двух давлений [1]. В тех случаях, когда потребность в жидких продуктах не превышает 1000 кг/ч, можно использовать схемы с одним средним давлением, в которых технологический процесс разделения воздуха и обеспечивающий его холодопроизводящий цикл совмещены.

Такие ВРУ можно комплектовать современными воздушными поршневыми компрессорами блочного типа, которые не нуждаются в фундаментах [2,3]. В них применяется разделенная система смазки, с помощью которой отдельно смазываются механизмы

движения и цилиндропоршневые группы. Последние работают в условиях существенно ограниченной смазки с целью снижения поступления масла в компримируемый воздух.

Ранее в [4] были перечислены основные способы увеличения выхода жидких продуктов в ВРУ среднего давления. Выполненный анализ способов, приводящих к росту производительности ВРУ при работе в жидкостном режиме, показал, что они в разной степени сказываются на повышении её эффективности. Так, наиболее «сильными» способами оказались следующие: увеличение давления перед детандером; повышение изоэнтропного КПД детандера и организация охлаждения части прямого потока воздуха в низкотемпературной холодильной машине.

В [4] отдельно не рассматривался такой способ увеличения выхода жидких продуктов, как полезное

использование работы расширения воздуха в детандере. Поэтому в настоящей статье исследуем, как наиболее эффективно распорядиться работой детандера и насколько этот способ может увеличить производительность ВРУ по жидкому кислороду.

Проведём сравнение характеристик двух модернизированных ВРУ: с низкотемпературной холодильной машиной (НХМ), которую назовем КжК-0,5М1, предложенной в [4], и ВРУ с детандер-компрессорным агрегатом (ДКА). Последнюю установку обозначим как КжК-0,5М2. В ходе расчётов примем, что воздушные компрессоры и ректификационные колонны установок одинаковы.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРУ С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНОЙ

Оценка параметров ВРУ выполнялась с использованием результатов собственных расчетов. Процессы, реализуемые в указанных двух установках, моделировались в среде HYSYS. Термодинамические свойства воздуха, смесей N_2-O_2 , O_2-Ar-N_2 описывались уравнением состояния Peng-Robinson [5] в модификации Styjek и Vera [6]. Модифицированное уравнение PRSV относится к обобщенным уравнениям состояния, которые позволяют рассчитывать свойства смесей, состоящих из различных компонентов, на основе ограниченной информации о свойствах жидких веществ и коэффициентах их бинарного взаимодействия в смесях. Из [7] известно, что программный комплекс, созданный на основе PRSV, описывает свойства воздуха как трехкомпонентной смеси с максимальным отклонением от опытных данных на 1%.

Установка КжК-0,5М1 (рис.1) комплектуется поршневым компрессором 4ВМ10-55/71 с приводом от синхронного электродвигателя. Поток воздуха 1 в количестве 3963 кг/ч (3300 $nm^3/ч$) сжимается в компрессоре КМ до номинального давления 6,98 МПа [2], затем поступает на охлаждение в концевой холодильник КХ и теплообменник-ожижитель ТО. После того, как из воздуха удалена часть влаги, его направляют в блок комплексной очистки (БКО). Перед поступлением в БКО и входом в холодный блок воздух охлаждают в теплообменнике-стабилизаторе, эффективность работы которого обоснована в [8]. После этого воздух с температурой 290 К и давлением 6,48 МПа (потери давления в прямом потоке приняты согласно [1,4]) разделяется на две части. Одна из них — 10 направляется в первую секцию основного теплообменника ОТ(1), где охлаждается движущимся в нем противотоком отбросным азотом. Вторая часть 8 охлаждается в НХМ до температуры 243К. Далее оба потока объединяются в поток 12 и охлаждаются во второй секции ТО (II). Большая часть воздуха в виде потока 14 при температуре отбора отводится на расширение в детандер, откуда расширенный поток 15 направляется в детандерный теплообменник на дополнительное охлаждение и далее с параметрами 16 вводится в куб нижней колонны НК с давлением 0,6 МПа. Вторая

часть воздуха 17 (дроссельный поток) поступает в третью секцию основного теплообменника ТО (III), в котором охлаждается до температуры 108 К и дросселируется через ВР-1 в куб нижней колонны.

В нижней колонне поступивший воздух разделяется на кубовую жидкость М и азотную флегму Ф. Поток кубовой жидкости 20 переохлаждается в переохладителе ТО-4 примерно на 2 К от температуры насыщения, после чего дросселируется в теплообменник ТО-6, в котором переохлаждает поток жидкого кислорода Кж. Затем кубовый поток в виде парожидкостной смеси 23 поступает в верхнюю колонну с давлением 0,143 МПа. Поток азотной флегмы 24 из кармана верхней части нижней колонны направляется в переохладитель ТО-5, где переохлаждается на 10К, после чего дросселируется в верхнюю колонну на орошение.

В верхней колонне происходит окончательное разделение воздуха на продукционный жидкий кислород Кж и отбросный азот А.

Поток отбросного азота 27 отводится из верхней части колонны, нагревается в ТО-5, переохлаждая при этом в теплообменнике азотную флегму, и в ТО-4 — кубовую жидкость, а потом охлаждает детандерный поток перед вводом в куб НК. Далее этот поток А противотоком проходит основной теплообменник, где охлаждает прямой поток воздуха, затем поступает в теплообменник-ожижитель, после которого его разделяют на две части: одну используют для регенерации адсорберов в БКО, другую — сбрасывают в атмосферу.

Поток жидкого кислорода 35 отбирается из куба верхней колонны в состоянии насыщения и направляется для переохлаждения примерно на 8К в ТО-6 за счет частичного испарения кубовой жидкости. Переохлажденный кислород 36 сливается через вентиль ВР-4 в криогенную ёмкость.

Давления в колоннах двукратной ректификации приняты по рекомендациям [9], согласно которым давление в кубе НК — 0,6 МПа, а давление в её верхней части — 0,58 МПа. Если в колонне разделяется трехкомпонентная смесь, и установка рассчитана на возможный режим работы с выдачей азота особой чистоты ($y_o=99,996\%$), число теоретических тарелок (ЧТТ) составляет 19. Давление в верхней части ВК принято 0,135 МПа из условия преодоления сопротивлений в трубопроводах, переохладителях, основном теплообменнике и реципиентах при регенерации адсорбентов БКО. При сопротивлении в верхней колонне 0,02 МПа давление в её испарителе составит 0,155 МПа. ЧТТ верхней колонны при условии отбора технического кислорода первого сорта с чистотой 99,7 % равно 25. Ввод кубовой жидкости производится на 5-ю тарелку, в результате чего достигается минимальное ЧТТ при заданной концентрации продукта.

Как отмечается в [4], для заметного роста выработки жидких продуктов разделения воздуха должна быть значительно увеличена разность между генерацией холода и его потерями в ВРУ. Это вызвано тем,

что при работе ВРУ в таких режимах с жидкими продуктами наружу выводится существенное количество холода [10].

Из энергетического баланса холодной части ВРУ (см. рис. 1), к которой относятся выделенные пунктиром на схеме блоки «охлаждение» и «ректификация», следует, что количество производимого жидкого кислорода

$$K_{ж} = (1/\Delta i_{кж}) [B(i_1 - i_7) + BD\Delta i_s \eta_s + Bd(i_8 - i_9) - A(i_1 - i_{33}) - Q_{тн}], \quad (1)$$

где $B, K_{ж}, A$ — расходы перерабатываемого воздуха

(п.в.), производящего жидкого кислорода и азота; $(i_1 - i_7) = [(i_1 - i_3) + (i_3 - i_4) + (i_4 - i_7)]$ — удельная холодопроизводительность, представляющая сумму интегрального изотермического дроссель-эффекта $(i_1 - i_3)$; охлаждения прямого потока в теплообменнике -ожижителя $(i_3 - i_4)$ и охлаждения с помощью ВХМ в теплообменнике-стабилизаторе $(i_4 - i_7)$; d, D — доли воздуха, направляемые в НХМ и детандер; $\Delta i_s \eta_s (i_{14} - i_{15})$ — холодопроизводительность детандера; $\Delta i_s \eta_s$ — теплоперепад в обратимом детандере и изоэнтروпный КПД детандера; $(i_8 - i_9)$ — охлаждение потока воздуха в НХМ; $A(i_1 - i_{33})$ — потеря от недорекуперации пото-

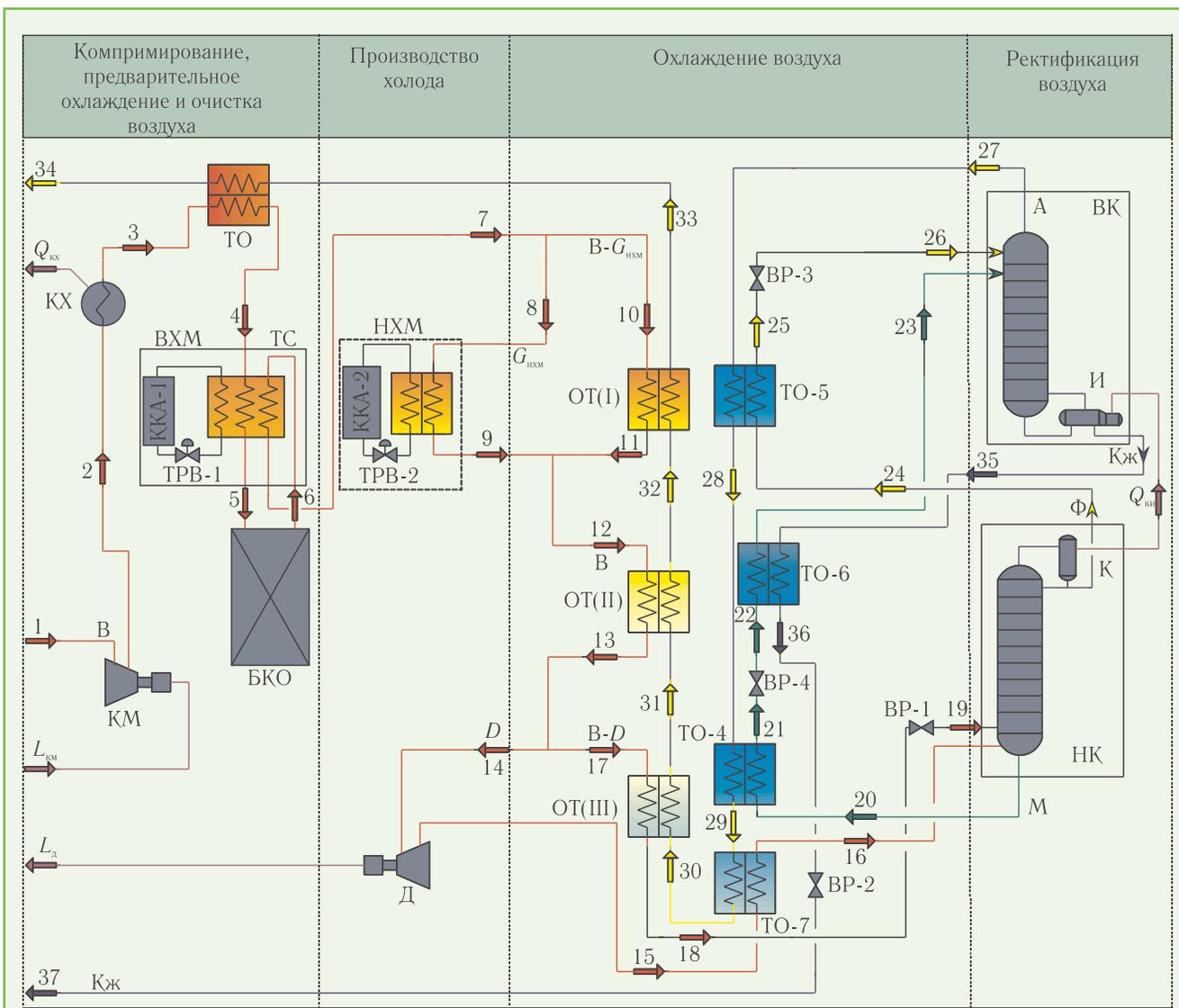


Рис. 1. Принципиальная схема ВРУ КжК-0,5М1 при её работе в режиме выдачи жидкого кислорода: КМ, КХ — компрессор и его концевой холодильник; ТО — теплообменник-ожижитель; ТС — теплообменник-стабилизатор; БКО — блок комплексной очистки воздуха; ВХМ, НХМ - высоко- и низкотемпературные холодильные машины; ККА-1, ККА-2 — компрессорно-конденсаторные агрегаты; ТРВ-1, ТРВ-2 — терморегулирующие вентили; ОТ (I, II, III) — секции основного теплообменника; Д — детандер; ВР-1, -2, -3, -4 — дроссельные вентили; НК, ВК — нижняя и верхняя ректификационные колонны; ТО-4, -5, -6, -7 — теплообменники-переохладители кубовой жидкости, азотной флегмы, жидкого кислорода, детандерного потока; И, К — испаритель и конденсатор колонны двукратной ректификации; В, А, Кж, $G_{НХМ}$, D, М, Ф — потоки воздуха после компрессора; отбросного азота; производящего жидкого кислорода; воздуха, охлаждаемого в холодильной машине; воздуха, направляемого в детандер; кубовой жидкости; азотной флегмы; $L_{кж}$ — работа компрессора; $Q_{кж}$ — теплота компримирования, отводимая в концевом холодильнике; $L_{д}$ — работа расширения детандера

ка отбросного азота на теплом конце теплообменника-ожижителя ТО, так как $(i_1 - i_{33}) = [(i_1 - i_{34}) + (i_3 - i_4)]$; $Q_{тн}$ — общий теплоприток к холодной части ВРУ; $\Delta i_{кж} = (i_1 - i_{12})$ — разность энтальпий, характеризующая удельную холодопроизводительность, необходимую для оживания кислорода в изобарическом процессе.

Выражение (1) используется для оценки эффективности оживания, так как дает представление о разности между холодопроизводительностью цикла и потерями холода в нём.

Для расчёта показателей ВРУ в приближении к реальным условиям зададимся удельным теплопритоком 188 кДж/кмоль [1]. В пересчете на количество п.в. теплоприток составит 7,14 кВт.

При вариантных расчетах ряда показателей ВРУ проверялась реализуемость теплообмена в основном теплообменнике с учётом требований II-го начала термодинамики. Принимались во внимание выход жидкого кислорода и его концентрация, недорекуперация T_{7-33} на теплом конце ТО(I).

Исследовалось также влияние отборов воздуха d на НХМ и D на детандер. Из табл. 1 видно, что при отключении НХМ, т.е. при $d=0$, возрастали удельные затраты энергии l на производство жидкого кислорода. При увеличении же расхода через НХМ наблюдается увеличение выхода Кж, но при этом, в случае одинаковой недорекуперации $\Delta T_{7-33} \approx 15\text{K}$ и отбора воздуха на детандер D , возникают недопустимые режимы его работы, когда на выходе из него появляется двухфазный поток воздуха. Введение в схему детандерного теплообменника повышает температуру поступающего отбросного азота в ОТ(III) и тем самым смещает процесс расширения в детандере в диапазон более высоких температур, где этот процесс термодинамически более эффективен. Одновременно исключается вероятность работы детандера в двухфазной области.

Из табл. 1 можно установить, что минимум удельных затрат достигается при отборе на НХМ 43 % п.в. и подаче на детандер 76 % п.в. при 190 К.

Для снижения затрат энергии в цикле целесообразно использовать детандер-компрессорный агрегат (ДКА). Работа на валу детандера, расходуемая на нагрев масла в подшипниках и масляном тормозе, составляет более 6 % всей расходуемой в установке работы. Но эффективное использование ДКА в установках такого типа сопряжено в рядом трудностей.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРУ С ДЕТАНДЕР-КОМПРЕССОРНЫМ АГРЕГАТОМ

Примем, что в ВРУ КжК-0,5М2, как отмечалось, используется тот же компрессор 4ВМ10-55/71, что и в ВРУ КжК-0,5М1. Прежними остаются и аппараты блока разделения воздуха.

Схема ВРУ КжК-0,5М2 изображена на рис. 2. Как видно из схемы, в состав ВРУ включён детандер-компрессорный агрегат (ДКА). В его компрессорной ступени (КС) часть воздуха D сжимается в процессе 8-9 за счёт работы, производимой детандерной ступенью (ДС). В результате охладившийся в

НХМ и теплообменнике ОТ (II) воздух поступает в ДС с более высоким давлением. Такое использование работы расширения является более эффективным. Этому способу, по сравнению с дожатием всего потока воздуха после компрессора, отдано предпочтение в [11]. Покажем, за счёт чего увеличивается выход жидкого кислорода Кж.

Таблица 1. Расчётные показатели ВРУ КжК-0,5М1

$G_{нхм}$, кг/ч (% п.в.)	0	793 (20%)	1189 (30%)	1585 (40%)	1705 (43%)	1705 (43%)
$Q_{нхм}$, кВт	0	11,93	17,89	23,85	25,66	25,66
$G_{д}$, кг/ч (% п.в.)	3091 (78%)	2774 (70%)	2973 (75%)	3091 (78%)	3091 (78%)	2998 (75,7%)
T_{13} , К	201	213	196	187	186	190
$VD\Delta i_s \eta_s$, кВт	50,91	50,4	46,86	44,76	44,32	44,73
Кж, кг/ч	432,7	549,3	576,9	605,2	618,1	630,1
y_A , %	13,8	10,89	10,17	9,43	9,09	8,77
T_{7-33} , К	14,8	15,3	15,6	14,8	15,8	16,2
l , кВтч/кг	1,58	1,28	1,22	1,16	1,14	1,12

Примечание: Принято, что КПД детандера $\eta_s=0,8$, а температура окружающей среды $T_{oc}=300\text{K}$

Из энергетического баланса находим, что при работе ВРУ в режиме производства жидкого кислорода его вырабатывается в количестве

$$K_{ж} = (1/\Delta i_{кж}) [B(i_1 - i_7) + VD\Delta i'_r + VD\Delta i'_s \eta_s + G_{нхм}(i_{12} - i_{13}) - A(i_1 - i_{37}) - Q_{тн}], \quad (2)$$

где $\Delta i'_r = (i_8 - i_{10})$ — изотермический дроссель-эффект, обусловленный повышением давления части воздуха в КС агрегата и его последующим охлаждением в концевом холодильнике до температуры окружающей среды T_{oc} ; $\Delta i'_s$ — изоэнтропный теплоперепад, отсчитываемый от состояния воздуха при более высоком начальном давлении расширения в детандерной ступени; $A(i_1 - i_{37})$, $Q_{тн}$ — потери холодопроизводительности, принимаемые такими же, как и в ВРУ КжК-0,5М1; $\Delta i_{кж} = (i_1 - i_{41})$ — необходимая холодопроизводительность для оживания кислорода в изобарном процессе.

Остальные обозначения соответствуют указанному в пояснении к выражению (1).

Из сравнения значений Кж, описываемых формулами (1) и (2), видно, что выход кислорода в ВРУ с ДКА будет выше из-за дополнительного дроссель-эффекта $\Delta i'_r$ и возрастания холодопроизводительности детандерной ступени, равной $VD\Delta i'_s \eta_s$.

Расчёты характеристик ВРУ проводили, исходя из обеспечения наибольшего выхода жидкого кислорода. При этом варьировался отбор воздуха для подачи в ДКА и оптимизировалась его температура на входе в

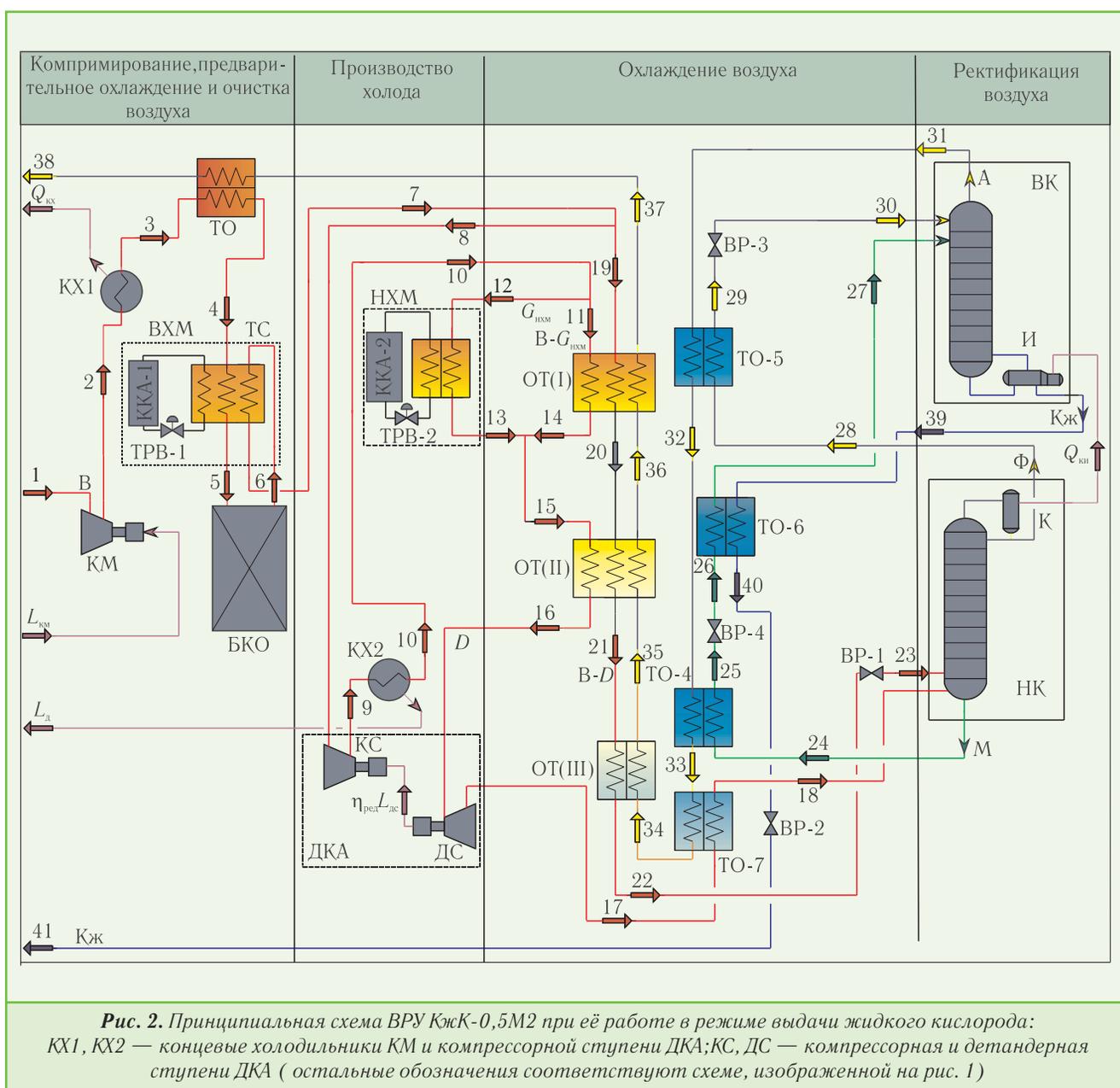
ДС. Таким образом, стремились к $K_{ж}=\max$ при $G_{КС}=G_{ДС}=DB=\text{var}$ и $T_{16}=\text{var}$. Принималось, что установка выдаёт производный жидкий технический кислород с чистотой 99,7 %.

В ходе расчётов было замечено, что рост расхода через ДКА увеличивает нагрузку на первую секцию основного теплообменника ОТ(I) таким образом, что не выполняется условие реализуемости теплообмена в $Q-T$ -диаграмме. Чтобы снизить нагрузку на обратный поток отбросного азота в ОТ(I), применяли дополнительное охлаждение части потока после КС в НХМ. Расход через НХМ подбирали так, чтобы выполнялись несколько условий: $G_{НХМ}=\text{var}$, $\Delta T_{\min} \geq 5\text{K}$, $\Delta T_{7-37} \approx 15\text{K}$. Под ΔT_{\min} понимается разность температур в самом напряженном для теплообмена сечении

основного теплообменника.

Последовательность расчётов можно проиллюстрировать с помощью блок-схемы, которая даёт представление об основных операциях, обеспечивающих эффективное использование в ВРУ детандер-компрессорного агрегата (рис. 3).

Расчёты показали (см. табл. 2), что расход воздуха через ДКА должен отвечать допустимой его температуре перед ДС и реализуемости теплообмена во всех секциях основного теплообменника, и, особенно, в его секции ТО(III), где проходит охлаждение воздуха, поступающего затем на дросселирование. Характер процессов теплообмена в $Q-T$ -диаграмме показан на рис. 4. Принималось, что доля отбора воздуха на ДКА составляет 0,75.



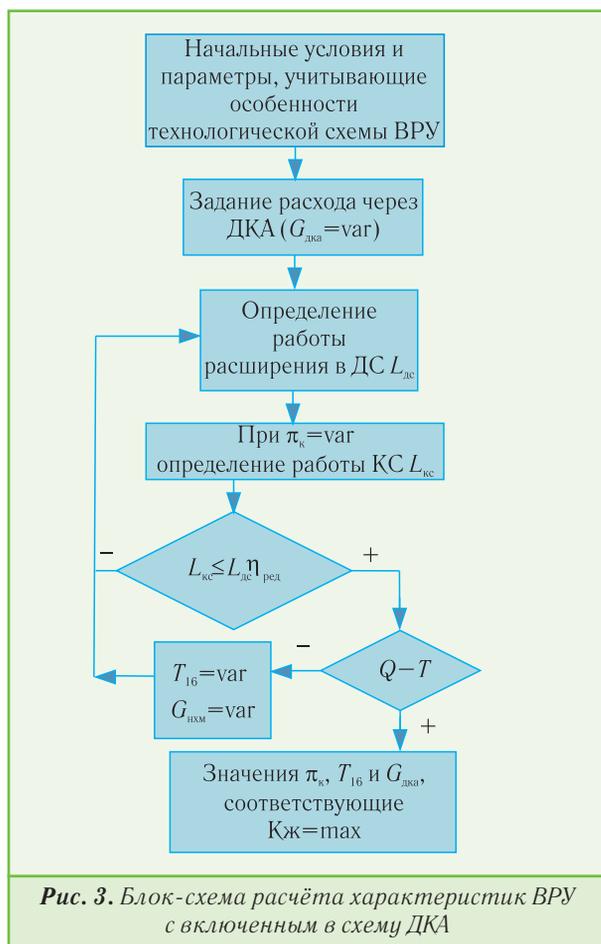


Рис. 3. Блок-схема расчёта характеристик ВРУ с включенным в схему ДКА

Таблица 2. Расчётные показатели ВРУ КжК-0,5М2 с ДКА

$G_{кc} = G_{дc}$, кг/ч (% п.в.)	3091 (78)	3091 (78)	3091 (78)	2973 (75)
T_{15} , К	215	207	204	213
$L_{дc} \eta_{ред} = L_{кc}$, кВт	57,1	54,2	52,4	54,8
$G_{нхм}$, кг/ч (% п.в.)	0	793 (20)	1050 (26,5)	750 (19)
$Q_{нхм}$, кВт	0	12,9	17,1	12,3
$P_{кc}$, МПа	11,3	11	10,8	11,3
$\pi_{кc}$	1,746	1,700	1,676	1,746
$y_{дc}$, %	9,53	7,49	6,72	7,02
Кж, кг/ч	599,5	674,9	703,0	692,2
ΔT_{7-37} , К	15,1	15,3	15,7	15,2
l , кВтч/кг	1,14*	1,05	1	1,02

Примечание: *) Оценка потребляемой мощности проводилась при отключенной НХМ.

Процессы в узле ректификации не претерпевают изменений по отношению к ранее рассмотренной схеме. Таким образом, добиваясь в ДС расширения воздуха до его двухфазного состояния, когда поток имеет 2-3 % жидкости, удалось получить наилучшие показатели по производительности и эффективности цикла ($l=1$ кВтч/кг).

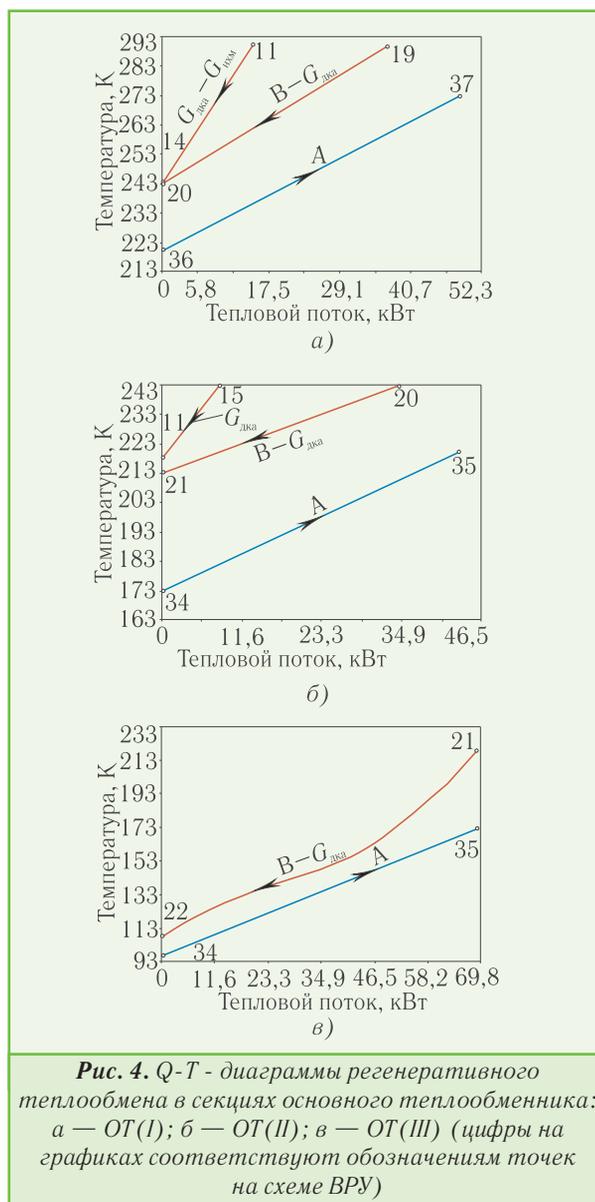


Рис. 4. Q-T - диаграммы регенеративного теплообмена в секциях основного теплообменника: а — ОТ(I); б — ОТ(II); в — ОТ(III) (цифры на графиках соответствуют обозначениям точек на схеме ВРУ)

4. ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ДКА ДЛЯ ВРУ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ

В ВРУ КжК-0,5М1 работа детандера преобразовывалась в масляном тормозе в тепло, которое отводилось в окружающую среду в охладителе масла.

В схему ВРУ КжК-0,5М2 (см. рис. 2) включен детандер-компрессорный агрегат. В нем предполагается работу расширения воздуха детандерной ступени использовать для его дожатия в компрессорной ступени, механически связанной с ДС. Это, как уже отмечалось, позволит повысить давление перед ДС и увеличить в результате холодопроизводительность цикла.

Однако создание эффективного ДКА для малотоннажной ВРУ среднего давления представляет собой достаточно сложную проблему. Обусловлено это тем, что детандер в таких ВРУ является высокооборотной расширительной машиной. В некоторых установках число оборотов рабочего колеса (РК) детандера достигает 200 тыс. мин⁻¹. Из-за этого невозможно создать ДКА одновальнoй конструкции, так как

при этих оборотах КС будет иметь очень низкий адиабатный КПД. Этим объясняется то, что для ВРУ рассматриваемого типа не удалось создать ДКА с приемлемыми характеристиками. Известны лишь разработки ДКА для таких ВРУ с КС, представляющей собой газовый тормоз как альтернативу масляному тормозу.

В одновальном ДКА при высоких оборотах КС растут скорости потоков в нём и, как следствие, число Маха M . При числе $M > 1$ появляются дополнительные сопротивления, вызванные возникновением возмущающих волн или скачков уплотнения. Результатом является отрыв потока из-за неустойчивости течения и переход к дозвуковым скоростям при $M > 1$. Скачки уплотнения, вызывая необратимое преобразование кинетической энергии воздуха в теплоту, представляют собой источник, свойственный только сверхзвуковым потокам волнового сопротивления. Это явление вызывает рост гидравлических потерь в проточной части КС и, в итоге, снижает её эффективность.

Анализ показывает, что достаточно эффективный ДКА можно создать на основе редукторной схемы. ДКА будет иметь двухвальную конструкцию, согласно [12]. Это позволит снизить число оборотов вала компрессорной ступени до оптимального значения.

Поэтому при разработке двухвального ДКА следует определить рациональное передаточное число. Если оно лежит в пределах 7-ми, то редуктор будет представлять собой одноступенчатую конструкцию, выполненную по типу шевронной ступени с двумя противоположно направленными косозубыми зацеплениями. Зубья шестерён и ведомых колес изготавливают по 2-3 степени точности с химико-термической обработкой (азотированием). На рис. 5 показано, как будет выглядеть редукторный ДКА с детандерной и компрессорной ступенями. Для отделения горячей части (компрессорной) от холодной части (детандерной) агрегата последнюю помещают в теплоизолированный кожух блока разделения.

В качестве редуктора в двухвальном ДКА можно применить редуктор фирмы «Lufkin» (рис. 6), называемый турборедуктором. Он представляет собой устройство, работающее в режиме высокой скоростной нагрузки. Диапазон частот вращения валов-шестерней турборедуктора — 15-90 тыс. мин⁻¹.

Выполним оценку эффективности ДКА с указанным турборедуктором. Нужно учитывать, что производимая детандерной ступенью мощность частично поглощается в нём парами подшипников на валах КС и ДС, а также парой колесо-шестерня. Общая эффективность детандер-компрессорного агрегата предлагаемой конструкции

$$\eta_{\text{дка}} = \eta_{\text{дс}} \eta_{\text{кс}} \eta_{\text{ред}},$$

где $\eta_{\text{дка}}$, $\eta_{\text{дс}}$, $\eta_{\text{кс}}$, $\eta_{\text{ред}}$ — КПД агрегата, детандерной и компрессорной ступеней, турборедуктора.

Потеря в турборедукторе составляет в среднем 2 %. Если принять, что адиабатный КПД КС $\eta_{\text{кс}} = 0,75$, изоэнтальпийный КПД ДС $\eta_{\text{дс}} = 0,80$, то $\eta_{\text{дка}} = 0,80 \cdot 0,75 \cdot 0,98 = 0,59$. Полученное значение $\eta_{\text{дка}}$ существенно превы-

шает его величину для одновальных конструкций ДКА ВРУ среднего давления, в которых общий КПД оказывается низким из-за малой эффективности КС.

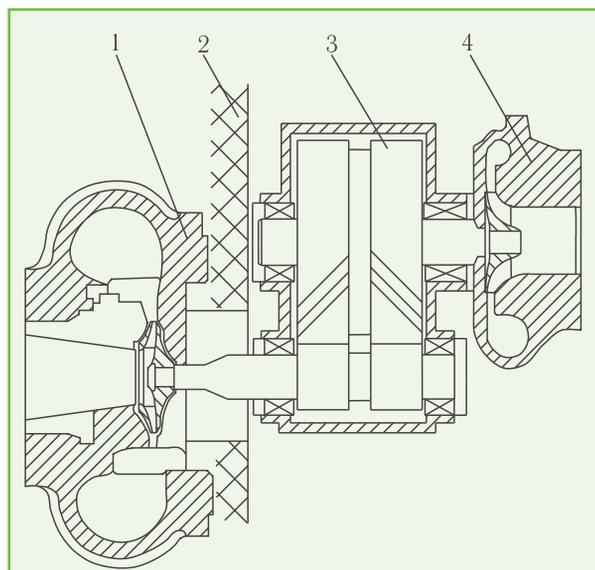


Рис. 5. Редукторный ДКА с размещением детандерной ступени в кожухе холодного блока: 1 — детандерная ступень; 2 — изоляционный слой перлита; 3 — турборедуктор; 4 — компрессорная ступень



Рис. 6. Турборедуктор фирмы «Lufkin»

Достоинством редукторной схемы, таким образом, является возможность обеспечения в ней оптимальной частоты вращения вала КС.

При разработке редукторных ДКА нужно обратить внимание на предельно допустимые степени повышения давления $\pi_{\text{кс}}$ в компрессорной ступени. Это обусловлено тем, что современные материалы, из которых изготавливают РК центробежных компрессоров, допускают окружные скорости до 500 м/с. В реальных конструкциях они не превышают 400 м/с [13]. При использовании этого ограничения с достаточной степенью точности значение $\pi_{\text{кс}}$ можно определить, воспользовавшись зависимостью:

$$\pi_{\text{кс}} = \left(1 + \frac{k-1}{\eta_{\text{пол}}} \psi M_u^2 \right)^{k \eta_{\text{пол}} / (k-1)}, \quad (3)$$

где k — показатель адиабаты; ψ — коэффициент на-

пора; $M_u = u_D/a_n$ — число Маха; $\eta_{пол}$ — политропный КПД ступени; $a_n = (kRT_n)^{1/2}$ — скорость звука при начальных условиях; R — газовая постоянная; T_n — начальная температура.

Уравнение (3) устанавливает взаимосвязь между степенью повышения давления в КС и величинами, характеризующими условия её работы (ψ, u_D), а также свойства сжимаемой среды (k, R, a_n).

Для проведения расчёта по зависимости (3) примем: $\psi = 0,5$, $\eta_{пол} = 0,8$, $u_D = 400$ м/с. Подставив эти параметры в (3), получим максимально достижимое значение степени повышения давления в одной центробежной ступени $\pi_{кс} = 2,1$.

Нужно обратить внимание на то, что приводимые $\pi_{кс}$ в табл. 2, в среднем достигают 1,72. Следовательно, полученные в расчётах ВРУ КЖК-0,5М2 значения $\pi_{кс}$ и давления конца сжатия $P_{кс}$ можно признать вполне достижимыми.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показал, что в существующих жидкостных установках среднего давления и относительно невысокой тоннажности имеются резервы для повышения их эффективности. Один из таких резервов — использование в ВРУ эффективных ДКА.

При их создании нужно решить ряд сформулированных в настоящей статье задач. Показано, что имеются все условия для разработки ДКА с турборедуктором.

Реализация предложенной схемы ВРУ с ДКА увеличит выход жидкого кислорода на 1,7 т в сутки при снижении удельных затрат на его производство с 1,12 до 1 кВтч/кг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Криогенные системы: В 2 т. Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем/ **А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др.** — М.: Машиностроение, 1999. — 720 с.

2. **Смирнов А.В., Гринь Н.П., Наталуха Ю.Б.** Разра-

ботка поршневого компрессора блочной конструкции 4ВМ10-55/71М1 для воздухоразделительных установок среднего давления// Технические газы. — 2010. — № 6. — С.31-35.

3. **Наталуха Ю.Б., Смирнов А.В., Фесенко В.Н.** Совершенствование параметров поршневых компрессоров на оппозитной базе 4М10 для ВРУ среднего давления// Технические газы. — 2011. — № 6 — С. 28-32.

4. **Горенштейн И.В., Лавренченко Г.К.** Анализ способов увеличения выхода жидких продуктов в воздухоразделительных установках среднего давления// Технические газы. — 2003. — №3. — С.33-37.

5. **Peng D.Y., Robinson D.B.** A new two constant equation of state// Ind. Eng. Chem. Fundamen. — 1976. — V.15. — P.59-64.

6. **Strjcek R., Vera J.H.** PRSV: An improved Peng-Robinson equation of state for pure components and mixtures// The Canadian J. of Chemical Eng. — 1986. — V. 64. — P.323-333.

7. **Пуртов С.Н., Ляпин А.И., Лебедев Л.Б.** Совершенствование программного обеспечения HYSYS для использования в расчетах криогенных установок// Технические газы. — 2006. — № 5 — С. 58-61.

8. **Горенштейн И.В.** Анализ нестационарных процессов в системе температурной стабилизации воздухоразделительных установок// Технические газы. — 2002. — № 2. — С. 28-32.

9. **Наринский Г.Б.** Ректификация воздуха. — М.: Машиностроение, 1978. — 248 с.

10. **Герш С.Я.** Эффективные циклы глубокого охлаждения и новые принципы разделения воздуха. — М.: Гос. научно-техн. изд-во машиностр. лит-ры, 1946. — 120 с.

11. **Лавренченко Г.К., Швец С.Г.** Анализ характеристик циклов ожижения воздуха с детандер-компрессорными агрегатами// Технические газы. — 2007. — № 5. — С. 22-29.

12. **Лавренченко Г.К., Швец С.Г.** Исследование возможностей эффективного использования детандер-компрессорных агрегатов в криогенных установках среднего давления// Технические газы. — 2009. — № 3. — С. 12-17.

13. **Епифанова В.И.** Компрессорные и расширительные турбомашин радиального типа. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. — 624 с.