

Г.К. Лавренченко, А.В. Плесной

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

e-mail: lavrenchenko@paco.net

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДЕТАНДЕР-КОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА С ДВУМЯ СТУПЕНЯМИ РАСШИРЕНИЯ В СОСТАВЕ ВРУ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ

Рост тарифов на электроэнергию делает актуальным снижение удельных затрат энергии на производство жидких продуктов разделения воздуха. В связи с этим при разработке новых воздуходелительных установок (ВРУ) стремятся выявить и использовать возможные резервы повышения их эффективности. Показано, что удельные затраты на производство жидкого кислорода в ВРУ среднего давления можно существенно снизить за счет применения в установках многовальных детандер-компрессорных агрегатов (ДКА) с двумя ступенями расширения воздуха. Сравнение таких установок, содержащих ДКА, с известной ВРУ показало, что удельные затраты энергии могут быть уменьшены в них с 1,12 до 0,94 кВтч/кг жидкого кислорода.

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

G.K. Lavrenchenko, A.V. Plesnoy

RESEARCH OF WORK EXPANDER-COMPRESSOR UNITS WITH TWO STAGES EXTENSIONS IN COMPOSITION MEDIUM PRESSURE ASU

Growth of electricity tariffs makes actual decrease in specific expenses of energy on the production of liquid air separation products. In this regard, when developing new air separation unit (ASU) seek reveal and use possible reserves of increasing their effectiveness. It is shown that specific expenses for the production of liquid oxygen in the ASU medium pressure can be significantly reduced by the use of multi-shaft unit's expander-compressor unit (ECU) with two stages air expansion. Comparison of such installations containing ECU with a known ASU showed that specific expenses of energy can be reduced in them from 1,12 to 0,94 kWh / kg of liquid oxygen.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Производство жидких продуктов с низкими удельными затратами позволяет расширить зону обеспечения этими газами различных потребителей. При наличии жидких O₂ и N₂ можно создавать на местах газификационные установки, которые будут регулярно обеспечиваться жидкими криопродуктами от ВРУ.

Ранее выполненный анализ [1] показал, что за счет разработки новых ВРУ на основе детандер-компрессорных агрегатов (ДКА) можно повысить выход жидкого кислорода. Применение в ДКА редукторной схемы позволяет отказаться от одновальной конструкции агрегата, тем самым обеспечив эффективную работу компрессорной ступени (КС) и в целом ДКА.

Проведенные расчёты выявили скрытые резервы

повышения холодопроизводительности ВРУ, имеющей в составе ДКА с детандерной и компрессорной ступенями. В настоящей статье рассмотрим применение в ВРУ новых ДКА с двумя ступенями расширения, в которых обеспечиваются оптимальные обороты каждой ступени. В первом схемном решении будет использоваться метод, согласно которому часть потока перерабатываемого воздуха (п.в.) поступает в верхнюю колонну без предварительного разделения [2]. Эту установку обозначим через КжК-0,5М3. Во втором схемном решении будет применен цикл, приведенный в [3]. В нем через детандерные ступени ДКА проходит один и тот же поток п.в., который весь направляется на предварительное разделение в нижнюю колонну. Данное схемное решение будем обозначать как КжК-0,5М4.

2. АНАЛИЗ СХЕМЫ ВРУ КЖК-0,5М3 С ДВУХСТУПЕНЧАТЫМ РАСШИРЕНИЕМ ВОЗДУХА

В [2] отмечается, что существует возможность снижения расхода энергии на выработку продуктов разделения воздуха путем введения части потока воздуха, имеющего температуру конденсации, в верхнюю колонну (ВК) без предварительного разделения в нижней колонне (НК). Такое решение позволяло снизить давление прямого потока воздуха и реализовать процесс разделения при пониженном давлении. Данный способ особенно эффективен в ВРУ низкого давления при извлечении газообразного технологического кислорода.

Для определения характеристик ВРУ среднего давления возьмем за основу установку, приведенную в [1]. В ходе расчетов примем, что основной компрессор и вспомогательные аппараты установки остаются прежними. Изменения претерпевают основной теп-

лообменник и колонна двукратной ректификации.

Установка КжК-0,5М3 (рис.1) комплектуется поршневым компрессором 4ВМ10-55/71 с приводом от синхронного электродвигателя. Поток воздуха 1 в количестве 3963 кг/ч (3300 нм³/ч) сжимается в компрессоре КМ до номинального давления 6,98 МПа, 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 холодную часть установки воздух охлаждают в теплообменнике-стабилизаторе. После этого воздух с температурой 290 К и давлением 6,48 МПа (потери давления в прямом потоке приняты согласно [4,5]) разделяется на две части. Одна из них с параметрами 10 направляется в первую секцию основного теплообменника ОТ(1), где охлаждается движущимся в нём противотоком отбросным азотом. Вторая часть (см. т. 8) охлаждается в НХМ до температуры 243К. Далее оба потока объединяются в по-

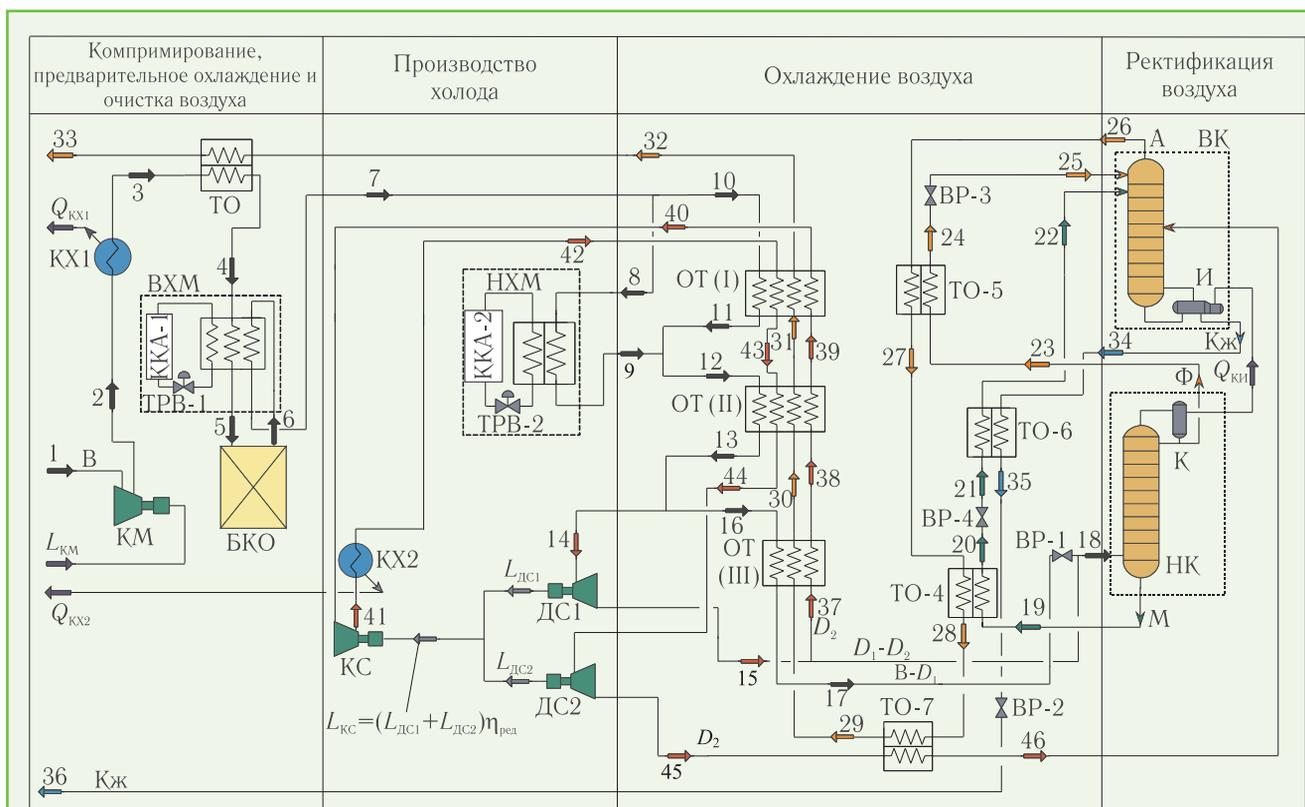


Рис. 1. Принципиальная схема КжК-0,5М3: КМ, КХ1 — компрессор и его концевой холодильник; ТО — теплообменник-ожижитель; ТС — теплообменник-стабилизатор; БКО — блок комплексной очистки воздуха; ВХМ, НХМ — высоко- и низкотемпературные холодильные машины; ККА-1, ККА-2 — компрессорно-конденсаторные агрегаты; ТРВ-1, ТРВ-2 — терморегулирующие вентили; ОТ (I, II, III) — секции основного теплообменника; ДС1, ДС2 — детандерные ступени ДКА; 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; КС — компрессорная ступень ДКА; ДС1, ДС2 — детандерные ступени высокого и низкого давления; В, А, Кж, $G_{НХМ}$, D, M, Ф — потоки воздуха после компрессора; отбросного азота; продуccionного жидкого кислорода; охлаждаемого в холодильной машине; воздуха, направляемого в детандер; кубовой жидкости; азотной флегмы; L_{KM} — работа компрессора; Q_{KX1} , Q_{KX2} — теплота компримирования основного компрессора и компрессорной ступени, отводимая в концевых холодильниках; $L_{д}$ — работа расширения детандера

ток 12 и охлаждаются во второй секции ТО (II). Большая часть воздуха в виде потока 14 при температуре отбора отводится на расширение в детандер. Расширенный поток 15 разделяется. Меньшая его часть D_2 нагревается противотоком в основном теплообменнике до температуры поступающего воздуха. После этого подогретый поток сжимается в компрессорной ступени (КС) ДКА, потом охлаждается в конечном холодильнике (КХ2), первой и второй секциях основного теплообменника ТО (I-II) и далее отводится во вторую детандерную ступень (ДС2) на расширение. Расширенный поток 45 проходит детандерный теплообменник и в состоянии насыщения поступает в верхнюю колонну. Большая часть воздуха (D_1-D_2) после расширения в ДС1 направляется в нижнюю колонну. Часть воздуха 16 в количестве ($B-D_1$) поступает в третью секцию основного теплообменника ТО (III), в котором охлаждается до температуры 108 К и затем 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 19 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 22 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 производственный жидкий кислород Кж и отбросный азот А.

Поток отбросного азота 26 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, охлаждая при этом прямой поток воздуха, и поступает в теплообменник-ожижитель, после которого его разделяют на две части: одну используют для регенерации адсорберов блока комплексной очистки воздуха, другую — сбрасывают в атмосферу.

Поток жидкого кислорода 34 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 емкость.

Давления в колоннах двукратной ректификации приняты с учётом рекомендаций [4,5], в соответствии с которыми давление в кубе НК — 0,6 МПа, а давление в её верхней части — 0,58 МПа. 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 сопротивле-

нии в верхней колонне 0,02 МПа давление в её испарителе составит 0,155 МПа.

Для приближения энергетических показателей анализируемой установки к реальным условиям работы примем потери от теплопритоков и гидравлических сопротивлений согласно данным [4,6]. Основные показатели анализируемой ВРУ будем рассматривать с учётом её работы в режиме выдачи жидкого кислорода.

В начале расчёта процессов, цикла и технологической схемы ВРУ с ДКА необходимо задаться значением как общего КПД $\eta_{ДКА}$, так и величинами изоэнтропных КПД ДС ($\eta_{ДС1}, \eta_{ДС2}$), КС ($\eta_{КС}$) и редуктора $\eta_{ред}$.

Используемый ДКА на основе турборедуктора несколько снижает передаваемую работу расширения с двух детандерных ступеней на компрессорную из-за её потерь в самом передаточном механизме. Рассмотрим, как влияет КПД редуктора на эффективность передачи мощности, подводимой к компрессорной ступени. Каждая из пар подшипников, показанных на схеме (рис. 2), снижает передаваемую мощность на 2 %. Пара колесо-шестерня также уменьшает передаваемую мощность, но на 3 %. Принимая это во внимание, получим КПД турборедуктора

$$\eta_{ред} = \prod_{i=1}^3 \eta_{подш}^{(i)} \prod_{k=1}^2 \eta_{пары}^{(k)} = 0,89. \quad (1)$$

Полученное значение $\eta_{ред}$ показывает, что при расчёте передаваемой работы расширения от детандерных ступеней к компрессорной следует учитывать её снижение на 11 %.

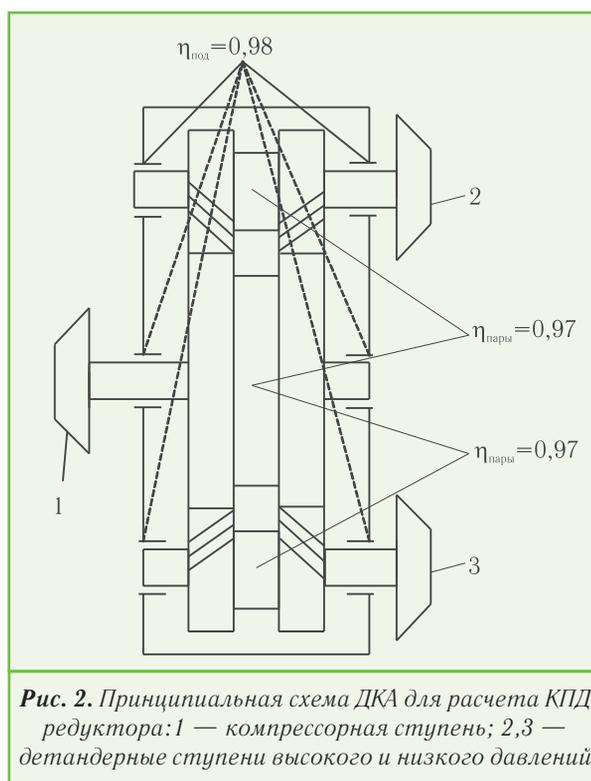


Рис. 2. Принципиальная схема ДКА для расчета КПД редуктора: 1 — компрессорная ступень; 2,3 — детандерные ступени высокого и низкого давлений

Таким образом при использовании турборедуктора в конструкции ДКА

$$\eta_{ДКА} = \eta_{ДС1}\eta_{ДС2}\eta_{КС}\eta_{ред} = 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 0,89 = 0,43, \quad (2)$$

где $\eta_{ДС1}$, $\eta_{ДС2}$, $\eta_{КС}$ — КПД детандеров высокого и низкого давлений, а также компрессорной ступени; $\eta_{ред}$ — КПД редуктора.

Определим, каков может быть вклад ДКА, работающего в составе ВРУ, схема которой изображена на рис. 1, в холодопроизводительность цикла. Из баланса холодной части ВРУ получим:

$$V(i_1 - i_7) + Bd(i_8 - i_9) + BD_2(i_{40} - i_{42}) + BD_1(i_{14} - i_{15}) + BD_2(i_{44} - i_{45}) = A(i_1 - i_{32}) + Kж(i_1 - i_{36}) + Q_{тн}, \quad (3)$$

где V , A , $Kж$, d , D_1 , D_2 — расходы воздуха; отбросного азота; продукционного кислорода; части воздуха, охлаждаемого в холодильной машине; расходы через первую и вторую детандерные ступени; $Q_{тн}$ — теплоприток к холодной части ВРУ.

Из (3) найдем, что количество производимого жидкого кислорода

$$Kж = (1/\Delta i_{Кж}) [V(i_1 - i_7) + BD_2\Delta i_{т'к} + Bd(i_8 - i_9) + BD_1\Delta i_s\eta_{ДС1} + BD_2\Delta i_s'\eta_{ДС2} - A(i_1 - i_{32}) - Q_{тн}], \quad (4)$$

где $(i_1 - i_7) = [(i_1 - i_3) + (i_3 - i_4) + (i_4 - i_7)]$ — удельная холодопроизводительность, представляющая сумму интегрального изотермического дроссель-эффекта ($i_1 - i_3$); охлаждения прямого потока в теплообменнике-ожижителе ($i_3 - i_4$) и охлаждения в теплообменнике-стабилизаторе ВХМ ($i_4 - i_7$); d , D_1 , D_2 — доли воздуха, направляемые в НХМ и детандерные ступени высокого и низкого давлений; $BD_1\Delta i_s\eta_{ДС1}$, $BD_2\Delta i_s'\eta_{ДС2}$ — холодопроизводительности детандерных ступеней высокого и низкого давлений; $BD_2\Delta i_{т'к}$ — изотермический дроссель-эффект, обусловленный повышением давления части воздуха в КС агрегата и его последующим охлаждением в конечном холодильнике до температуры окружающей среды $T_{о.с.}$; $Bd(i_8 - i_9)$ — количество холода для охлаждения воздуха в НХМ; $A(i_1 - i_{32})$ — потеря от недорекуперации потока азота на тепло конце теплообменника-ожижителя ТО, так как $(i_1 - i_{32}) = [(i_1 - i_{33}) + (i_3 - i_{41})]$; $Q_{тн}$ — общий теплоприток к холодной части ВРУ; $\Delta i_{Кж} = (i_1 - i_{36})$ — разность энтальпий, характеризующая удельную холодопроизводительность, необходимую для ожижения кислорода в изобарическом процессе.

Выражение (4) показывает, что холодопроизводительность цикла зависит от расхода D_2 через вторую детандерную ступень ДС2: чем больше отбор воздуха на детандерную ступень, тем выше прирост холодопроизводительности цикла установки.

Для наглядности процессы, реализуемые в ДКА, представлены в T - s -диаграмме (рис. 3).

Расчёт показателей ВРУ производился в среде HYSYS в соответствии с алгоритмом расчёта, приведенным на рис. 4. Из блок-схемы видно, что, предварительно задавшись расходом D_2 , определяли степень повышения давления в КС и температуры отбора на

ДС1 и ДС2. Разность температур между потоком отбросного азота и поступающего в холодную часть воздуха поддерживалась на уровне $\Delta T_{7,32} \approx 15$ К. Это необходимо для обеспечения нормальной работы теплообменника-ожижителя. Температура поступающего в него отбросного азота должна быть положительной (1...3 °С) во избежание вымерзания влаги при охлаждении воздуха среднего давления.

На первом этапе важным является расчетное достижение чистоты продукционного кислорода на уровне 99 %. На втором этапе регулируются параметры блока разделения, где с целью повышения качества отводимого продукта изменяется число теоретических тарелок (ЧТТ) и определяются номера тарелок питания для потока кубовой жидкости (№ ТП_М) и детандерного потока (№ ТП_{Д2}).

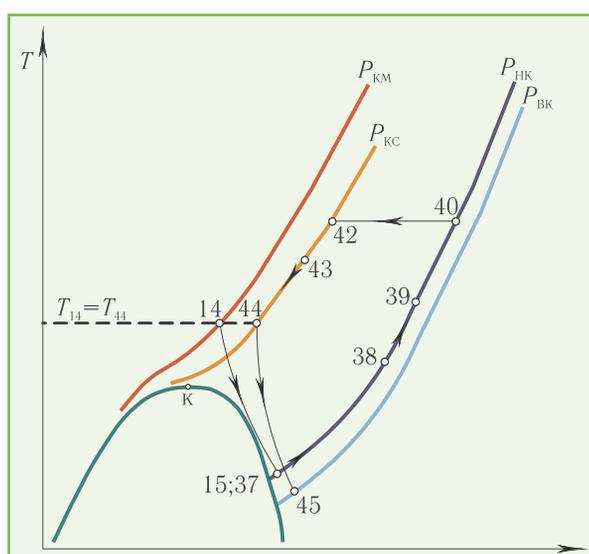


Рис. 3. Процессы, протекающие в ДКА: P_{KM} — давление п.в., поступающего в холодную часть ВРУ; $P_{КС}$ — давление воздуха, сжимаемого в КС; $P_{НК}$, $P_{ВК}$ — давления в нижней и верхней колоннах; 14, 15 и т.д. — узловые точки, соответствующие обозначениям на схеме (рис. 1)

Дополнительное условие налагает баланс работ в ДКА с учётом передачи её от двух детандеров к компрессорной ступени. Для упрощения расчёта расход через ДС1 задается равным 75 % п.в., температуры отбора на детандерные ступени приняты равными, т.е. $T_{14} = T_{44}$ (см. рис. 3). Далее, пользуясь выражением для адиабатной работы сжатия

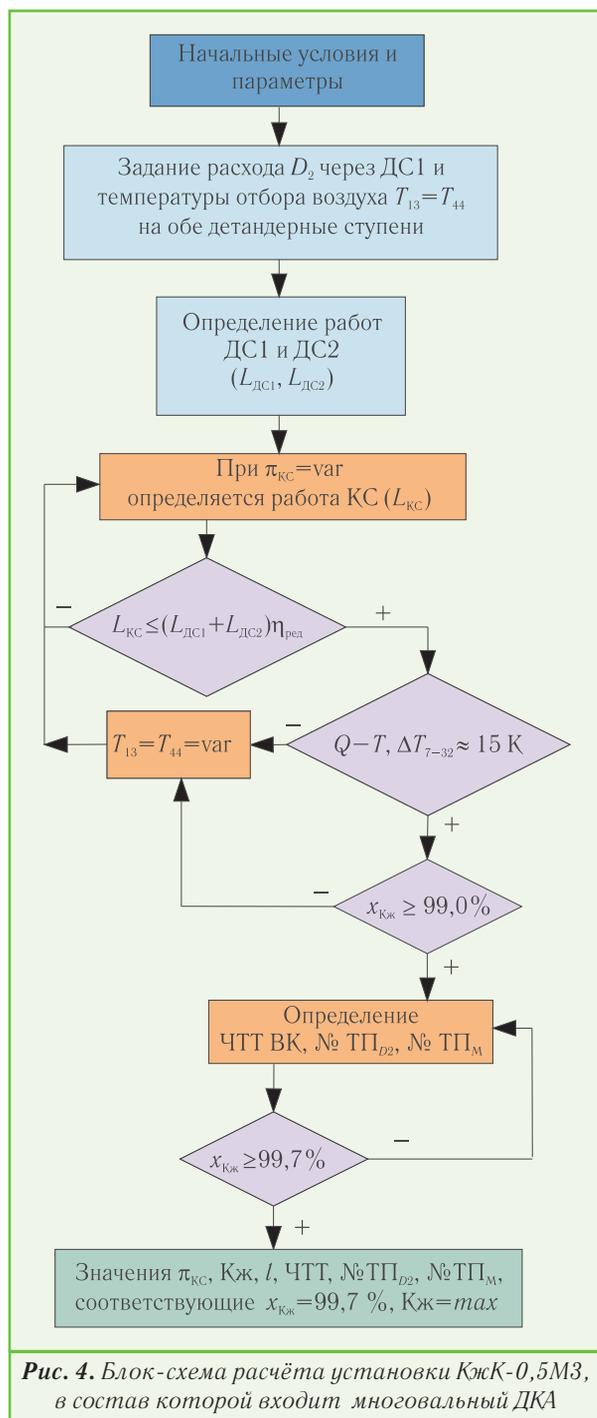
$$L_{КС} = aD_2T[\pi_{КС}^b - 1], \quad (5)$$

определяем степень повышения давления таким образом, чтобы удовлетворялось условие:

$$L_{КС} = (L_{ДС1} + L_{ДС2})\eta_{ред}, \quad (6)$$

где $a = Rb/\eta_{КС}$; $b = (k-1)/k$; R — универсальная газовая постоянная, кДж/кг К; k — показатель адиабаты;

$\pi_{КС} = P_{42}/P_{40}$ — степень повышения давления; T — температура воздуха на всасывании в КС.



На основе указанного алгоритма расчёта определены параметры ВРУ КжК-0,5МЗ (см. табл. 1.)

Из таблицы видно, что при малых расходах воздуха D_2 достигается высокая степень повышения давления КС в компрессорной ступени. Это требует при использовании центробежных компрессоров переходить к многоступенчатому сжатию воздуха. Ограничение на величину КС в центробежной ступени связано с максимально допустимым значением окружной скорости рабочего колеса u_d . Материалы, из которых изготавливают рабочие колеса центробежных компрес-

соров, допускают окружные скорости до 500 м/с, но в реальных конструкциях их ограничивают значениями 350-400 м/с. Согласно [3] при повышении КС существенно увеличивается число Маха M_u . При $M_u \geq 1$ появляется дополнительное сопротивление, вызванное возникновением скачков уплотнения и отрыва потока. Такое явление очень нежелательно, так как приводит к росту гидравлических сопротивлений ступени и снижению эффективности процесса сжатия.

Расчёт показал, что в одной ступени сжатия КС степень повышения давления не должна превышать 1,9. В условиях многоступенчатого сжатия при $\pi_{КС} = 3-5$ следует проводить межступенчатое охлаждение с целью приближения процесса компримирования к изотермическому.

Организация работы ДКА, согласно схеме (см. рис. 1), тесно связана с процессами разделения в аппарате двукратной ректификации. Расширение части потока воздуха D_2 в верхнюю колонну ведёт к изменению концентраций компонентов по высоте колонны. Распределение потоков в колонне двукратной ректификации схематически представлено на рис. 5.

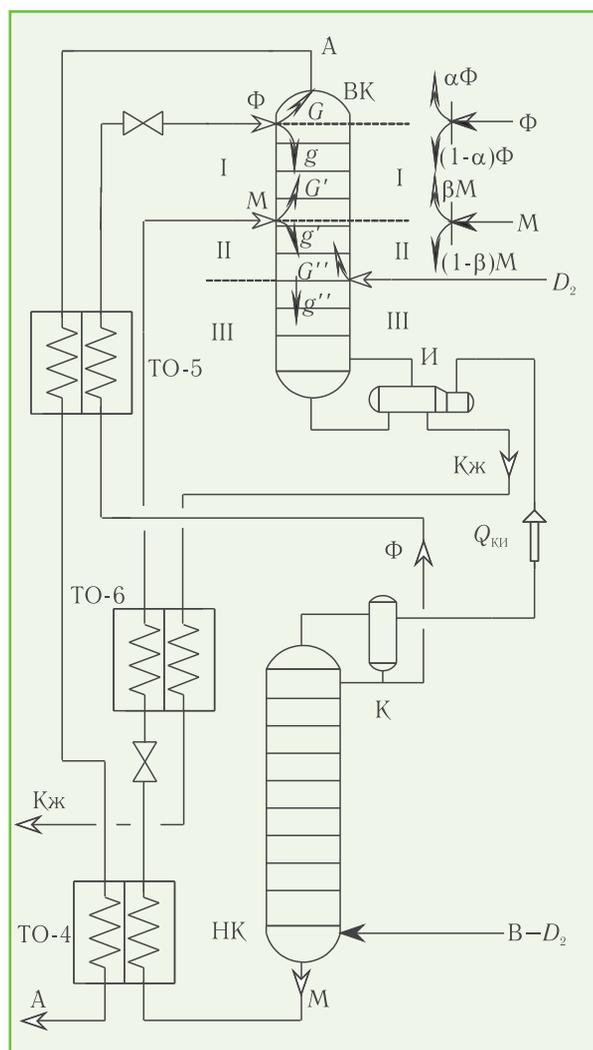


Рис. 5. Расчётная схема процесса ректификации в верхней колонне: I-I, II-II, III-III — секции верхней колонны; $G, g; G', g'; G'', g''$ — расходы пара и жидкости в секциях колонны; α, β — доли пара в потоке азотной флегмы и кубовой жидкости

Таблица 1. Параметры ВРУ КжК-0,5МЗ при различных расходах воздуха, вводимого в верхнюю колонну блока разделения

Параметр	Величина						
	792(20)	872 (22)	954(24)	990 (25)	1030 (26)	1100 (28)	1200 (30)
D_2 , кг/ч (%)	792(20)	872 (22)	954(24)	990 (25)	1030 (26)	1100 (28)	1200 (30)
ΔT_{7-32} , К	14,8	14,9	15,1	14,3	14,7	14,5	14,6
$L_{ДС1}$, кВт	51,0	50,6	50,2	49,7	49,3	48,3	48,4
$L_{ДС2}$, кВт	19,0	20,6	22,1	22,7	23,4	24,6	26,3
$T_{13}=T_{44}$, К	201	200	199	198	197	196	195
$\pi_{КС}$	7,07	6,28	5,56	5,39	5,15	4,79	4,40
P_{41} , МПа	4,24	3,77	3,33	3,24	3,09	2,87	2,64
y_A , % O_2	7,44	7,21	7,0	6,92	6,75	6,59	6,49
x_M , % O_2	33,4	33,2	32,9	32,8	32,6	32,4	32,1
x_Φ , % O_2	2,79	3,83	5,71	5,8	5,96	6,85	8,07
ЧТГ ВК/НК	32/19	35/19	39/19	40/19	44/19	55/19	87/19
№ ТП _М	4	4	4	5	6	7	7
№ ТП _{Д₂}	22	22	23	24	26	28	36
l , кВтч/кг	1,06	1,04	1,03	1,03	1,02	1,01	1
Кж, кг/ч	644	653	659	665	672	678	682

Примечание: В указанных режимах НХМ не использовалась, а потому её мощность не учитывалась.

3. ДКА И ЕГО КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Выбор различных расчётных величин и конструктивных соотношений при расчете и проектировании как отдельных турбодетандеров, так и ДКА, объединяющих эти две машины, не может быть произвольным. При формировании исходных данных необходимо учитывать не только современные рекомендации, но и новые применяемые формы проточных частей компрессорной и детандерной ступеней.

Агрегат, изображенный на рис. 6, представляет собой ДКА, созданный для условий цикла среднего давления, в котором детандерные ступени высокого и низкого давлений работают с большими степенями расширения и предельными значениями изоэнтропных КПД. Компрессорная ступень в ДКА такого типа имеет оптимальное число оборотов, обеспечивающих максимальную степень повышения давления перед детандерной ступенью низкого давления, которая затем расширяет поджатый поток после КС до давления верхней колонны.

Обычно при разработке ДКА для криогенной ВРУ пытаются найти соотношение между относительной простотой конструкции и такими показателями, как технологичность агрегата и его эффективность. Компромиссное решение, описанное в [3], указывает на целесообразность усложнения конструкции агрегата за счёт применения редукторной схемы. Использование многовалвных турбоагрегатов позволит обеспечить оптимальные числа оборотов как детандерных ступеней, так и компрессорных в условиях поддержания максимального КПД, а также выполнения монтажных условий отделения теплой части (компрессор-

ной) от холодной (детандерной) путем помещения последней в теплоизолированный кожух блока разделения (рис. 6).

Проектирование ДКА на основе редукторной схемы влечёт за собой обязательное выполнение ряда требований, присущих современным машинам динамического действия, таких как компактность, размещение агрегата на одной жесткой раме и с максимальной степенью заводской готовности. Также необходимо учитывать возможность регулирования расходов через ступени ДКА при изменении режимов работы ВРУ.

Условия работы двух детандеров и соединенного с ним посредством редуктора компрессора будут определяться оптимальным передаточным числом.

Редуктор должен содержать шевронные ступени с двумя противоположно направленными косозубыми зацеплениями. Зубья шестерён и ведомых колес изготавливают по 2-ой или 3-ей степеням точности с обязательным азотированием.

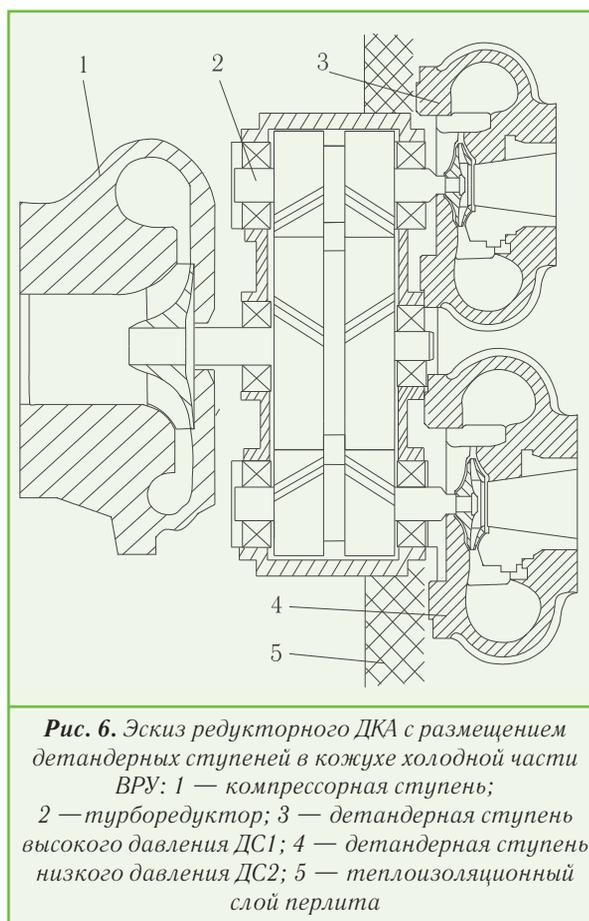


Рис. 6. Эскиз редукторного ДКА с размещением детандерных ступеней в кожухе холодной части ВРУ: 1 — компрессорная ступень; 2 — турборедуктор; 3 — детандерная ступень высокого давления ДС1; 4 — детандерная ступень низкого давления ДС2; 5 — теплоизоляционный слой перлита

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРУ С МНГОВАЛЬНЫМ ДКА И ВВЕДЕНИЕМ ВСЕГО РАСШИРЯЕМОГО ВОЗДУХА В НИЖНЮЮ КОЛОННУ

Рассмотрим работу воздуходелительной установки КжК-0,5М4, в которой в первой детандерной ступени ДС1 воздух расширяется до промежуточного давления, а во второй ступени ДС2 поджатый в КС поток — до давления нижней колонны. Её схема приведена на рис. 7. Из сравнения её со схемой установки КжК-0,5М3 можно заметить, что в обеих установках используются одни и те же элементы и узлы. Однако их работа в составе рассматриваемой ВРУ организована по-другому.

При расчётах рассматриваемой ВРУ с другой организацией потоков ДКА поддерживалась, как и в предыдущей ВРУ, разность температур на теплом конце ТО(І) между потоком поступающего воздуха и отбросного азота на уровне 15К. Диапазон возможных расходов воздуха через ДКА с учетом реализуемости теплообмена в рекуперативных теплообменниках составляет 68-76 % п.в.. Оптимальное промежуточное давление после первой ступени расширения равно 4,45 МПа. Температура отбора воздуха на детандер изменялась в зависимости от расхода в ступенях ДКА так, как указано в табл. 2.

В рассматриваемой схеме расходы воздуха через

Таблица 2. Параметры ВРУ КжК-0,5М4 при различных отборах воздуха на ДКА

Параметр	Величина				
$D_1=D_2, \text{кг/ч}$ (%)	2695(68)	2774(70)	2933(72)	2933(74)	3012(76)
$\Delta T_{7-40}, \text{К}$	14,8	14,6	14,4	14,9	14,8
$Q_{\text{НХМ}}, \text{кВт}$	7,24	7,16	7,11	7,08	7,04
$L_{\text{ДС1}}, \text{кВт}$	11,7	11,74	11,71	11,41	11,24
$L_{\text{ДС2}}, \text{кВт}$	58,2	58,04	57,69	55,81	54,77
$T_{13}=T_{21}, \text{К}$	223	218	214	208	203
$\pi_{\text{КС}}$	2,014	1,984	1,931	1,907	1,866
$P_{19}, \text{МПа}$	9,07	8,85	8,69	8,68	8,58
$P_{15}, \text{МПа}$	4,4	4,45	4,5	4,5	4,5
ЧТТ ВК/НК	36/19	33/19	32/19	30/19	29/19
$l, \text{кВтч/кг}$	0,96	0,94	0,95	0,97	0,99
Кж, кг/ч	736,6	753,1	745,6	728,6	712,4

Примечание: В удельных затратах энергии l учитывалась мощность, расходуемая низкотемпературной холодильной машиной.

ступень агрегата одинаковы и весь поток воздуха после второй детандерной ступени поступает в нижнюю колонну.

Анализ зависимости производства Кж от ряда параметров схемы показал, что выход жидкого кислорода может быть увеличен за счёт повышения температуры отбора на обе ступени ДС1 и ДС2 детандер-компрессорного агрегата. Производимый в НХМ

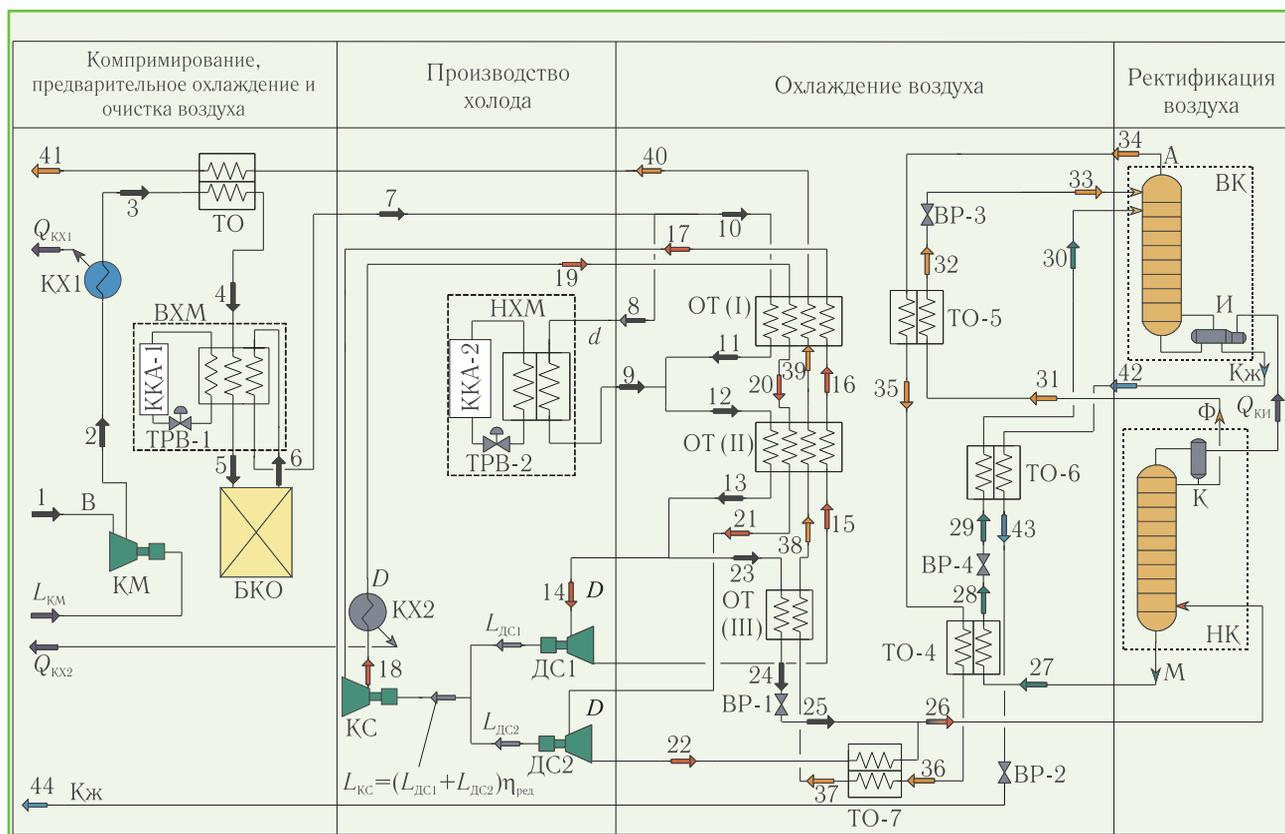


Рис. 7. Принципиальная схема КжК-0,5М4

холод полностью покрывает принятый для расчёта удельный теплоприток 188 Дж/моль (7,14 кВт).

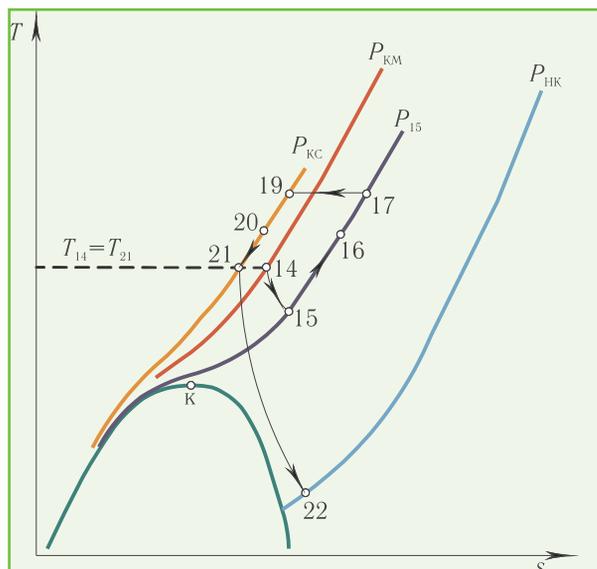


Рис. 8. Процессы, протекающие в ДКА ВРУ КжК-0,5М4: P_{KM} — давление п.в., поступающего в холодную часть ВРУ; P_{KC} — давление воздуха, сжимаемого в КС; P_{HK} — давление в нижней колонне; 14, 15 и т.д. — узловые точки, соответствующие обозначениям на принципиальной схеме установки (рис. 7)

При организации такой работы ДКА удастся повысить холодопроизводительность цикла ВРУ. Кроме этого, появляется возможность обойтись без многоступенчатого сжатия в компрессорной ступени ДКА, так как предельная степень повышения давления в одной ступени $\pi_{KC} = 1,94$ приблизительно соответствует необходимым степеням повышения давления в КС используемого агрегата.

Из табл. 2 следует, что подача всего воздуха, расширяемого последовательно в ДС1 и ДС2 агрегата, в куб нижней колонны блока разделения приводит к меньшим удельным затратам энергии по сравнению с ВРУ КжК-0,5М3. Процессы, реализуемые в ДКА

ВРУ КжК-0,5М4 (см. рис. 8), отличаются от их протекания в ДКА предыдущей установки, что видно из сравнения с рис. 3.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что в существующих жидкостных установках среднего давления имеются резервы для повышения их эффективности. Один из способов — это, как показали исследования характеристик двух ВРУ, использование многоступенчатых детандер-компрессорных агрегатов с двумя ступенями расширения воздуха. Показано, что ВРУ с отбором части воздуха, расширяемого в ДКА, в верхнюю колонну уступает по эффективности ВРУ с подачей всего проходящего через ДКА воздуха в куб нижней колонны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лавренченко Г.К., Плесной А.В. Снижение затрат при производстве жидких продуктов в ВРУ среднего давления с детандер-компрессорным агрегатом // Технические газы. — 2012. — № 5. — С. 21-28.
2. Герш С.Я. Эффективные циклы глубокого охлаждения и новые принципы разделения воздуха. — М.: Машиностроение, 1946. — 120 с.
3. 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.
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. 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.
6. Наринский Г.Б. Ректификация воздуха. — М.: Машиностроение, 1978. — 248 с.

ВТОРОЕ ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ — ЗА 2 ГОДА!

- необходимо наличие законченного высшего инженерно-технического образования;
- обучение в Институте холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского Одесской национальной академии пищевых технологий по направлению Украинской ассоциации производителей технических газов “УА-СИГМА”;
- специальность 7.05060404 “Криогенная техника и технология”;
- форма обучения — заочная контрактная;
- завершение учёбы — сдачей государственного экзамена;
- диплом Министерства образования и науки Украины признается в странах СНГ.

Условия приёма по контактному тел./факсу: +38 (048) 777-00-87