

УДК 621.593

*Г.К. Лавренченко, доктор техн. наук, <sup>2</sup>А.В. Плесной, аспирант*

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

e-mail: lavrenchenko.g.k@mail.ru

ORCID: <sup>1</sup><http://orcid.org/0000-0002-8239-7587>, <sup>2</sup><http://orcid.org/0000-0002-2127-2991>

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЖИДКОСТНОЙ ВРУ СРЕДНЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ С ОДНОВРЕМЕННОЙ РАЗРАБОТКОЙ ЭФФЕКТИВНОГО ДВУХВАЛЬНОГО ДЕТАНДЕР-КОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА

Наблюдается рост спроса на жидкий кислород. Для снижения затрат на его производство в воздухоразделительной установке (ВРУ) средней производительности предлагается использовать двухвальный детандер-компрессорный агрегат (ДКА). Для повышения его эффективности в ДКА применяется турборедуктор, позволяющий снижать число оборотов компрессорной ступени (КС) до его оптимального значения относительно частоты вращения детандерной ступени (ДС). Приводятся результаты режимной и конструктивной оптимизации ВРУ и применяемого в ней ДКА. В результате удельный расход энергии на производство жидкого кислорода удается снизить с 1,17 до 1,06 кВтч/кг по сравнению с базовой ВРУ. Приводятся 3D-модели рабочих колес КС и ДС, входящих в состав двухвального ДКА.

**Ключевые слова:** Жидкий кислород. Воздухоразделительная установка. Детандер-компрессорный агрегат. Детандерная ступень. Компрессорная ступень. Рабочее колесо. Удельные затраты энергии.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Воздухоразделительные установки (ВРУ), предназначенные для производства жидких продуктов разделения воздуха, должны обладать относительно высокой холодопроизводительностью по сравнению с установками для получения газообразных продуктов. В таких установках необходимо компенсировать не только потери холода от теплопритоков к низкотемпературному блоку разделения и недорекуперации на теплом конце основного теплообменника, но также и холод, выводимый из установки вместе с жидким продуктом.

Для повышения эффективности крупнотоннажных ВРУ применяют детандер-компрессорные агрегаты (ДКА), в которых работа расширения детандерной ступени (ДС) передается на компрессорную ступень (КС) через общий вал. Однако простое заимствование уже имеющегося теоретического аппарата недостаточно для использования агрегата такой конструкции в жидкостных ВРУ средней производительности. Объединенные КС и ДС через общий вал агрегата работают с высокими числами оборотов, из-за чего в проточной части КС возникают высокоскоростные течения, что обуславливает появление скачков уплотнения в профиле рабочего колеса (РК) КС и запирающие потока нагнетаемого воздуха, проводящие к существенному снижению КПД компрессорной ступени и агрегата в целом.

Для обеспечения рекомендуемых для КС чисел оборотов нами ранее [1, 2] было предложено в ДКА использовать двухвальную конструкцию, механически объединяющую его две ступени в один агрегат посредством турборедуктора.

В настоящей статье приведены результаты оптимизации параметров жидкостной ВРУ средней производительности, именуемой Кж-0,5М1, и включенного в схему двухвального ДКА. Для корректного сравнения характеристик такой ВРУ с характеристиками базовой установки, имеющей турбодетандер с масляным тормозом, остановимся на особенностях последней и нахождении её показателей.

### 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ БАЗОВОЙ ВРУ С ТУРБОДЕТАНДЕРОМ

Для оценки эффективности разрабатываемых ВРУ с двухвальным ДКА была смоделирована базовая воздухоразделительная установка с турбодетандером, имеющим масляный тормоз (рис. 1). В схему этой ВРУ, обозначенной как Кж-0,5, для увеличения её холодопроизводительности была включена низкотемпературная холодильная машина (НХМ). Учитывались теплопритоки к холодной части ВРУ на уровне 188 кДж/кмоль, недорекуперация на теплом конце основного теплообменника (ОТ) 14-16 К, а также обеспечивалась реализуемость теплообмена во всех его секциях.

Потребляемая компрессором мощность, в качестве которого был выбран поршневой четырехступенчатый воздушный компрессор 4ВМ10-55/71, при давлении нагнетания воздуха 6,5 МПа вместе с дополнительными затратами на привод НХМ, регенерацию блока комплексной очистки воздуха и др. составила 726 кВт (см. табл. 1).

Варьирование температуры и доли отбора воздуха  $D$  на детандер, а также доли отбора воздуха  $d$  на НХМ позволило установить, что минимум удельных затрат