

УДК 621.565:621.59

**М.Б. Кравченко**, доктор техн. наук

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Дворянская, 1/3, Одесса, Украина, 65082

e-mail: [kravtchenko@i.ua](mailto:kravtchenko@i.ua)ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9310-2166>

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КРИОГЕННЫХ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК МАЛОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

*Проведен сравнительный анализ криогенных и некриогенных методов разделения воздуха. Показано, что основным преимуществом мембранных и адсорбционных воздуходелительных установок (ВРУ) является их относительно низкая стоимость и, как следствие, малый срок окупаемости. Несмотря на существенный прогресс в совершенствовании адсорбционных и мембранных ВРУ, достигнутый в последнее десятилетие, криогенные воздуходелительные установки остаются непревзойденными по ряду параметров. Для повышения конкурентоспособности криогенных ВРУ малой производительности необходимо радикально уменьшить их стоимость. Это может быть достигнуто за счет использования газовых криогенных машин для компенсации потерь холода в криогенных ВРУ. В них отсутствуют самые дорогие элементы установок, работающих по циклу Клода, — компрессор среднего давления и детандер. В потоковом симуляторе «COCO/ChemSep» проведено моделирование воздуходелительной установки для получения кислорода под давлением 16 МПа, использующей газовую криогенную машину, работающую по циклу Стирлинга. Расход энергии на производство одного  $\text{нм}^3$  продукционного кислорода в такой установке равен 1,2 кВтч. В режиме получения одного кг жидкого азота расходуется 1,32 кВтч электроэнергии.*

**Ключевые слова:** Воздуходелительная установка. Цикл Стирлинга. Кислород. Азот. Ректификация. Газовая криогенная машина. Короткоцикловая адсорбция (КЦА). Воздуходелительная КЦА-установка. Мембранная воздуходелительная установка.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В начале XX века, благодаря усилиям таких выдающихся ученых и инженеров, как К. Линде, Ж. Клод и П. Гейландт, криогенные методы разделения воздуха были настолько усовершенствованы, что сделали возможным получение кислорода и азота в промышленных масштабах. Этот технологический прорыв послужил основой для радикального повышения качества и увеличения производства стали и стекла, а также дал толчок промышленному производству азотных удобрений и развитию ракетной техники.

Низкотемпературная технология разделения воздуха настолько опередила свое время, что на протяжении почти всего XX-го века криогенные методы получения кислорода и азота были вне конкуренции. Только к концу прошлого века, в основном, благодаря появлению новых материалов, у криогенного разделения воздуха наконец-то появились достойные конкуренты — адсорбционный и мембранный методы получения кислорода и азота.

В настоящее время адсорбционный и мембранный методы разделения воздуха заняли значительный сегмент рынка воздуходелительных установок (ВРУ), главным образом в области малых производи-

тельностей и невысоких требований к чистоте получаемых продуктов разделения воздуха.

Цель данной статьи — сравнительный анализ криогенных и некриогенных методов разделения воздуха и оценка возможностей повышения конкурентоспособности криогенных ВРУ.

### 2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИОГЕННЫХ И НЕКРИОГЕННЫХ МЕТОДОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА

#### 2.1. Мембранные ВРУ

Научные основы некриогенных методов разделения газовых смесей были заложены еще в середине XIX-го века. В 1855 г. немецкий физиолог Адольф Фик (Adolf Fick), изучая транспорт газов через мембраны, изготовленные из нитроцеллюлозы, впервые дал количественное описание процессов диффузии (законы Фика). А в 1866 г. английский химик Томас Грэм (Thomas Graham) выполнил первое мембранное разделение газов и получил обогащенный кислородом воздух, содержащий 46,6 % кислорода [1,2].

Первая промышленная установка для получения водорода из отдувочных газов аммиачного производства была создана фирмой «Permea» (сейчас филиал