

УДК 621.565:621.59

¹**В.Л. Бондаренко**, доктор техн. наук; ²**Ю.М. Симоненко**, доктор техн. наук; ³**А.А. Чигрин**, аспирант; ⁴**Б.А. Пилипенко**, аспирант

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Лефортовская наб., д.1, факультет «Энергомашиностроение», г. Москва, РФ, 105005

²Одесская национальная академия пищевых технологий, Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082

^{3,4}ООО «Криоин Инжиниринг», Таможенная пл., 1А, г. Одесса, Украина, 65026

e-mail: ¹vbondarenko@cryoin.com; ²ysim1@yandex.ua; ³achigrin@crioin.com;

⁴boris.pilipenko.92@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0003-1562-7255>; ²<http://orcid.org/0000-0002-7827-0591>;

³<http://orcid.org/0000-0001-9767-9846>; ⁴<http://orcid.org/0000-0001-6537-8133>

ИЗВЛЕЧЕНИЕ РЕДКИХ ГАЗОВ МЕТОДОМ ДЕСУБЛИМАЦИИ

Показаны перспективы использования десублимации в технологиях получения инертных газов. Рассмотрены физические принципы их выделения из бинарных и многокомпонентных смесей за счёт фазового перехода «газ–твёрдое тело». Проведена оценка влияния температуры на концентрацию выходящего потока и степень извлечения целевого продукта. Приведены примеры применения десублимации в процессах обогащения ксенона, разделения легких инертных газов, очистки газовых концентратов от высококипящих примесей.

Ключевые слова: Редкие газы. Адсорбция. Вымораживание. Десублимация. Криптон. Ксенон. Гелий. Фазовый переход.

1. ВВЕДЕНИЕ

Технология получения инертных газов состоит из ряда последовательных процессов, направленных на концентрирование, очистку от побочных компонентов и отделение одних инертных газов от других [1, 2]. В разных сочетаниях и на различных температурных уровнях для этих целей могут использоваться методы дистилляции, низкотемпературной и короткоцикло-вой адсорбции, а также баромембранная сепарация.

В качестве альтернативы адсорберам могут рассматриваться аппараты, работа которых основана на выделении из смеси компонентов в твердом виде. При этом в одном случае в качестве вымораживаемого вещества выступают целевые продукты [3, 4]. В другом случае — побочные примеси, присутствие которых может нарушить нормальную работу сепараторов [5]. Многообразие смесей и различия в свойствах компонентов обусловили необходимость проведения анализа кристаллизации веществ в газовых потоках, характерных для технологии получения редких газов.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЦЕССА ВЫМОРАЖИВАНИЯ

Явления адсорбции и десублимации имеют ряд общих признаков. Оба они протекают циклично и нуждаются в периодической процедуре, условно именуемой регенерацией. Эти процессы полностью обратимы. Как при десорбции, так и при сублимации извлекают поглощенные продукты, в первую очередь — высоко-

кипящие. За счёт этого на выходе поток обогащается низкокипящими веществами. В случае разделения бинарных смесей низкокипящий компонент получают в чистом виде. Понижение температуры, повышение давления, а также концентрации высококипящего компонента способствуют активизации процесса его поглощения.

Наряду с множеством близких свойств, рассматриваемые процессы имеют и существенные отличия. Адсорбция предполагает использование специальных веществ-сорбентов с развитой внутренней поверхностью и наличием микропор. Процесс адсорбции обусловлен силами внутреннего притяжения молекул сорбента и поглощаемого вещества. Вымораживание имеет место в макроканалах, например, трубопроводах или зазорах между охлаждаемыми пластинами (ребрами). Кристаллизация может происходить в самом же слое газовой смеси. При этом образовавшиеся твердые частицы не обязательно задерживаются на поверхности, а могут частично уноситься потоком.

Различия в природе рассматриваемых процессов обусловили особенности эксплуатационных параметров. Адсорбция, в той или иной степени, затрагивает все компоненты смеси в широком интервале температур и давлений. Вымораживание характерно только для избранных компонентов в случае возникновения условий для их фазового превращения. Эти условия, именуемые «состоянием насыщения», жестко определяются температурой и парциальным давлением каждого компонента.

Для получения поглощенного вещества достаточ-