

УДК 621.593:546.217

**В.И. Файнштейн**

ОАО «Криогенмаш», пр. Ленина, 67, г. Балашиха, РФ, 143907

e-mail: fainshtein@cryogenmash.ru

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПРИБЛИЖЕНИЯ К ОПАСНЫМ УСЛОВИЯМ РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРОВ-ИСПАРИТЕЛЕЙ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

*Безопасная эксплуатация воздуходелительных установок (ВРУ) должна постоянно обеспечиваться обслуживающим персоналом. Следует учитывать, что результаты текущего контроля за содержаниями взрывоопасных примесей в жидком кислороде не всегда позволяют однозначно оценить степень приближения конденсаторов-испарителей ВРУ к опасным условиям работы. Для такой оценки необходимо рассматривать совокупность данных о содержаниях этих примесей в жидком кислороде за всю рабочую кампанию ВРУ. Излагаются методические вопросы оценки степени приближения к опасным условиям работы конденсаторов-испарителей различных типов ВРУ.*

**Ключевые слова:** Воздуходелительная установка. Кислород. Опасные примеси. Углеводороды. Конденсатор-испаритель. Безопасность.

**V.I. Fainshtein**

## ESTIMATION OF APPROXIMATION DEGREE TO DANGEROUS OPERATING CONDITIONS OF CONDENSERS-EVAPORATORS OF AIR SEPARATION PLANTS

*Safe operation of air separation plants (ASP) should be constantly provided by the maintenance personnel. It is necessary to take into account that results of the current control over contents of explosive impurity in liquid oxygen do not allow to one-valued estimate a approximation degree of condensers-evaporators ASP to dangerous operating conditions. For such estimation it is necessary to consider a data set about contents of this impurity in liquid oxygen for all working time of ASP. Methodical questions of an estimation of an approximation degree to dangerous operating conditions of condensers-evaporators of various types of ASP are stated.*

**Keywords:** Air separation plant. Oxygen. Dangerous impurities. Hydrocarbons. Condenser-evaporator. Safety.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Регулярный контроль содержаний взрывоопасных примесей в технологических потоках воздуходелительных установок (ВРУ) — неотъемлемая и очень важная составляющая комплекса мероприятий, выполняемых с целью обеспечения их взрывобезопасной эксплуатации.

Такой контроль проводится, во-первых, с целью систематической оценки эффективности средств очистки, которыми оснащена установка, чтобы не допустить её работу при неисправном их состоянии, и, во-вторых, для своевременного обнаружения приближения опасных периодов работы агрегата, чтобы при необходимости можно было принять соответствующие меры.

Второй из указанных проблем нужно уделять исключительно серьёзное внимание, так как пренебре-

жение ею может привести к тяжёлым последствиям и для оборудования ВРУ, и для обслуживающего персонала. Рассмотрим методические вопросы, относящиеся к обоснованию предельно допустимых содержаний примесей в жидком кислороде.

### 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ПРИБЛИЖЕНИЯ К ОПАСНЫМ УСЛОВИЯМ РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРОВ-ИСПАРИТЕЛЕЙ ВРУ

Эффективность средств очистки оценивается путём сопоставления с нормативами результатов текущих анализов по отдельным примесям или по группам примесей. Эти нормативы содержаний опасных примесей в жидком кислороде, регламентированные в России и за рубежом (см. таблицу), установлены в определённом соотношении к пределу растворимости

## Предельные содержания взрывоопасных примесей в жидком кислороде

Наименование вещества	Предельная концентрация, мгС/дм <sup>3</sup> жидкости (в пересчёте на углерод)
Ацетилен	0,22
Высшие ацетиленовые углеводороды	0,15
Предельные и непредельные углеводороды с малой растворимостью в жидком кислороде, группа C <sub>5</sub> -C <sub>6</sub> и более тяжёлые, в сумме	1,0
Предельные и непредельные углеводороды, имеющие среднюю растворимость в жидком кислороде, группа C <sub>3</sub> -C <sub>4</sub> (пропилен, изобутан, бутен-1, н-бутан, изобутилен), в сумме	11
Этан	200
Этилен	25
Пропан	15
Предельные и непредельные углеводороды, хорошо растворимые в жидком кислороде, группа C <sub>1</sub> -C <sub>3</sub> (метан, этан, этилен и пропан), в сумме:	
а) в жидком кислороде конденсаторов, последних по ходу жидкости, и в первичном криптоновом концентрате при отборе проб на анализ не реже, чем через 24 ч	430
б) в жидком кислороде из конденсаторов, последних по ходу жидкости, и в первичном криптоновом концентрате при отборе проб на анализ не реже, чем через 2 ч	645
в) в первичном криптоновом концентрате после тёплого испарителя при наличии испарителя-конденсатора витого типа и непрерывном контроле за содержанием метана или суммы углеводородов:	
– метан	6800
– сумма углеводородов	7600
Сероуглерод, мг/дм <sup>3</sup>	0,12
Масло, мг/дм <sup>3</sup>	0,4

примесей в жидком кислороде. Длительное время считалось, что после достижения растворимости примесей возможно образование взрывоопасных условий.

В руководящих материалах обычно устанавливаются определённые концентрации примесей (примерно 0,5 от предельной), до достижения которых допускается нормальная работа установки. В противном случае предусматривается повышение эффективности работы средств очистки, увеличение проточности, выявление и устранение источников повышенной загрязнённости воздуха и реализация других мероприятий. Если концентрация примесей в жидком кислороде превышает норму, то предписывается остановка агрегата и проведение полного его отогрева.

В то же время возникновение взрывоопасных условий в аппаратах ВРУ, не производящих первичный криптоновый концентрат, как уже неоднократно отмечалось, и, в частности, в [1], практически возможно только в результате накопления опасных примесей на теплоотдающих поверхностях конденсаторов-испарителей. При этом минимальное значение толщины слоя углеводородов, при которой возможно распространение горения в этом слое, составляет 30-50 мкм [2,3].\*

Таким образом, тот факт, что в отдельно взятом анализе или в некотором числе анализов жидкого кислорода из конденсаторов-испарителей установок, не производящих криптоновый концентрат, содержа-

ния определённой примеси или группы примесей превышают установленные нормы, ещё не означает, что возникли условия, близкие к взрывоопасным.

Экспериментально установлено, что интенсивность образования на теплоотдающих поверхностях отложений примесей, содержащихся в испаряемом жидком кислороде, зависит от гидродинамического режима работы парогенерирующих каналов испарителя [4]. Показано, что длительная и надёжная работа наиболее широко применяемых в настоящее время конденсаторов-испарителей с естественной циркуляцией потоков (пластинчато-ребристых и трубчатых) возможна только в так называемых «благоприятных гидродинамических условиях». Такие условия во всех парогенерирующих каналах могут быть обеспечены только при надлежащем избытке жидкости на выходе из канала. Соответствующие технологические условия задаются обычно в руководстве по эксплуатации (РЭ) воздухоразделительной установки и должны неукоснительно обеспечиваться обслуживающим персоналом.

В работе [5] предложена в критериальном виде оценка взрывобезопасных гидродинамических условий работы испарителя кислорода, исходя из рекомендаций, приведённых в работе [4]. В частности, по результатам расчётов сделан вывод о том, что для испарителя кислорода, работающего при  $P=1,37$  бар и  $T=93,5$  К, минимально допустимое значение числа

\* Вопросы, связанные с обеспечением взрывобезопасности при получении первичного криптонового концентрата, когда необходимо учитывать накопление в жидком кислороде метана, рассмотрены, например, в работе [1].

Рейнольдса для плёнки жидкости на выходе из парогенерирующего канала составляет 2460. В работе [6] приведены графики, где указан допустимый диапазон изменения относительного уровня кипящей жидкости в пластинчато-ребристом конденсаторе-испарителе, при котором в испарителе должны обеспечиваться взрывобезопасные условия.

Необходимо подчеркнуть, что при испарении кислорода в «неблагоприятных гидродинамических условиях» время, необходимое для образования взрывоопасного слоя отложений, даже при небольшой загрязнённости жидкого кислорода углеводородами, может составлять всего несколько сотен часов и менее, и поэтому работа в неблагоприятных гидродинамических условиях недопустима.

Установлено также, что при снижении содержания примесей в испаряемой жидкости слой углеводородов, накопившийся ранее на теплоотдающих поверхностях, уменьшается очень медленно.

Следовательно, степень приближения к опасным условиям можно определить, только оценив толщину слоя отложений опасных примесей на теплоотдающих поверхностях, образовавшегося при реальной загрязнённости кипящей жидкости углеводородами за период работы после полного отогрева.

Экспериментально показано, что интенсивность накопления углеводородов на теплоотдающих поверхностях ( $\text{мг}/\text{м}^2/\text{ч}$ ), работающих в «благоприятных гидродинамических условиях», пропорциональна среднему содержанию углеводородов в испаряемой жидкости и квадрату удельного теплового потока. При этом в области содержания углеводородов в жидком кислороде на уровне менее 0,001 от растворимости коэффициенты пропорциональности для углеводородов групп  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_4$  достаточно близки.

Поэтому величину толщины образующегося в таких условиях слоя отложений можно оценивать по суммарному содержанию указанных углеводородов в жидком кислороде.

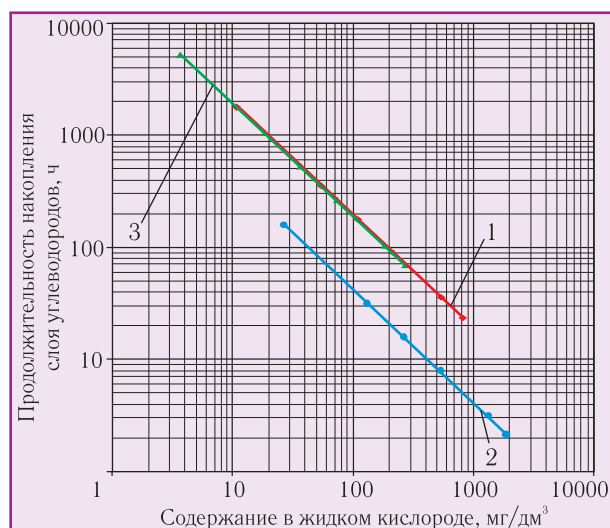
Следует отметить, что метан, ввиду практически полной его растворимости в жидком кислороде, не образует отложений на парогенерирующих поверхностях и в связи с этим его содержание в жидком кислороде не должно учитываться при расчёте толщины образующихся отложений.

Практически все углеводороды, которые могут содержаться в жидком кислороде, имеют достаточно низкие температуры кипения и при полных отогревах установок десублимируются и выносятся из аппаратов. Ввиду этого опасность представляет только слой углеводородов, накапливающийся в течение текущей кампании.

В связи с тем, что толщина образующегося слоя отложений опасных примесей в конденсаторах-испарителях ВРУ зависит от продолжительности работы аппарата в конкретных условиях, результаты единичных измерений содержаний углеводородов в испаряемой жидкости нельзя рассматривать как показатель, определяющий однозначно действия персонала. Требуется учитывать продолжительность промежутка

времени, в течение которого испаритель работал при определённом содержании углеводородов, а также условия работы в течение всей последней рабочей кампании. Таким образом, необходимо в течение всей кампании постоянно рассчитывать изменение среднего содержания углеводородов в жидком кислороде за период, прошедший после полного отогрева. Исходя из этой величины, следует судить о возможности за рассматриваемый промежуток времени накопления взрывоопасного слоя углеводородов в конденсаторах-испарителях и о допустимости дальнейшего продолжения рабочей кампании.

На рис. 1 показаны результаты выполненного для некоторых конкретных ВРУ, оснащённых цеолитовыми блоками комплексной очистки воздуха, расчёта промежутка времени, необходимого для накопления в парогенерирующих каналах конденсаторов-испарителей слоя отложений углеводородов групп  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}_3$  и более тяжёлых толщиной 25 мкм в зависимости от их среднего суммарного содержания в испаряемом жидком кислороде.

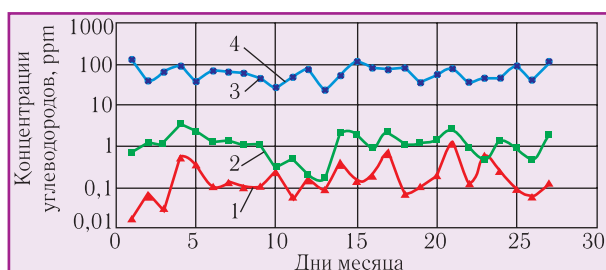


**Рис. 1.** Время, необходимое для накопления взрывоопасного слоя углеводородов групп  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}_3$  и более тяжёлых толщиной 25 мкм в аппаратах ВРУ трёх типов: 1 — в основном конденсаторе при производстве газообразного кислорода; 2 — в конденсаторе колонны технического кислорода при производстве газообразного продукта; 3 — в основном конденсаторе установки, работающей с внутренним сжатием кислорода

По имеющимся данным суммарное содержание углеводородов  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}_3$  и более тяжёлых в жидком кислороде может находиться в диапазоне от 0,1 до 5 мг/дм³ жидкого кислорода. Из результатов расчётов следует, что при продолжительности рабочей кампании даже ВРУ с внутренним сжатием более 2 лет (16000 ч) нельзя полностью исключить возможность накопления в конденсаторах опасных количеств углеводородов, хотя безусловно, в таких установках вероятность возникновения опасных условий, обусловливаемая конкретными, в том числе и экстремальными, условиями их работы, многократно меньше, чем в

ВРУ других типов.

Необходимо отметить, что организация систематического контроля за содержаниями индивидуальных углеводородов в жидком кислороде достаточно трудоёмка, а внедряемые в последние годы автоматические хроматографы имеют значительную стоимость. В этой связи неоднократно появляются предложения о замене хроматографического анализа определением суммарного содержания углеводородов в жидком кислороде. Подобные предложения являются на наш взгляд совершенно неприемлемыми в связи с постоянным присутствием в перерабатываемом воздухе и жидком кислороде метана, содержания которого многократно превосходят содержания других углеводородов (рис. 2).



**Рис. 2.** Изменения среднесуточных концентраций углеводородов в жидком кислороде (ppm) и их суммарного содержания в течение одного из календарных месяцев: 1 — пропан; 2 — этан+этилен; 3 — метан; 4 — сумма

При этом, содержания в воздухе метана и других углеводородов не связаны между собой. Поэтому на установках, не производящих первичный криптоновый концентрат, данные о суммарном содержании углеводородов не позволяют оценить изменение эффективности работы средств очистки и степень приближения к взрывоопасным условиям.

Правильнее будет для оценки степени приближения к опасным условиям использовать данные о нали-

чии в жидком кислороде суммарного содержания углеводородов без метана. Необходимые для этого автоматические анализаторы выпускаются рядом фирм. Использование таких приборов в производствах продуктов разделения воздуха может обеспечить непрерывную оценку степени приближения к опасным условиям в течение рабочей кампании и сигнализацию о резких повышениях содержаний опасной группы углеводородов в перерабатываемом воздухе.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки степени приближения к опасным условиям конденсаторов-испарителей воздухоразделительных установок необходимо рассматривать данные о суммарных содержаниях углеводородов групп  $C_2$ ,  $C_3$  и более тяжёлых в течение всей рабочей кампании, что возможно только при систематическом контроле за содержаниями указанных примесей в испаряемом жидком кислороде и статистической обработке результатов анализов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Файнштейн В.И.** Кислород, азот, аргон — безопасность при производстве и применении. — М.: Интермет-Инжиниринг, 2008. — 187 с.
2. **Иванов Б.А.** Безопасность применения материалов в контакте с кислородом. — М.: Химия, 1974. — 160 с.
3. **Иванов Б.А., Розовский А.С.** Безопасность работы с жидким кислородом. — М.: Химия, 1989. — 190 с.
4. **Густов В.Ф., Файнштейн В.И.** Взрывобезопасные условия работы испарителей жидкого кислорода// Химическое и нефтяное машиностроение. — 1983. — № 10. — С. 18-20.
5. **Jie-Hui Yang.** Anti-explosion and heat transfer of plate-fin type condenser-evaporator in air-separation plant// Proc. Conf. «ICES-9», Japan, 1982. — P. 42-45.