

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРИДОВ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ К АТМОСФЕРЕ КОСМОДРОМА АЛКАНТАРА (БРАЗИЛИЯ)

Е. Ю. Баранов, начальник проектного комплекса;

А. В. Дегтярев, канд. экон. наук, генеральный директор;

А. Э. Кашанов, канд. техн. наук, начальник проектного отдела;

В. Н. Пышнев, начальник лаборатории

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля, г. Днепропетровск

Аннотация. Рассмотрена проблема количественной оценки содержания хлоридов в атмосфере космодрома Алкантара (Бразилия) для обеспечения стойкости к ним разрабатываемого ракетного комплекса «Циклон-4». Описано решение параметрической задачи оценки содержания хлоридов в атмосфере и сформулированы новые технические подходы, используемые при разработке систем комплекса.

Ключевые слова: космодром Алкантара, концентрация хлоридов, атмосферные модели, климатический стандарт, работоспособность оборудования.

Анотація. Розглянуто проблему кількісної оцінки вмісту хлоридів в атмосфері космодрому Алкантара (Бразилія) для забезпечення стійкості до них розроблюваного ракетного комплексу «Циклон-4». Описано розв'язання параметричної задачі оцінки вмісту хлоридів в атмосфері та сформульовано нові технічні підходи, що використовуються при розробці систем комплексу.

Ключові слова: космодром Алкантара, концентрація хлоридів, атмосферні моделі, кліматичний стандарт, працездатність обладнання.

Abstract. The issue of quantitative assessment of chloride content in the Alcantara Launch Center atmosphere is considered in order to ensure the chloride resistance of the Cyclone-4 Space Launch System (SLS) which is under development. The solution of a parametric task to assess the chloride content in the atmosphere is shown, and the new engineering approaches used during the SLS systems development are formulated.

Keywords: Alcantara Launch Center, chloride concentration, atmospheric models, climatic standard, equipment operability.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для разработчиков ракеты-носителя (РН) и систем наземного комплекса (НК) «Циклон-4», базирующегося на бразильском космодроме Алкантара в непосредственной близости от океанского побережья, значительную проблему создает высокая концентрация хлоридов в морском воздухе. В спецификации условий внешней среды [4] и техническом задании на наземный комплекс [5] было предварительно задано максимальное содержание хлоридов в атмосфере, характеризующее интенсивностью их осаждения. Из-за отсутствия практических замеров по хлоридам в зоне космодрома достоверность этих исходных данных достаточно низкая.

Данная задача решается впервые.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ — разработать методический подход к оценке концентрации хлоридов атмосферы космодрома для обеспечения работоспособности технологического оборудования НК.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Основными механизмами образования соляных аэрозолей над морской поверхностью являются [1]:

– разбрызгивание и высыхание капель с поверхности морской воды, что является эффективным при

скорости ветра более 7 м/с, а также в зоне прибоя. При этом образуются частицы размером 1 ... 100 мкм и более, которые сосредоточены в основном в приводном слое высотой 10 ... 20 м с концентрацией порядка 10^4 м^{-3} ;

– схлопывание пузырьков на поверхности раздела вода–атмосфера. Это основной механизм генерации субмикронных частиц с размерами 0,05 ... 0,7 мкм, которые сосредоточены на высоте в несколько сотен метров с концентрацией порядка 10^8 м^{-3} [8].

Решение задачи переноса и осаждения морских аэрозолей на сушу в метеорологических микро-масштабах (несколько километров) с учетом локальных источников типа зоны прибоя на сегодняшний день практически отсутствует. Хорошее совпадение с данными измерений обеспечивают только атмосферные модели мезо- и глобального уровня, но характерный масштаб сетки в них составляет 0,5 ... 3, т. е. ~50 ... 300 км [7]. Такая картина — следствие зависимости характера изменения содержания хлоридов в атмосфере вблизи морского побережья от следующих факторов:

– исходного вертикального профиля распределения концентрации и размеров частиц соли;

– микроклиматических особенностей конкретной местности;

– рельефа местности;

– типа подстилающей поверхности (в том числе наличия и вида растительности);

– высоты над поверхностью земли;

– наличия или отсутствия в месте измерения крупных сооружений, влияющих на характер атмосферных потоков в приповерхностном слое до высоты нескольких десятков метров.

Например, в [9], где приведена эмпирическая формула для концентрации хлоридов в атмосфере в зависимости от расстояния от береговой линии, отмечается, что по указанным причинам она дает недопустимо большие погрешности уже на расстоянии более 500 м от берега даже в равнинной местности. По этим причинам ни один из климатических стандартов не задает пространственных границ для атмосферы различных типов и рекомендует [3] прямые измерения концентрации морских хлоридов на месте будущего крупного строительства.

Применительно к району Алкантары единственные данные измерений скорости осаждения хлоридов, предоставленные бразильской стороной, — это данные двухлетних наблюдений энергетической компании SEMAR, организованные ею в собственных целях и относящиеся к острову Сан-Луис, т. е. точки измерения находятся примерно в 25 ... 40 км от места расположения космодрома.

Из пяти точек измерения четыре (ECA1–ECA4) расположены почти на уровне моря (рис. 1). Точки ECA1 и ECA4 — на расстоянии примерно 200 м от бе-

рега, точка ECA3 — практически на береговой линии, точка ECA2 — на удалении около 1200 м от берега, точка ECA5 — посередине острова, на расстоянии около 10 км от ближайшего берега. Высота над поверхностью земли, на которой проводились измерения скорости осаждения хлоридов, неизвестна.

В соответствии со стандартами [2, 6] при определении коррозионной агрессивности атмосферы во внимание принимается среднегодовая интенсивность осаждения хлоридов. Данные по среднегодовому направлению и скорости ветра для Сан-Луиса и Алкантары предоставлены бразильской стороной.

Авторами был предложен и реализован методический подход, обеспечивающий определение концентрации хлоридов в атмосфере в зависимости от расстояния от береговой линии.

Построим простейшую параметрическую модель изменения содержания хлоридов в атмосфере для Сан-Луиса, подобрав ее параметры на основе данных измерений. Затем используем эту модель для района расположения космодрома, учитывая отличия в среднегодовой скорости ветра и его распределении по направлениям.

Для создания такой модели используем качественную зависимость массовой концентрации q хлоридных аэрозолей от расстояния x от источника (зоны прилива) в виде

$$q(x) = q_0 \cdot e^{-\frac{w \cdot x}{u \cdot H(x)}}. \quad (1)$$

Здесь q_0 — концентрация хлоридов в зоне источника, мг/м³; x — расстояние от источника до точки

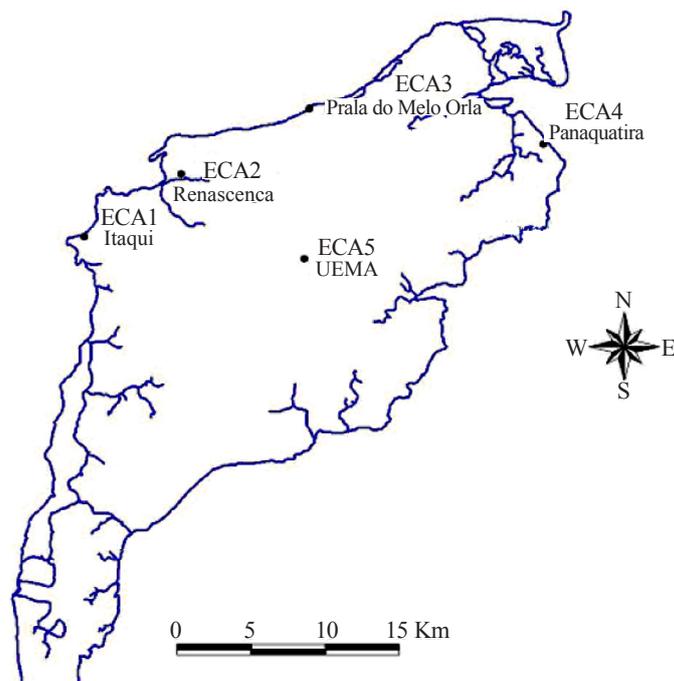


Рис. 1. Расположение точек измерения на острове Сан-Луис

измерения, м; w — скорость гравитационного осаждения хлоридов, м/с, принимаем по [3], $w=0,064$ м/с; u — скорость ветра, м/с; $H(x)$ — эффективная высота источника, учитывающая турбулентное поднятие некоторой доли частиц с увеличением расстояния от источника,

$$H(x) = H_0 \cdot e^{\frac{0.000942 \cdot x}{H_0}}, \quad (2)$$

где H_0 — наибольшая высота максимальной концентрации в зоне источника, м, составляет, по [1], 10...20 м; 0,000942 — подгоночный параметр, позволяющий согласовать результаты вычислений по формуле (1) с результатами измерений.

Для каждой точки измерений определяем восемь расстояний до ближайшего берега x_i в направлениях север, северо-восток, восток, юго-восток, юг, юго-запад, запад, северо-запад. Для каждого направления по данным, предоставленным бразильской стороной, определяем соответствующую долю τ_i времени (нормировка на единицу), в течение которого ветер дует в данном направлении. Далее для каждой станции строим полином вида

$$K^j = \sum_{i=1.8} \tau_i \cdot q(x_i^j), \quad (3)$$

где K^j — расчетная концентрация хлоридов в j -й точке измерения.

Подгонкой параметров в выражении (2) добиваемся максимально точного совпадения результатов расчетов по формуле (1) одновременно для всех пяти станций с результатами измерений. При этом используем, в соответствии с [2, 6], усредненные за год данные наблюдений.

Подобрав таким образом выражение, описывающее ход изменения концентрации на острове Сан-Луис, используем его же для расчетов концентрации солей в месте расположения космодрома. Это — некорректная операция (подгоночные параметры для района Алкантары могут отличаться от подобранных для Сан-Луиса), которую приходится использовать из-за отсутствия фактической информации. В качестве расстояний, естественно, берутся соответствующие восемь величин для стартового комплекса (СК), технического комплекса (ТК) и зоны временного хранения топлива (ЗВХ). Средняя скорость ветра и его распределение по направлениям также берутся для Алкантары. Исходная концентрация хлоридов в источнике (зоне прилива) принимается одинаковой в районе Сан-Луиса и месте расположения космодрома, поскольку пресноводные реки имеются в обоих районах (рис. 2).

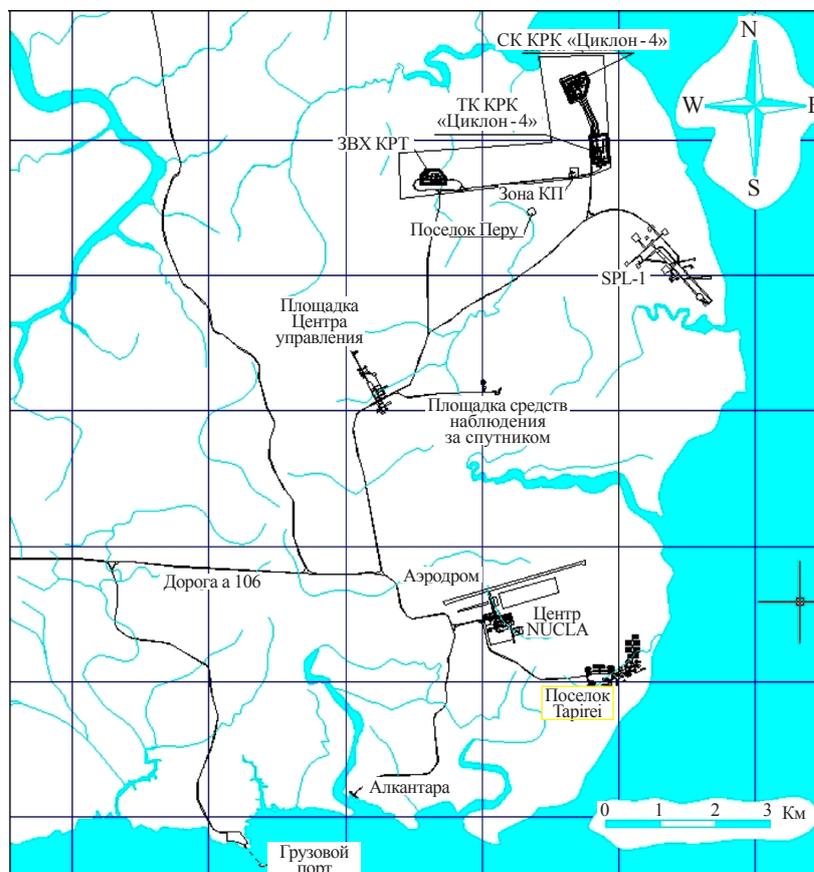


Рис. 2. Привязка площадок космодрома к местности (высота площадок над уровнем моря от 34 до 43 м)

Таким образом, по результатам проведенной оценки содержание хлоридов в атмосфере района Алкантары может составлять, мг·м²/сут: в районе СК — до 122; в районе ТК — до 96; в районе ЗВХ КРТ — до 25.

Полученные таким образом цифры для Алкантары являются верхними оценками концентрации. Рельеф местности, вдоль которой дует ветер с океана, представляет собой пологий склон холма (СК расположен на отметке 34 м над уровнем моря на расстоянии немного более 1 км от среза воды), поросший влажным тропическим лесом с хорошими адсорбционными свойствами по отношению к гигроскопичным хлоридам. Поэтому «фильтрующие» свойства местности здесь лучше, чем в Сан-Луисе, где все станции измерений (кроме пятой) были расположены практически на уровне океана, а три из них — в непосредственной близости от зоны приобья.

Несколько усложним модель, добавив в выражение (1) зависимость концентрации в расчетной точке от высоты над уровнем моря:

$$q(x, h) = q_0 \cdot e^{-\frac{w \cdot x}{u \cdot H(x)}} \cdot e^{-\frac{0.5h}{H(x)}}, \quad (4)$$

где h — высота точки измерения над уровнем моря, м; 0,5 — подгоночный параметр.

Аналогичная процедура подгонки параметров модели для всех пяти точек измерения на острове Сан-Луис по критерию одновременного максимально близкого совпадения результатов расчетов с результатами измерений (максимальное расхождение меньше 4%) дает следующее выражение для $H(x)$:

$$H(x) = H_0 \cdot e^{\frac{0.001207 \cdot x}{H_0}}. \quad (5)$$

Результат оценки с использованием выражений (4) и (5): содержание в атмосфере хлоридов может составлять, мг·м²/сут: в районе СК — до 55; в районе ТК — до 48; в районе ЗВХ КРТ — до 13.

Эти данные, полученные с использованием второй модели, также, вероятнее всего, завышены, поскольку не учитывают фильтрующих свойств подстилающей поверхности. Однако информации, позволяющей учесть этот фактор, нет. Корректные цифры могут быть получены только по результатам измерений на местности. Проведение таких измерений — процесс несложный с технической точки зрения (оборудование для них стандартизовано [2]), но требует продолжительного времени (1–2 года) и финансовых затрат на организацию рабочих мест для их осуществления.

Общий конструктивный подход к подтверждению достаточности принятых решений по защите от воздействия хлоридов для всех объектов НК (категории размещения 1–3 по ГОСТ 15150-69) основывается на анализе конструкции и режима ее эксплуатации с точки зрения использования базовых решений по обеспечению их работоспособности в условиях повышенного содержания хлоридов в атмосфере.

Таковыми базовыми техническими решениями являются: применение коррозионно-стойких материалов; применение коррозионно-защитных покрытий; применение, при необходимости, герметичного исполнения узлов; использование покупных изделий, в технических спецификациях которых указаны группы климатических исполнений ТВ ТМ, ТВ ОМ или климатическое исполнение В (по ГОСТ 15150-69), либо их аналоги по зарубежным стандартам; выбор режимов эксплуатации и/или хранения, ограничивающих воздействие агрессивной атмосферы на оборудование; планирование, в рамках технического обслуживания и профилактических работ, организационно-технических мер по контролю последствий воздействия среды на оборудование и поддержанию кондиционного состояния лакокрасочных покрытий, изоляции, солевых фильтров и т. п.

Работоспособность оборудования, размещаемого в кондиционируемых помещениях (категория размещения 4 по ГОСТ 15150-69), обеспечивается бесперебойным функционированием систем вентиляции и кондиционирования. Режим работы последних контролируется средствами автоматизированного дистанционного управления техническими системами и с точки зрения энергопотребления может различаться в период активной работы на космодроме и в межпусковой период. Солевые фильтры в системах вентиляции и кондиционирования эффективно задерживают твердые частицы размером крупнее 1 мкм. С учетом характерного размера аэрозольных частиц морских хлоридов около 30 мкм эти фильтры обеспечивают требуемое содержание хлоридов.

ВЫВОДЫ

Предложенный и реализованный авторами методический подход к определению концентрации хлоридов в атмосфере космодрома Алкантара в зависимости от расстояния от береговой линии позволил получить требования и разработать мероприятия по обеспечению работоспособности систем наземного комплекса «Циклон-4» в условиях космодрома Алкантара.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Атмосфера [Текст]: справочник (справочные данные, модели) / под ред. Ю. С. Седунова. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 510 с.
- [2] ГОСТ 9.039-74. Коррозионная агрессивность атмосферы [Текст]. — Введ. 1976-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1976.

- [3] Руководство по контролю загрязнения атмосферы [Текст] : РД 52.04.186-89 : утв. зам. пред. Госкомгидромета СССР Ю. С. Цатуровым 01.06.1989 и Глав. Гос. сан. врачом СССР А. И. Кондрусевым 16.05.1989 : введ. 01.07.1991. — М., 1991.
- [4] Циклон-4 11.4582.101 ИД [Текст] : спецификация условий внешней среды и нагрузок на этапах эксплуатации. — ГП КБЮ, 2005.
- [5] Циклон-4 12.7560.101 ТЗ [Текст] : Техническое задание на составную часть ОКР «Создание наземного комплекса КРК «Циклон-4». — ГП КБЮ, 2009.
- [6] Стандарт ФРБ NBR 14643. Atmospheric Corrosion — Classification of Atmospheric Corrosivity [Text]. — Brazilian Technical Standards Association (ABNT), 2001.
- [7] **Erickson, D.J.** A general circulation model based calculation of HCl and ClNO₂ production from sea salt dechlorination [Text] / D.J. Erickson, C. Seuzaret *Journal of Geophysical Research*. — 1999. — Vol. 104, nr D7. — P. 8347–8372.
- [8] The Relative Importance of Non Sea-salt Sulphate and Sea-salt Aerosol to the Marine Cloud Condensation Nuclei Population: An Improved Multi-component Aerosol-cloud Droplet Parameterisation [Text] / C. D. O'Dowd [etc.] *Quart.Jr. of the Roy. Met. Soc.* — 1998, July 17.
- [9] Uhlig's Corrosion Handbook [Text]. John Wiley & Sons, 2011. — 1288 p.

© С. Ю. Баранов, А. В. Дегтярев, А. Е. Кашанов, В. М. Пишнев

Надійшла до редколегії 04.05.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. В. О. Некрасов

Статтю розміщено у Віснику НУК №3, 2012