

УДК 681.742.535.361

Расчет мощности излучения на частотах 1420 и 1665–1667 МГц из шлейфа штатных радиоактивных выбросов радиохимического завода

Г.А. Колотков, С.Т. Пенин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 18.11.2013 г.

На примере радиохимического завода Сибирского химического комбината проведен теоретический расчет радиоизлучения из шлейфа выброса предприятия на частотах 1420 и 1665–1667 МГц. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных мощности излучения из шлейфа выброса радиохимического завода. Выполнено сравнение мощности радиоизлучения из шлейфов выбросов атомной электростанции и радиохимического завода.

Ключевые слова: мониторинг, радиоактивность, МГц, АЭС, РХЗ; monitoring, radioactivity, MHz, NPP, RPC.

Введение

За время деятельности Сибирского химического комбината (СХК) с 1949 г. произошло 36 радиационных инцидентов: 5 из них квалифицируются как серьезные (имеют 3-й уровень по международной шкале событий на объектах атомной энергетики INES (International Nuclear Event Scale)) [1, 2]. Например, на радиохимическом заводе (РХЗ) СХК в 1997 г. в течение 2 нед имел место сверхнормативный выброс в атмосферу радиоактивного ^{131}I с превышением предельно допустимого выброса в 2,4 раза [2]. На СХК действует автоматизированная система контроля радиационной обстановки (АСКРО), которая обеспечивает население достоверной информацией о радиационной обстановке в 30-км зоне СХК [3]. Данные, получаемые АСКРО, не в полной мере отражают уровень радиоактивности в воздухе, поскольку датчики радиоактивности установлены на местности, на кровлях основных зданий и сооружений. Радиоактивные облака кратковременных высокоактивных аварийных выбросов способны подняться на высоту 1–2 км («Маяк») [3] и опуститься за пределами АСКРО. Ограниченность измерений пространственных параметров радиоактивных выбросов АСКРО приводит к вполне понятным выводам о необходимости системы мониторинга распространения радиоактивных атмосферных выбросов в режиме реального времени.

В работе [4] приведены теоретические оценки концентрации атомарного водорода (H) в области шлейфа выброса и предложен пассивный дистанционный метод экологического мониторинга шлейфа атмосферных выбросов РХЗ по спонтанному излучению H на частоте 1420 МГц. Теоретический расчет

концентрации образовавшихся электронов в результате бета-распада радионуклидов и ионизации атмосферы проводился без учета процесса размножения электронов. Процесса, характеризующегося тем, что первичные электроны распада обладают энергией от сотен кэВ до единиц МэВ и эти электроны способны ионизовать среду распространения. Таким образом появляются вторичные, третичные электроны и данный процесс будет продолжаться до тех пор, пока электроны будут обладать энергией для ионизации среды. Моделирование распространения радиоактивного шлейфа от гипотетического штатного выброса РХЗ было выполнено для трех стратификаций атмосферы и двух типов подстилающей поверхности. Далее авторами работы [5] в 1997 г. проведен натурный эксперимент, который показал возможность детектирования линии излучения H на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса РХЗ и превышение уровня принимаемого сигнала по сравнению с теоретическими расчетами, выполненными в работе [4]. Цель нашей работы – рассчитать мощность спонтанного излучения H (1420) и OH (1665–1667) МГц из шлейфа стационарного выброса РХЗ с учетом процесса размножения электронов.

Выбросы РХЗ

В процессе работы РХЗ образуются газообразные, жидкие и твердые радиоактивные отходы. Газообразные выбросы РХЗ намного интенсивнее, чем атомной электростанции (АЭС), поэтому высота газоотводных труб на заводах больше (не менее 200 м). Основная часть газообразных продуктов попадает в атмосферу при обработке ТВЭЛов. Среди них основное место занимают ^{85}Kr , ^3H , ^{14}C , ^{129}I . При выдержке отработанного топлива более 150 сут выделениями ^{131}I и ^{133}Xe , наиболее значимыми среди газообразных радионуклидов, можно пренебречь

* Геннадий Александрович Колотков (kolotkov@iao.ru); Сергей Тимофеевич Пенин (penin@iao.ru).

[6]. Большая часть трития попадает в жидкие отходы. Для связывания йода используется специальная химическая обработка. Очистка от ^{85}Kr не производится. Несмотря на то что АЭС выбрасывает большее количество РБГ (радиоактивные благородные газы), выбросы РБГ РХЗ являются большими по величине. В табл. 1 приведено сравнение радиоактивных выбросов АЭС и РХЗ, работающих в штатном режиме.

Т а б л и ц а 1
Стационарные газообразные выбросы РХЗ и АЭС [6]

Радионуклид	РХЗ (Бк/год)	АЭС (Бк/год)
^{85}Kr	$6 \cdot 10^{17}$	$1,07 \cdot 10^{13}$
^{41}Ar	—	$9,25 \cdot 10^{11}$
^{133}Xe	—	$1,2 \cdot 10^{14}$
^{131}I	—	$1,1 \cdot 10^{11}$

Расчет мощности излучения на частотах 1420, 1665–1667 МГц из шлейфа выброса РХЗ с учетом процесса размножения электронов проводился по следующим этапам:

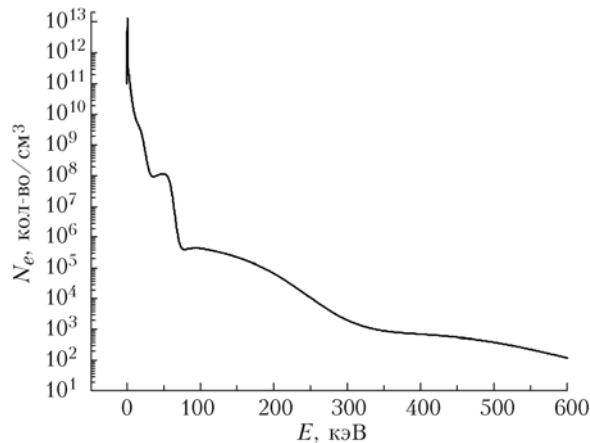
1. Расчет суммарного спектра тормозного излучения 9 поколений электронов бета-распада ^{85}Kr (рисунок).

2. Анализ физико-химических реакций и диапазона длин волн излучения, под действием которого протекают фотохимические реакции с образованием Н и ОН [7, 8].

3. Вычисление количества тормозного излучения электронов в этом диапазоне длин волн.

4. Расчет стационарных концентраций Н и ОН [7, 8].

5. Расчет мощности излучения из 1 км³ шлейфа выброса РХЗ на частотах 1420 и 1665–1667 МГц.



Распределение суммарной концентрации 9 поколений электронов по энергиям E для ^{85}Kr

Расчет функции распределения электронов по энергиям проводился с использованием уравнения Спенсера–Фано, описывающего деградацию энергии электронов бета-распада [9]:

$$\Sigma(E)\Phi(E) - \int_E^{E_0} \Sigma_s(E' \rightarrow E)\Phi(E')dE' = S(E),$$

где Σ, Σ_s – интегральное и дифференциальное макроскопические сечения передачи энергии, получаемые умножением соответствующих микроскопических сечений на концентрацию атомов в однородной среде:

$$\Sigma_s(E' \rightarrow E) = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}N.$$

Здесь $\varepsilon = E' - E$ – энергия, теряемая частицей в одном акте взаимодействия; $S(E)$ – спектр электронов бета-распада, эл-н/(см³·с); $\Phi(E)$ – плотность потока электронов, имеющих энергию E , эл-н/(см²·с); $d\sigma$ – дифференциальное сечение передачи энергии, см²/эВ; E_0 – максимальная энергия спектра электронов бета-распада; N – количество атомов в 1 см³ воздуха, N_e – количество электронов в 1 см³ воздуха. Более подробно метод изложен в [10].

Основными источниками Н и ОН являются метан, аммиак, формальдегид, сероводород, вода, молекулярный водород, азотистая кислота, перекись водорода, оксид азота, радикал гидропероксида, этилен. Анализ фотохимических реакций в тропосфере показал, что основной вклад в образование «маркеров» радиоактивности вносит излучение от 844,7 до 4200 Å. Энергия диссоциации рассчитывалась по формуле

$$E_d = \frac{hc}{\lambda}$$

и находится в диапазоне от 2,95 до 14,68 эВ.

Для вычисления количества энергии тормозного излучения электронов, инициирующего фотохимические реакции с образованием Н и ОН, воспользовались приближенными соотношениями классической электродинамики [11]:

$$dQ_v = \frac{8e^2v^2}{3c^3}v_{\text{эф}}dv,$$

где e – заряд электрона; c – скорость света; v – скорость электрона; $v_{\text{эф}} = Nv\sigma_{tr}$ – эффективная частота столкновений (σ_{tr} – транспортное сечение передачи энергии). Считая рассеяние изотропным, время торможения одного электрона равным 10^{-6} с и учитывая результаты, представленные на рисунке, после суммирования получим, что в спектральный интервал 844,7–4200 Å будет излучена энергия $7,654 \cdot 10^3$ эрг/см³.

Расчет мощности излучения из шлейфа выброса РХЗ

При самопроизвольном переходе атома из верхнего энергетического состояния n в нижнее k излучается квант. Мощность линии излучения P определяется вероятностью радиационного перехода A_{nk} по следующей формуле: $P = E_{nk}A_{nk}$, где $E_{nk} = h\Delta\nu$ (h – постоянная Планка, $\Delta\nu$ – частота перехода). При одном акте радиационного перехода $A_{nk} = 3 \cdot 10^{-15} \text{ с}^{-1}$ и $E_{nk} = 9,412 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}$ для $\Delta\nu = 1420,4057517 \text{ МГц}$ мощность линии излучения

одного атома Н равняется $2,824 \cdot 10^{-37}$ Вт. Так как концентрация атомов водорода в 1 м^3 шлейфа составляет $4 \cdot 10^{16} - 2,6 \cdot 10^{17}$ атомов, то мощность излучения из 1 км^3 на частоте 1420 МГц составит величину порядка 10^{-13} Вт [7].

Молекула гидроксила имеет большее количество линий излучения, чем атомарный водород, что объясняется наличием ядерного спина у атома водорода (табл. 2).

Таблица 2

Линии излучения гидроксила

Частота, МГц	Коэффициент Эйнштейна А (10^{-11} с^{-1})	Энергия сверхтонкого расщепления (10^{-25} Дж)	Мощность излучения (10^{-35} Вт)
1612,231	1,289	10,7	1,3792
1665,40	7,103	11,0	7,8133
1667,358	7,698	11,0	8,4678
1720,533	0,940	11,4	1,0716

Главными линиями спонтанного излучения ОН являются 1665,40 и 1667,358 МГц, что соответствует мощности излучения 10^{-35} Вт. С использованием метода расчета концентрации гидроксила, описанного выше, получено, что объем выбросов 1 км^3 будет излучать примерно $3 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$ Вт [8] (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение мощностей излучения (Вт) на частотах 1420, 1665–1667 МГц из 1 км^3 выбросов РХЗ и АЭС

Ис-точник	Теория		Эксперимент		
	1420 МГц		1665–1667 МГц		
РХЗ	$8 \cdot 10^{-18} - 2 \cdot 10^{-17}$ [4]	$10^{-13} - 7 \cdot 10^{-13}$	Наблюдалось увеличение интенсивности излучения [5]	$3 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$	—
АЭС	$6 \cdot 10^{-7}$ [12]	10^{-13} [7, 8]	—	$2 \cdot 10^{-10}$ [8]	—

Примечание. Жирным шрифтом выделены наши расчеты для РХЗ.

Заключение

В настоящей статье при расчете мощности излучения на частотах 1420 и 1665–1667 МГц из шлейфа выброса РХЗ был учтен процесс размножения электронов. Полученные величины мощности излучения из шлейфа выброса РХЗ превышают таковую, рассчитанную в работе [4], на 5 порядков величины, что объясняется учетом процесса размножения электронов. Результаты, представленные на-

ми, качественно согласуются с выводами авторов экспериментальной работы [5], в которой было обнаружено превышение величины измеряемого сигнала на частоте 1420 МГц по сравнению с теоретическими расчетами, выполненными в работе [4]. Процесс исследования этого вопроса будет продолжен, поскольку сравнить по гидроксилу не представляется возможным: ни экспериментальных, ни теоретических работ других авторов найдено не было.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-05-31506.

1. URL: <http://www.anti-atom.ru/ab/node/1929> (дата обращения: 29.03.2013).
2. Бекман И.Н. Курс лекций «Ядерная индустрия». Лекция 31. Аварии на предприятиях ядерного топливного цикла. М., 2005. 30 с. URL: <http://profbeckman.narod.ru/NIL31.pdf> (дата обращения: 29.03.2013).
3. URL: <http://www.atomsib.ru/sci/ecology/ASKRO.html> (дата обращения 30.03.2013).
4. Пенин С.Т., Чистякова Л.К. Формирование и динамика излучений атомарного водорода в атмосфере и шлейфе выбросов ядерно-перерабатывающих предприятий // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10, № 1. С. 73–81.
5. Chistyakov V.Yu., Losev D.V., Chistyakova L.K., Penin S.T., Tarabrin Yu.K., Yakubov V.P., Yurjev I.A. Microwave radiation of atomic hydrogen in plumes of radioactive emissions from nuclear reprocessing plants // J. Microwave and Opt. Technol. Lett. 1997. V. 16, N 4. P. 255–260.
6. Бабаев Н.С., Демин В.Ф., Ильин Л.А. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда / Под ред. А.П. Александрова. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 312 с. URL: <http://bibl.tikva.ru/base/V1235/V1235Part102-238.php> (дата обращения: 10.05.2012).
7. Колотков Г.А., Пенин С.Т., Чистякова Л.К. Возможность определения активности выбросов АЭС по микроволновому излучению на частоте 1420 МГц // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 9. С. 793–797.
8. Kolotkov G.A., Penin S.T. Remote monitoring of emission activity level from NPP using radiofrequencies 1420, 1665, 1667 MHz in real time // J. Environ. Radioactivity. 2013. V. 115. P. 69–72. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.07.004.
9. Кольчужкин А.М., Учайкин В.В. Введение в теорию прохождения частиц через вещество. М.: Атомиздат, 1978. 255 с.
10. Penin S.T., Kolotkov G.A., Chistyakova L.K. Generation of atomic hydrogen in the air under action of beta decay of radioactive elements // Proc. SPIE. 2004. V. 5743. P. 372–379.
11. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
12. Протасевич Е.Т. Метод обнаружения радиоактивных загрязнений среды по свечению воздуха // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 5. С. 697–700.

G.A. Kolotkov, S.T. Penin. Radiation power calculation of stationary radioactive emission of radiochemical plant at 1420 and 1665–1667 MHz frequencies.

The calculation of radiation power at 1420 and 1665–1667 MHz frequencies from emission plume for the radiochemical plant of Siberian Chemical Enterprise were performed. The comparison between experimental and theoretical data on radiation power from emission plume of radiochemical plant were drawn. Radiation power from emission plume matching performed for nuclear power plant and radiochemical plant.