

## ANÁLISE DE RISCO DE UM SISTEMA HIPOTÉTICO DE RECOMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DE HEXAFLUORETO DE URÂNIO ENRIQUECIDO

Arlindo Candido da Silva Neto  
Eduardo José de Barros Souto  
Josué Clementino de Medeiros

INB - Indústrias Nucleares do Brasil S/A

### RESUMO

Este trabalho apresenta o resultado de uma análise de risco realizada em um sistema hipotético de recomposição isotópica de hexafluoreto de urânio enriquecido (UF<sub>6</sub>). O modelo aplicado se baseou nas recomendações da NRC NUREG/CR – 1513 e outras referências bibliográficas. Foram consideradas especificações técnicas e condições operacionais do sistema objeto do estudo, sendo identificados os principais cenários que apresentam potenciais perigos associados ao processo. Por fim, foi escolhido um cenário potencial de evento considerado de grau de risco catastrófico e procedeu-se o estudo determinístico estimando-se a taxa de vazamento de UF<sub>6</sub> e consequências decorrentes das reações do UF<sub>6</sub>. O resultado é capaz de viabilizar o delineamento das ações de emergência e contenção que possibilitem a operação do sistema em limites de segurança esperados.

### 1. INTRODUÇÃO

O UF<sub>6</sub> gasoso quando em contato com a água presente no ar, reage de forma exotérmica, produzindo como produto ácido fluorídrico e fluoreto de uranila, conforme reação abaixo (Equação 1):



Como afirma [2], para o caso de uma liberação de UF<sub>6</sub> em forma de gás, a reação (geralmente em um ou dois minutos) com vapor de água presente no ar, libera calor devido à reação exotérmica e formando pequenas partículas de fluoreto de uranila (UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) (diâmetro de 1 a 10 µm) e gás fluoreto de hidrogênio (HF). As partículas de UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> são bastante estáveis, mas o HF reage subsequentemente com o vapor de água no ar para formar o HF.H<sub>2</sub>O complexo, que libera calor no processo.

Liberações acidentais de UF<sub>6</sub> em instalações de ciclo de combustível nuclear podem ocorrer a partir da ruptura de uma tubulação de processo, falha de uma válvula durante a transferência de UF<sub>6</sub> para ou de cilindros e tanques de processo, ou ruptura do cilindro durante o aquecimento ou incêndio acidental. Essas liberações podem ocorrer nas fases líquida ou gasosa. Se o UF<sub>6</sub> é liberado como um líquido, ele imediatamente se transforma em UF<sub>6</sub> sólido e gasoso em condições normais [3].

Para a análise de possíveis cenários de risco, em que se postula a liberação de UF<sub>6</sub> e sua consequente reação de hidrólise, foi utilizado um modelo capaz de mapear e categorizar os perigos inerentes ao processo de operação, sugerindo estudos determinísticos da severidade de cenários avaliados como alto grau de perigo.

Tais cenários foram identificados e analisados qualitativamente e quantitativamente baseados nas propriedades tóxicas e radioativas do hexafluoreto de urânio ( $\text{UF}_6$ ) e das substâncias envolvidas no processo de hidrólise do  $\text{UF}_6$  - fluoreto de hidrogênio (HF) e fluoreto de uranila ( $\text{UO}_2\text{F}_2$ ). A tabela 1 refere-se ao efeito de riscos humanos devido a diferentes períodos de exposição ao HF, esses valores podem ser usados como orientação no planejamento de emergências e na tomada de decisões de segurança (por exemplo, se a análise de acidentes indicarem que a exposição da pessoa mais exposta pode exceder o valor fornecido, seriam necessárias condições de segurança mais rigorosas)

**Tabela 1** -. Efeitos de Perigos a saúde devido à exposição a HF em função do tempo.

	Fonte	Efeito	Concentração no ar (mg HF/m <sup>3</sup> )	Tempo de exposição (min)
EXPOSIÇÃO CRÔNICA	National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)	Short term exposure limit (STEL)	5	15
	NIOSH	Threshold limit value (TLV)	2,5	480
	Occupational Safety and Health Administration (OSHA)	Permissible exposure limit (PEL)	2	480
EXPOSIÇÃO AGUDA	National Research Council NIOSH/OSHA	Emergency exposure limit	13,3	10
		Immediately dangerous to life or health (IDLH)	13,3	30

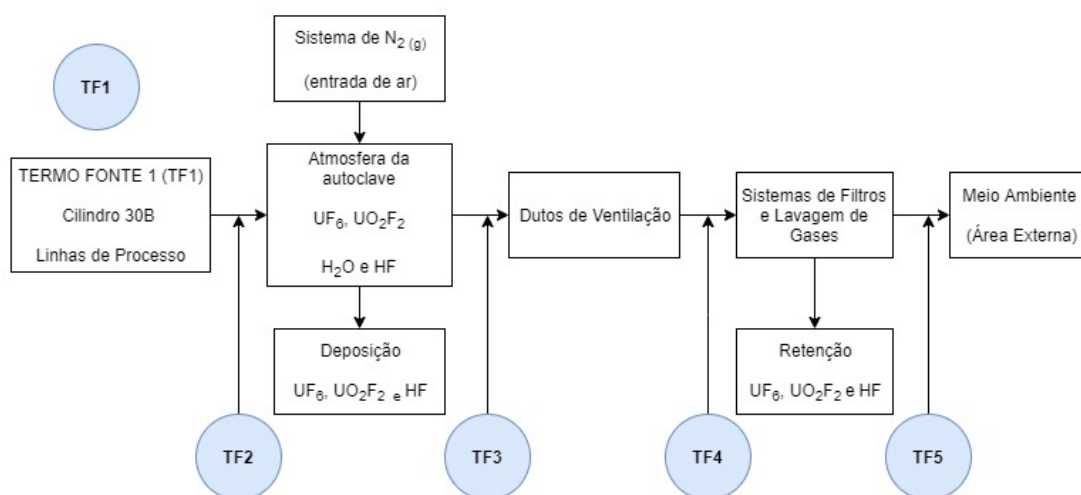
Esses cenários passaram por avaliação baseadas em pesquisas multidisciplinares, considerando também aspectos como: condições do local, quantidade de indivíduos potencialmente afetados, projeto de instalações, inventários de materiais, configurações de equipamentos e procedimentos operacionais, modos de falha, dentre outros. A primeira etapa da análise de risco avaliou frequência de ocorrência e severidade das consequências do potencial perigo, apresentado como saída dos resultados da aplicação de três ferramentas: Análise Preliminar de Riscos (APR), Lista de Ranking Relativo (LRR) e Matriz de Classificação de Risco (MCR). Juntos, esses resultados servem como balizador de priorização de ações que são capazes de minimizar o risco, seja agindo na redução da severidade das consequências ou nas estratégias que possibilitem a redução de frequência de ocorrência.

## 2. DESCRIÇÃO

Depending on the machine, if crack or plastic device that simulates the paper, see figure 1, is soil quality and being according to dimensions defined in the project.

### 2.1. Material e Método

Neste trabalho é considerado hipoteticamente um cenário postulado de liberação de  $UF_6$  durante o processo de homogeneização de um cilindro 30B, contendo 2000kg de  $UF_6$ , no interior de uma autoclave. Ao atingir o limite de temperatura e pressão estipulado em processo (acima do ponto triplo,  $64^\circ C$  e 1,5bar), postula-se que uma válvula de produção ao ser alinhada ocorra falha e que o  $UF_6$  em estado líquido seja liberado para o interior da autoclave. O que ocasiona o processo de hidrólise, formando  $UO_2F_2$  e HF (Figura x).



**Fig.1** – Fluxograma dos diferentes processos na formação de termos fontes de liberação

Presume-se que a temperatura do cilindro seja de aproximadamente  $80^\circ C$ . Esta é uma suposição arbitrária para propósitos puramente ilustrativos. A temperatura exata na qual a válvula falha depende de outros fatores que são considerados neste trabalho.

Todas as partículas sólidas de  $UF_6$  permanecem suspensas no ar (Nota - esta suposição é conservadora porque a deposição de partículas sólidas de  $UF_6$  perto da fonte é uma possibilidade. Entretanto, a estimativa da quantidade que pode depositar é incerta e depende de vários fatores como características de dano do cilindro, distribuição de tamanho de partícula e direção de fluxo do material liberado e a presença ou ausência de obstáculos)

#### TERMOS FONTES

Assumindo que o  $UF_6(l)$  sobre pressão no cilindro na  $T_i$  e que o  $T_i > T_t$ , então o balanço de calor, a fração mássica de  $UF_6$  que está na forma de vapor é dada por (Equação 2):

$$f = \frac{m_l^i [\lambda_f + C_{ps}(T_t - T_s) + C_{pl}(T_i - T_t)] + m_v^i [\lambda_s + C_{ps}(T_t - T_s) + C_{pv}(T_i - T_t)]}{(m_l^i + m_v^i) [\lambda_f + C_{ps}(T_t - T_s) + C_{pv}(T_s - T_t)]} \quad (2)$$

Onde:

f = fração mássica que é transformada em vapor após resfriamento (Ts);

C<sub>pl</sub> = Calor específico a P cte para UF6(l), 563,3 J/kg.K;

C<sub>ps</sub> = Calor específico a P cte para UF6(s), 518,14 J/kg.K;

C<sub>pv</sub> = Calor específico a P cte para UF6(v), 369,35 J/kg.K;

T<sub>i</sub> = Temperatura inicial do UF6 (temperatura no cilindro), 80°C (353,15K) ou 93°C (366,15K);

T<sub>t</sub> = Temperatura do Ponto triplo do UF6, 64,1° ou 337,1K;

T<sub>s</sub> = Temperatura de Sublimação do UF6, 56,25°C ou 329,4K;

λ<sub>f</sub> = Calor de fusão para transição sol-liq, 5,458x10<sup>4</sup> J/kg;

λ<sub>s</sub> = Calor de sublimação, 1,369x10<sup>5</sup> J/kg;

m<sub>l</sub><sup>i</sup> = Massa inicial do UF6(l), 2000kg;

m<sub>v</sub><sup>i</sup> = Massa inicial de UF6(v), mesmo existindo algum vapor, será ignorado neste caso.

As várias fontes de calor liberadas são:

- Calor sensível de resfriamento de líquido da temperatura inicial para o ponto triplo;
- Calor latente de fusão para conversão de líquido em sólido no ponto triplo; e
- Calor sensível de resfriamento de sólido e vapor do ponto triplo ao ponto de sublimação.

A Tabela a-2 mostra os dados calculados. Para temperaturas entre os valores exibidos, a interpolação linear da fração do flash é aceitável.

**Tabela 2** - Dependência da Fração, f, na Temperatura Inicial de Armazenamento.

<b>Temperatura Inicial (Ti)</b>	65	70	75	80	85	90	93	95	100	121
<b>Fração</b>	0,42	0,44	0,46	0,49	0,51	0,53	0,54	0,55	0,57	0,65
<b>Mássica (f)</b>	9	9	9	0	0	1	4	1	1	8

Da Equação (2), o valor aproximado de f neste trabalho é 0,490. Assim, do original 2000 kg de UF6, 49 por cento em massa (980 kg) de UF6 inicialmente é transformado em vapor, e 51 por cento em massa (1020 kg) são sublimados para sólidos.

## MODELO DE DISPERSÃO

De posse destes dados podemos referendar a partir da NUREG-1520 Ver 1 [A] que demonstra os requisitos referentes ao método de avaliação das consequências de acidentes químicos. Os requisitos são para provar que o modelo a ser utilizado fornece resultados de avaliação conservadora e que o modelo de difusão para o cálculo da concentração de UF6 e seus produtos de reação em conformidade com as orientações para a aplicabilidade do modelo especificada em NUREG / CR-6481 [B]. Além disso, é necessário que a análise do grau de efeito siga o guia NUREG / CR-6410 [C], referente à dispersão atmosférica e modelagem de consequências.

Como aplicação específica, os dados do método de 5 fatores do NUREG / CR-6410 ou do antigo manual DOE (Departamento de Energia dos EUA) DTL (Dangerous Toxic Load - Carga Tóxica Perigosa) [D] são usados para a avaliação do termo fonte.

Para avaliação dos modelos de dispersão atmosférica para análise de segurança, podemos considerar o uso do código de cálculo “RASCAL 3.0.5” aprovado pela NRC (U.S. Nuclear Regulatory Commission - Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos).

O código RASCAL foi desenvolvido pelo NRC dos EUA e o centro de atividades de emergência do NRC usa o código para avaliar a dose de exposição por materiais radiológicos liberados na atmosfera em um acidente.

## **2.2.xxxxxxxxxxxxxx**

### **CONDIÇÕES ATMOSFERICAS**

Os dados hipotéticos para o site da instalação são os seguintes:

Velocidade do vento = 2,4m/s

Direção do vento = 90°

Temperatura do ar = 20°C

Umidade relativa = 50%

Estabilidade do vento = Classe E

Precipitação = chuva leve

### **DISPERSÃO e DEPOSIÇÃO de HF e UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>**

Ao utilizar o código RASCAL, temos que o modelo para UF<sub>6</sub> funciona em duas etapas:

Na primeira etapa, o modelo calcula a propagação do UF<sub>6</sub>, a conversão do UF<sub>6</sub> em HF e UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> e o aumento da pluma do HF e UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>. Os produtos desse estágio são termos de origem UF<sub>6</sub>, HF e UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> e o aumento da pluma de HF e UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, tudo em função da distância do ponto de liberação, com a fração de liberação de HF e UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> através da construção de 0,23 e 0,88, respectivamente.

No segundo estágio, um modelo Gaussiano de linha reta ou um de gás denso é usado para calcular concentrações no ar e deposição de HF e UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> em receptores em uma grade polar. A distância calculada pelos termos da fonte dependente no primeiro estágio é usada desde o UF<sub>6</sub>.

## **3. RESULTADOS OBTIDOS**

### **3.1 Desenvolvimento da Matriz de Risco.**

Inicialmente, foi desenvolvida uma análise preliminar de riscos com o objetivo de identificar todos os cenários de perigos do sistema proposto. Pois, havia necessidade de uma ampla identificação, de forma indutiva, dos riscos inerentes ao processo. A abordagem utilizada neste momento se baseia em uma avaliação qualitativa de riscos. Como afirma [6], a Análise de Riscos qualitativa estuda todos os possíveis riscos existentes na instalação considerando a probabilidade de tais eventos acontecerem e as consequências provenientes dos mesmos em termos qualitativos. Tabela 1, abaixo, apresenta o resultado da Análise Preliminar de Riscos.

**Tabela 1 – Cenários de Riscos apontados no processo**

CENÁRIO	PERIGO	CAUSA	EFEITOS	S	F	R	RR
1	Liberação de UF <sub>6</sub>	Falha no controlador de temperatura CT001 com aumento da temperatura para valores acima de 80°C	Aumento da pressão no interior do cilindro. Possibilidade de rompimento de válvula e dispositivo de amostragem	3	2	II	6
2	Liberação de UF <sub>6</sub>	Falha no instrumento de temperatura RBI11CT001 com aumento da temperatura para valores acima de 80°C	Aumento da pressão no interior do cilindro. Possibilidade de rompimento de válvula e dispositivo de amostragem	3	1	II	3
3	Liberação de UF <sub>6</sub>	Falha no controlador de temperatura CT002 com aumento da temperatura para valores acima de 80°C	Falha no controle de temperatura das resistências de aquecimento. Aumento da pressão no interior do cilindro. Possibilidade de rompimento de válvula e dispositivo de amostragem	3	2	II	6
4	Liberação de UF <sub>6</sub>	Ruptura ou trincas no dispositivo de amostragem líquida	Vazamento de UF <sub>6</sub> no interior do vaso	3	1	II	3
5	Liberação de UF <sub>6</sub>	Falha no instrumento de pressão CP001 com leitura de pressão abaixo do valor real	Indicação de pressão de UF <sub>6</sub> diferente do diagrama de fase. Exposição do Operador na abertura da porta após vazamento de UF <sub>6</sub> no interior do vaso	3	2	II	6
6	Liberação de UF <sub>6</sub>	Falha no instrumento de pressão CP002 com leitura de pressão abaixo do valor real.	Contaminação da vaso. Exposição do Operador na abertura da porta após vazamento de UF <sub>6</sub> no interior do vaso	3	2	II	6

**Legenda:** S severidade; F frequência de ocorrência, R risco; RR ranking relativo

Pelo fato de a Análise de Risco ter apresentado cenários de severidade catastrófica, justifica-se uma análise quantitativa.

A partir das simulações realizadas usando o código RASCAL, podemos avaliar e analisar a difusão e migração do UF6 no ar para o cenário estipulado.

**Tabela 3** – Resultados da liberação direta para atmosfera em diferentes distâncias

Distância da liberação (metros)	10	20	50	70	100	200	500
Conc HF – 1h Eq (ppm)	130	130	130	120	100	68	26
Conc HF – Avg (ppm)	780	810	790	790	640	420	160
Deposição HF (g/m <sup>2</sup> )	0,32	0,39	0,60	0,58	0,52	0,35	0,16
Exposição U ((g-s)/m <sup>3</sup> )	270	280	270	250	220	140	56
Inalação U (mg)	88	92	90	83	73	48	19
U CEDE (Sv)	0,0064	0,0067	0,0065	0,0060	0,0053	0,0035	0,0014
Deposição de U (g/m <sup>2</sup> )	0,95	1,2	1,8	1,7	1,5	1,0	0,46

NOTA: Termo fonte = 380 kg de UF6, 4,5% <sup>235</sup>U. Tempo de liberação = 1 hora.

A Fig.2 representa a deposição de U e HF, que para este cenário apresenta um risco direto ao trabalhador, devido aos altos valores associados. Estes valores são refletidos através da Fig. 3, que representa a média da concentração de HF. É claro que altos valores de HF (média) em todas as distâncias simuladas estão acima do permitido, conforme ERPG-2 (ERPG equivalente = 25ppm). Tal fato indica que um operador exposto a distância de até 500 metros do ponto de liberação mesmo protegido, terá uma possível fatalidade devido a estes altos valores de HF. O mesmo se aplica para Concentração equivalente 1hora de HF, que tem seu limite excedido (ERPG-2 = 19ppm).

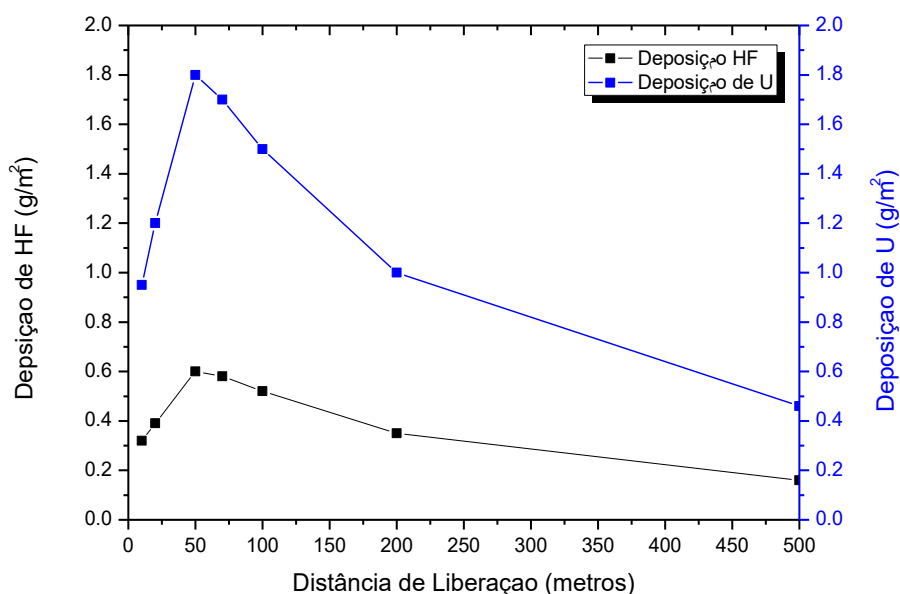


Fig. 2 – Relação entre distância e deposição de U e HF

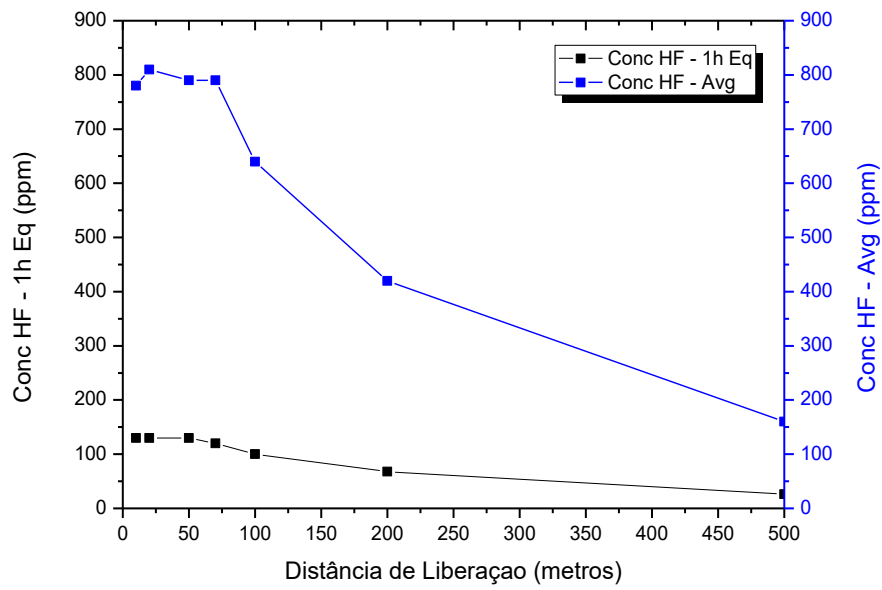


Fig. 3 – Relação entre distância e concentração de HF

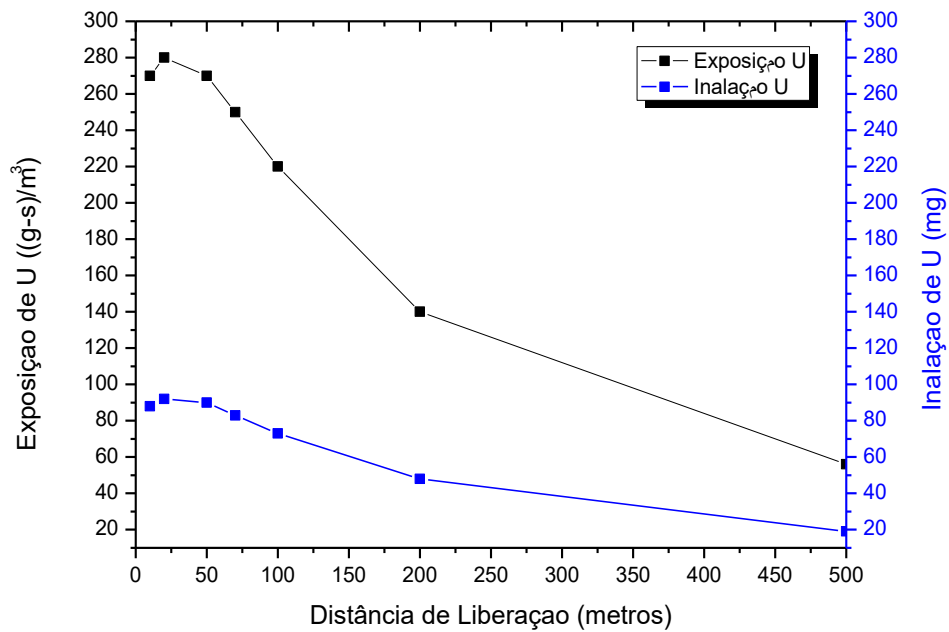


Fig. 4 – Relação entre distância e exposição à radiação e Urânio inalado

#### **4. DISCUSSION**

Pelo fato de a Análise de Risco ter apresentado cenários de severidade catastrófica, conforme relata item 3.1, justifica-se uma análise quantitativa.

#### **5. CONCLUSÃO**

A utilização da metodologia de Análise de Riscos mostrou-se eficaz para o objetivo inicial que era conhecer de forma ampla e qualitativa as características da instalação. A partir dela, foi possível identificar o cenário catastrófico e consequentemente quantificar a severidade.

#### **6. REFERÊNCIAS:**

- [A] NRC, “Standard Review Plan for the Review of a License Application for a Fuel Cycle Facility”, NUREG-1520 Rev.1, (May 2010).
- [B] NRC, “Review of Models Used for Determining Consequences of UF<sub>6</sub> Release”, NUREG/CR-6481, (Nov. 1997).
- [C] NRC, “Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook,” NUREG/CR-6410, (Mar.1998).
- [D] DOE, “Airborne release fractions/rates and respirable fractions for nonreactor nuclear facilities”, DOE-HDBK-3010-94, (Dec.1994).
- [E] CASTRO, J.A. 2002. A multi-Dimensional Transient Mathematical Model of Blast Furnace Based on Multi-Fluid Model. Institute for Advanced Materials Processing. Ph. D. Thesis, Tohoku University, Japan.

CLARIS FRANK, Study of Paper Formation During High Pressure, ASME, US (2015);

- [2] HOUSSIN A., Consequences Release Vessels Setup and Results. Journal of Loss Prevention, US (2016).