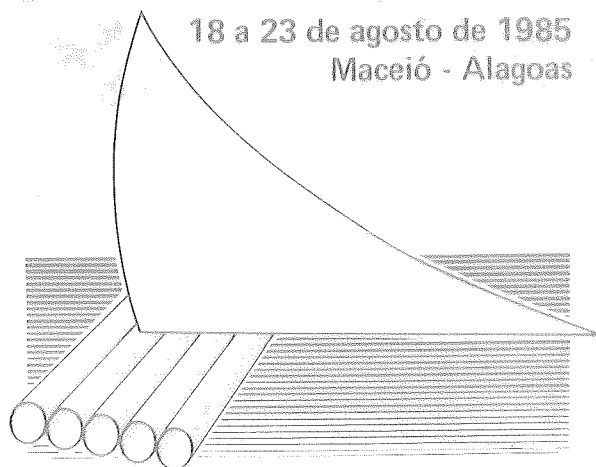


18 a 23 de agosto de 1985
Maceió - Alagoas



ABES -- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA

13^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental

6

ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE RISCOS NUVENS DENSAS

ARQUIVO TECNICO

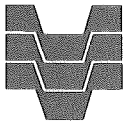
8401
G947a
014225



04493

014225

CETESB



CETESB

Diretor Presidente: Werner Eugênio Zulauf. **Diretor Financeiro:** Paulo Bezerril Junior. **Diretor Administrativo:** Antonio Alves de Almeida. **Diretor de Engenharia:** Nelson Mansour Nabhan. **Diretor de Controle:** Nelson Vieira de Vasconcelos. **Diretor de Planejamento Ambiental:** Fredmar Corrêa. **Diretor de Pesquisa:** Samuel Murgel Branco.

B401
G947a
014225

ESCRITÓRIO CENTRAL

Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345 - Alto de Pinheiros
São Paulo - CEP 05459 - Telefone: (DDD 011) 210-1100
Telex (011) 222-46 - CTS - BR

UNIDADES REGIONAIS E ESCRITÓRIOS

● Estado de São Paulo

Araçatuba: Rua Silva Jardim, 906
Fone: (0186) 23.6838 - CEP 16.100
Araraquara: Av. Espanha, 188
Fone (0162) 32.2211 - CEP 14.800
Bauru: Rua Gerson França, 11-60
Fone: (0142) 23.8466 - CEP 17.100
Campinas: Rua São Carlos, 287
Fone: (0192) 32.3366 - CEP 13.100
Cubatão: Rua Assembléia de Deus, 39 Salas 405 e 407
Fone: (0132) 61.1660 e 611301 - CEP 11.500
Franca: Av. Champagnat, 1808
Fone: (016) 723.9700 - CEP 14.400
Guarulhos: Rua Brás Cubas, 95
Fone: (011) 209.8413 - CEP 07.000
Ipiranga: Rua Caramuru, 573
Fone: (011) 275.7102 - CEP 04138
Marília: Av. Sampaio Vidal, 106
Fone: (0144) 33.8879, 33.8521, 33.8733 - CEP 17.500
Mogi das Cruzes: Rua Prof. Floriano de Melo, 330
Fone: (011) 469.3490 - CEP 08.700
Novo Horizonte: Av. da Saudade, s/n
Fone: (0175) 42.1950 - CEP 14.960
Osasco: Rua Nathanael Titto Salmon, 268
Fone: (011) 801.9736 - CEP 06.000
Piracicaba: Rua Moraes Barros, 264
Fone: (0194) 34.5132 - CEP 13.400
Presidente Prudente: Rua Siqueira Campos, 699
Fone: (0182) 22.1044 - CEP: 19.100
Ribeirão Preto: Rua Amador Bueno, 1294/1302
Fone: (016) 634.6044, 634.4536, 625.9500
- CEP 14.100
Santana: Av. Gal. Ataliba Leonel, 379
Fone: (011) 267.7562 - CEP 02.033
Santos: Rua Itapura de Miranda, 158
Fone: (0132) 33.7127, 32.9550 - CEP 11.100
Santo André: Rua Juquiá, 555
Fone: (011) 444.3519, 444.5767 - CEP.: 09.000
São Bernardo do Campo: Av. Brig. Faria Lima, 360
Fone: (011) 443.4188 - CEP 09700
Sorocaba: Av. Dr. Eugênio Salermo, 157
Fone: (0152) 31.4877, 312065 - CEP 12.100
Tatuapé: Rua Henrique Setório, 221
Fone: (011) 217.7505 - CEP 03.066
Taubaté: Rua Itambé, 38
Fone: (0122) 32.4829, 324900, 32.4867 - CEP 12.100

● Outros Estados

Florianópolis - SC
Rua João Pinto, 6 - 2º andar - s/203
Fone:(0482) 22.7690 - CEP 88.000
Recife - PE
Rua das Fronteiras, 160
Fone: (081) 222.1013 - CEP 50.000

ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE RISCOS: NUVENS DENSAS

Fernando de Araújo Guimarães

Eng.^o Mecânico e Sanitarista

Mestre em Higiene e Doutor em Saúde Pública

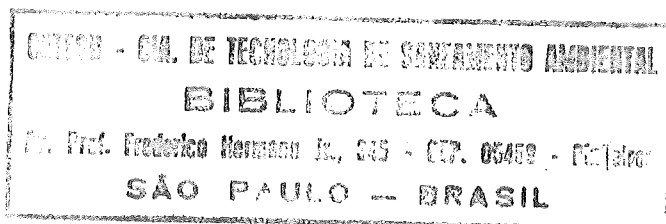
ASSISTÊNCIA DA DIRETORIA DE CONTROLE

Ernesto Ronchini Lima

Eng.^o Mecânico e Sanitarista

Mestre em Higiene

GERÊNCIA DE TECNOLOGIA DO AR



INTRODUÇÃO

Um considerável número de compostos e substâncias simples quando na fase de vapor se apresentam mais pesados que o ar ambiente, quer por possuírem alto peso molecular quer por se encontrarem em baixas temperaturas ou ainda por portarem em seu bojo gotículas líquidas em suspensão. Tais vapores vêm ter à atmosfera em liberações acidentais de grande monta devido a colapsos catastróficos da estrutura de tanques de armazenamento, formando nuvens densas ou são lançados à atmosfera de forma contínua, devido a vazamentos inesperados, vindo a formar plumas densas. Frequentemente tais produtos são tóxicos e ou inflamáveis.

Contrariamente às emissões passivas que ao introduzirem-se no escoamento atmosférico não alteram a estrutura do mesmo¹ e tem a sua propagação regida fundamentalmente pelos fenômenos de turbulência mecânica e térmica, as plumas e nuvens densas sofrem a ação da força gravitacional apresentando um padrão de propagação diferenciado das emissões passivas, especialmente nos instantes imediatamente posteriores à sua formação.

Devido ao fato da poluição do ar estar intimamente ligada ao comportamento das plumas passivas sobre zonas urbanas, este assunto encontra-se bem desenvolvido existindo uma grande quantidade de estudos teóricos e experimentais sobre o tema. O mesmo porém não se pode afirmar quanto à formação e dispersão de nuvens e plumas densas que são de interesse bem mais recente e que somente a partir da década de setenta começaram a ser objeto de pesquisas mais aprofundadas, principalmente nos países europeus.

De forma genérica, as liberações contínuas que levam à formação de plumas densas se particularizam por possuírem grande quantidade de movimento, persistirem por tempo relativamente longo e atingirem o meio ambiente através de uma abertura definida. Embora a questão de uma emissão vir ou não a ser adjetivada como densa dependa da própria característica do material em evolução ou do estado termodinâmico em que se encontre, situações acidentais, tais como, a operação de um "Flare" com a chama piloto apagada, descargas de válvulas de alívio e discos de ruptura, bem como, avarias ou rompimento de conexões, válvulas e tubulações podem bem exemplificar casos de liberação de produtos à atmosfera onde pode ser regis-

CLASS.	8401
A	6.947a
B	14.225

trada a ocorrência de pluma densa. Os mecanismos envolvidos na formação e mistura inicial desta classe de emissões estão regidos pelas considerações teóricas que descrevem o comportamento dos jatos livres².

As liberações instantâneas e de larga escala que dão origem à formação de nuvens densas são resultantes do rompimento catastrófico de reservatórios inclusive caminhões - tanque. Os modelos de análise de riscos para este tipo de liberação apresentam grande complexidade e uma razoável dose de empirismo, incorporando conforme o caso rotinas para cálculos relativos a vaporização por flasheamento, escoamento crítico, deflagração de misturas explosivas, propagação de onda de choque, velocidade de propagação de chama, intensidade de calor radiante, etc... Em sua grande maioria os modelos baseiam-se na solução de um sistema de equações diferenciais cuja solução numérica exige o uso de microcomputadores.

Adicionalmente ao acima exposto, seja qual for o tipo de emissão densa (plumas ou nuvens) a contínua diluição com o ar ambiente em sua trajetória de dispersão resultará, em um certo instante, na transição do caráter denso para um caráter neutro e posteriormente passivo³ resultando que os modelos de análise de risco sempre associam um modelo para misturas passivas devidamente relacionado com o modelo denso para prosseguimento da análise de risco além do ponto de transição, no sentido de propagação.

Não há mais como ignorar o risco inerente das operações industriais de estocagem, manipulação e transporte de produtos tóxicos e inflamáveis. Infelizmente, a própria experiência brasileira tem demonstrado este fato numa sucessão de acontecimentos que vem a confirmar que o comprometimento da segurança industrial está extrapolando suas fronteiras e atingindo a comunidade com frequência. O presente trabalho visa abordar o tema de forma geral e sem maior profundidade com a finalidade de informar os aspectos principais do problema, os modelos aplicados e a respectiva bibliografia.

FORMAÇÃO DE NUVENS DENSAS

Os produtos que são estocados e ou transportados em fase líquida quer por meio de pressurização quer por refrigeração e isolamento associado ou ainda por combinação destas técnicas, são os que maior importância têm em uma análise de riscos. Seguem-se os reservatórios que contenham gases de alto peso molecular ou gases a baixas temperaturas.

No rompimento catastrófico de reservatórios pressurizados dois fenômenos importantes intervêm: vaporização por flasheamento e emissão da fração líquida sob a forma de gotículas. A vaporização por flasheamento se dá com a equalização súbita de pressões provocada pelo rompimento. O calor perdido pela fase líquida, que previamente se encontrava à temperatura ambiente, resfria a mistura até seu ponto de ebulição, já sob equilíbrio de pressões. O vigor do processo de ebulição, desenvolvido em larga escala, fragmenta e lança à atmosfera a fração líquida residual sob a forma de gotículas de pequena velocidade terminal.

No caso de avarias menores nos reservatórios pressurizados, a perda de material em fase líquida para a atmosfera será função da magnitude e posição relativa da abertura acidental em relação à altura inicial da superfície líquida no interior do reservatório. Segundo Kaiser e Walker³ uma abertura ainda que pequena sob o nível do líquido, no caso amônia, é suficiente para provocar o lançamento expressivo da fração líquida para a atmosfera. Contrariamente, uma pequena abertura razoavelmente acima do nível de líquido resulta em uma emissão de fração líquida virtualmente nula.

No caso de rompimento catastrófico de tanques refrigerados, a fase líquida, previamente mantida próxima a sua temperatura de saturação sob pressão atmosférica, será derramada e formará uma poça ou piscina sobre o terreno. A transferência de calor da superfície para o líquido derramado traz o mesmo à situação de ebulição com conseqüente vaporização e liberação de gotículas para a atmosfera face ao borbulhamento formado na superfície do líquido⁴. A magnitude da intervenção de cada fenômeno em termos de massa liberada para o meio

ambiente tem sido objeto de simulações em escala reduzida envolvendo diferentes formas de armazenamento de gases liquefeitos e situações acidentais.

A liberação repentina da vapores densos e da fração líquida aerossolizada para a atmosfera gera, inevitavelmente, uma indução turbulenta de ar circunvizinho no fluxo de descarga formando uma mistura gasosa com gotículas em suspensão, que é a própria nuvem densa em seu estado nascente. Tal nuvem paira imediatamente sobre o reservatório avariado envolvendo-o. A sua geometria, a razão de diluição que incorpora e conseqüentemente a sua temperatura são estimadas a partir de descrições pormenorizadas de testemunhas oculares do acidente e pelos resultados experimentais de pequena escala previamente existentes.

A dispersão de nuvens densas

Pelas razões até aqui expostas, torna-se simples concluir que a dispersão de nuvens densas não seguem os modelos tradicionalmente utilizados. Ao contrário, sua persistência junto ao solo quando os poluentes são emitidos de pequenas alturas, ou sua tendência descendente acentuada, quando a emissão se dá por chaminés em condições de grande estabilidade atmosférica, representam sua principal característica, e, como tal, devem ser modeladas.

Assim, numa fase inicial a componente gravitacional destas nuvens é preponderante, e, apenas após uma diluição, suficiente para levar sua densidade a valores próximos da densidade da atmosfera, é que seu comportamento torna-se passivo e a dispersão turbulenta passa a predominar.

Van Ulden⁵ seguido por vários outros pesquisadores^{6,7,8}, desenvolveram e aperfeiçoaram modelos e teorias para tentar representar o comportamento físico de nuvens densas. Além disto, critérios para a passagem da fase densa para a fase passiva foram sugeridos.

De forma simplificada, a teoria envolve uma equação para o movimento gravitacional descendente, relações para quantificar a entrada do ar de diluição e relações de mistura e transferência de calor. Estas equações resolvidas conjuntamente fornecem a solução da dispersão na fase densa. Ooms⁹ concentra-se na dispersão de emissões de substâncias mais densas que o ar emitidas na forma de jatos, enquanto Meroney¹⁰ apresenta um enfoque teórico para emissão de substâncias densas através de chaminés e ao nível do solo, incluindo o efeito de barreiras físicas e rugosidade do solo.

As alternativas, como já citado, são várias, e a cada conjunto de formas de emissão pode corresponder um modelo diferente para a dispersão da pluma ou nuvem densa. Em quase todos os casos, no entanto, pelo menos são distintas duas fases, a densa e a passiva. Ainda que a passagem não ocorra de forma brusca, vários dos modelos disponíveis fazem-na como tal. Dentre os critérios utilizados para determinar esta mudança de fase, pode-se destacar

- valor limite de densidades: neste caso utiliza-se a relação abaixo para indicar o ponto de transição entre a fase densa gravitacional e a fase densa de transporte junto ao solo

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_a} \leq 0,001$$

$$\Delta\rho = \rho_g - \rho_a$$

sendo ρ_g - densidade da nuvem

ρ_a - densidade do ar

- valor limite do número de Richardson :
o número de Richardson é usado para indicar o ponto de transição entre a fase densa e a fase passiva de dispersão da nuvem.

$$RI = \frac{g \ell \Delta \rho}{\rho_a U_1^2} < 0,5$$

sendo : g - aceleração da gravidade (m/s)

ℓ - dimensão característica da escala (m)

U_1 - velocidade turbulenta longitudinal (m/s)

Van Ulden⁵ propôs o valor de 0,5 para limite do número de Richardson. Outros autores utilizam-se do valor 1,0, enquanto vários modelos fazem a transição suave de uma fase para outra.

Outros critérios baseados na diferença das densidades da nuvem e do ar ou na comparação entre as dimensões da nuvem e o espalhamento horizontal de plumas Gaussianas (σ_y), são utilizados por outros pesquisadores, porém, os apresentados são os mais utilizados.

A fase gravitacional segundo Van Ulden⁵ é explicada por

$$\frac{dR}{dt} = c \sqrt{\frac{(\rho - \rho_a) g H}{\rho}}$$

onde : R - Raio ou dimensão horizontal da nuvem

t - tempo após liberação

H - dimensão vertical da nuvem

c - coeficiente = 1 (outros sugerem 1 a 2)

A densidade variará no tempo com o aquecimento da nuvem e com a introdução de ar de diluição

$$\frac{dm_a}{dt} = \alpha_1 RH \rho_a \frac{dR}{dt}$$

m_a - massa de ar

α_1 - parâmetro de entrada de ar

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\frac{dm_a}{dt} C_{p_a} \Delta T_a + (\pi R^2) (\Delta T_g)^{4/3}}{m_a C_{p_a} + m_c C_{p_c}}$$

T - Temperatura da nuvem

$$\Delta T_a = T - T_a$$

T_a - temperatura do ar

$$\Delta T_g = T - T_s$$

T_s - temperatura do solo

C_{p_a} - calor específico do ar

C_{p_c} - calor específico do contaminante

m_c - massa do contaminante na nuvem

A solução conjunta destas equações fornece a variação das dimensões da nuvem com o decorrer do tempo. O valor da variação da concentração do contaminante com o tempo na fase densa é então calculada assumindo-se distribuição Gaussiana ou "Top hat" dentro da nuvem.

Após a passagem para a fase de dispersão passiva, a transição para um modelo Gaussiano, "puff" ou contínuo, conforme o caso em pauta, se faz necessária.

COMPARAÇÃO COM O MODELO GAUSSIANO

Se, ao invés de utilizar-se o conjunto de equações que governam a fase densa, fosse utilizado um modelo Gaussiano para descrever o comportamento da nuvem, os valores encontrados sub-dimensionariam as dimensões da mesma. Em um rápido exercício para uma nuvem de amônia liberada por rompimento catastrófico de um vaso sob pressão, foi construída a Tabela nº 1 comparando as dimensões da nuvem para cada um dos casos. Para a realização do exercício as equações utilizadas foram programadas num microcomputador TK-2000 para promover os cálculos necessários

TABELA 1 - Comparação de Modelos de Dispersão (1)

DISTÂNCIA (m)	CONCENTRAÇÃO APROXIMADA (2) (PPM)				RAIO APROXIMADO DA NUVEM (2) (m)			
	MOD. A	MOD. B	MOD. C	MOD. D	MOD. A	MOD. B	MOD. C	MOD. D
60	97500	16700	87200	18300	120	26	66	24
110	82000	7200	34800	7800	150	27	116	25
150	63400	4500	21500	4900	180	28	146	26
200	45000	2850	8700	3000	200	30	217	28
300	14600	1400	2700	1500	250	35	350	33
360	6350	980	1400	1050	270	38	450	36
510	3230	480	370	500	300	45	740	45
750	2410	210	80	210	350	60	1320	59
900	2000	140	-	140	370	69	-	68
1050	1700	100	-	100	400	78	-	77
1200	1430	70	-	70	420	87	-	87
2010	680	-	-	-	560	-	-	-
2500	500	-	-	-	620	-	-	-

(1) Em todos os modelos : velocidade do vento 3 m/s; rugosidade 1000 mm; temperatura do ar 25°C; estabilidade Pasquill D; liberação de 20 ton. de amônia líquida feita sob pressão de 10 Kg/cm²; concentração inicial do puff 5%.

(2) Modelo A : Kaiser para nuvem densa

Modelo B : Puff Gaussiano com densidade 0,72/cm³ e 30°C

Modelo C : Nuvem cilíndrica densa com densidade 1,18 g/cm³ e - 33°C

Modelo D : Puff Gaussiano com densidade 1,18 g/cm³ e - 33°C

MODELOS EXISTENTES

Com a crescente importância que vem sendo dada a fontes não tradicionais de emissões acidentais de poluentes atmosféricos, a partir de 1970 e dos trabalhos de Van Ulden⁵, vários modelos têm sido desenvolvidos e alguns testados, para representar a formação e dispersão de nuvens densas. Trabalhos publicados por Hanna², Blackmore et al¹¹ e Woodward¹² enfocam e comparam vários dos modelos existentes.

Em linhas gerais os modelos cronologicamente podem ser enquadrados em tres tipos básicos¹³

- Primeiros Modelos (quase Gaussianos)
 - Burgess (1970, 1972, 1974)
 - Drake (1974)
 - Fay e Lewis (1975)
- Modelos "Box" avançados
 - Germeles e Drake (1975)
 - Eidsvik (1980)
 - Fryer e Kaiser (1979)
 - Flothmann e Nikodem (1980)
 - Colebrande (1980)
- Modelos numéricos
 - Sigmet (1978)
 - Hegas (1979)
 - Versões melhoradas dos modelos Sigmet-N e Mariah
 - Modelo do Lawrence Livermore Laboratory
 - Von Karman Institute (1981)

Os primeiros modelos, sem dúvida, levam a resultados errôneos ao tratar de forma Gaussiana a dispersão de nuvens densas. O problema essencial nos modelos numéricos é o tratamento adequado da difusão turbulenta vertical. Sua maior complexidade e demanda de tempo de processamento, limitam sua utilização para os casos onde se exige maior rapidez e simplicidade.

Ao final, vale ressaltar que, qualquer que seja o modelo escolhido, a quantidade emitida é um parâmetro fundamental para alimentá-los. Assim, as teorias formas e condições de como ocorrem as emissões, determinam suas quantidades e características que influirão, decisivamente, nos resultados da aplicação do modelo de dispersão escolhido¹⁴.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A avaliação do risco ambiental causado pela possibilidade de ocorrência de emissões acidentais, envolve o imprescindível conhecimento de uma tecnologia relativa à formação e dispersão de nuvens densas, apenas recentemente desenvolvida a partir dos anos 70. A CETESB, diante da necessidade premente de exercer a prevenção e o controle de emissões acidentais vem se dedicando a adquirir e adptar esta tecnologia, cujo uso primeiro dar-se-á na Região do Município de Cubatão.

Os modelos de dispersão de nuvens densas servem a melhor explicar seu comportamento, uma vez que modelos Gaussianos fornecem resultados errôneos que levam a erros na estimativa dos efeitos adversos esperados, e na avaliação das áreas atingidas. O presente trabalho objetiva tão somente fazer uma apresentação superficial do assunto e sugere as referências citadas como material básico para dar início a compreensão do fenômeno da formação e dispersão de nuvens mais densas que o ar.

Pelos motivos expostos, a CETESB paulatinamente estará divulgando seus avanços no assunto através de publicações específicas.

Finalmente vale ressaltar mais uma vez que emissões acidentais não são privativas apenas de áreas poluídas, mas podem ocorrer em qualquer local onde se transporte, armazene ou se utilize grandes quantidades de substâncias de alta toxicidade, explosivas ou inflamáveis.

As características destas emissões acidentais já relatadas são de forma a, frequentemente, acarretar efeitos adversos de grande dramaticidade. É pois essencial, o conhecimento de sua fenomenologia como um todo, especialmente a formação e dispersão de nuvens densas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. QUAID, J.Mc. "Dispersion of Heavier - than Air Gases in the Atmosphere : Review of Research and Progress report on HSE Activities". *Health and Safety Executive - Technical paper 8*, 1979.
2. HANNA, STEVEN R. "A Survey of Emergency Models and Applications - Part I . Models Developed for Hazardous Spills Applications". Paper 83-26.1, 76th APCA Annual Meeting. Atlanta, Jun. 19-24, 1983.
3. KAISER, G.D. and B.C. Walker. "Releases of Anhydrous Ammonia from Pressurized Containers - the Importance of Denser-than-Air Mixtures". *Atmospheric Environment* vol. 12 pp. 2289, 1978.
4. BRITER, R.E. and R.F. Griffiths. "The Role of Dense Gases in the Assessment of Industrial Hazards". *Journal of Hazardous Materials* (6), 3-12, 1982.
5. VAN ULDEN, A.P. "On the Spreading of a Heavy Gas Released near the Ground". *Proc. First Int. Loss Prevention Symp.* : 431-434, 1974.
6. GERMELES, A.E. and Drake, E.M. "Gravity Spreading and Atmospheric Dispersion of L.N.G. Vapor Clouds". *Proc. Fourth Int. Symp. on Transport of Hazardous Cargoes by Sea and Inland Waterway*: 519-39, U.S. Coast Guard, Wash. D.C., 1975.
7. FAY, J.A., Ranck, D.A. "Comparison of Experiments on Dense Gas Cloud Dispersion *Atm. Envir.* vol. 17, nº 2, 1983.
8. Cox, R.A. and Roe, D.R. "A Model of the Dispersion of Dense Vapor Clouds". *Proc. 2nd Int. Symp. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*. Heidelberg, 1977.
9. OOMS, G. et al. "The Plume Path of Vent Gases Heavier than Air". *1st Int. Loss Prevention Symp.* The Hague/Delft, 1974.
10. MERONEY, R.N.M. "Wind Tunnel Experiments on Dense Gas Dispersion". *J. Hazardous Materials*, 6, 1982.
11. BLACKMORE, D.R. et al. "Heavy Gas Dispersion Models". *J. Hazardous Materials*, 6, 1982.
12. WOODWARD J.L. et al. "A Comparison with Experimental Data of Several Models for Dispersion of Heavy Vapor Clouds". *J. Hazardous Materials*, 6, 1982.
13. SCHNATZ et al. "Investigation of Energy Fluxes in Heavy Gas Dispersion". in :*Heavy Gas and Risk Assessment*, vol. II by Sylvius Hartwig (ed.). D. Reidel Public. Co., 1983.

14. GRIFFITHS, R.F., Kaiser G.D. "The Accidental Release of Anhydrous Ammonia to the Atmosphere". UK. Atomic Energy Authority Report SRD-R154, 1979.

Date Acq'd: 30/7/85
Indic.:
Library:
Price: £1.00
Date Rec'd: 30/7/85