

Е.В. Ширяев, В.П. Назаров

(¹Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

²Академия ГПС МЧС России; e-mail: shiryaev@bk.ru)

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКИ НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТА ПРИ ЕГО АВАРИЙНОМ ПРОЛИВЕ

Проведён анализ экспериментальных исследований горения нефтепродукта с плавающей гранулированной пеностеклянной подложкой. Описан процесс огнепреграждения с применением гранулированных материалов. Обосновано снижение геометрических и термодинамических параметров пламени.

Ключевые слова: нефтепродукт, гранулированная подложка, аварийный пролив.

E.V. Shirjaev, V.P. Nazarov

INFLUENCE OF THE GRANULATED SUBSTRATE ON THE PROCESS OF COMBUSTION OF OIL PRODUCTS DURING ITS EMERGENCY SPREAD

The analysis of experimental studies of combustion of oil floating granulated foam glass substrate was carried out. The process of fire-block with the use of granular materials was described. The reduction of the geometrical and thermodynamic parameters of the flame was justified.

Key words: oil product, granular substrate, emergency strait.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 24 марта 2017 г.

Снижение воздействия опасных факторов пожара при аварийных проливах нефтепродуктов может быть достигнуто за счёт применения гранулированного пеностекла.

Как показали экспериментальные исследования горения нефтепродукта, гранулированная подложка из пеностекла существенно влияет на процесс горения – снижает геометрические и термодинамические параметры пламени, а также влияет на зоны прогрева металлической ёмкости по высоте [1, 2]. В этих исследованиях использовались образцы гранулированного пеностекла различных фракций (рис. 1).

Экспериментальные исследования

Благодаря низкой насыпной плотности ($150-300 \text{ кг/м}^3$) и низкой гигроскопичности (4-8 %) подложка из гранулированного пеностекла способна держаться на поверхности пролива при высоте разлива нефтепродукта на ограниченной поверхности, превышающей высоту гранулированного слоя [3]. На рис. 2-5 показаны положения гранулированных подложек в ёмкостях ($d = 15 \text{ см}$; $h = 15 \text{ см}$) с водой и бензином АИ-92. Негорючесть, высокая термостойкость пеностекла создают возможность для подложки находиться в течение длительного времени (до полного выгорания горючей жидкости) на поверхности горящего нефтепродукта.

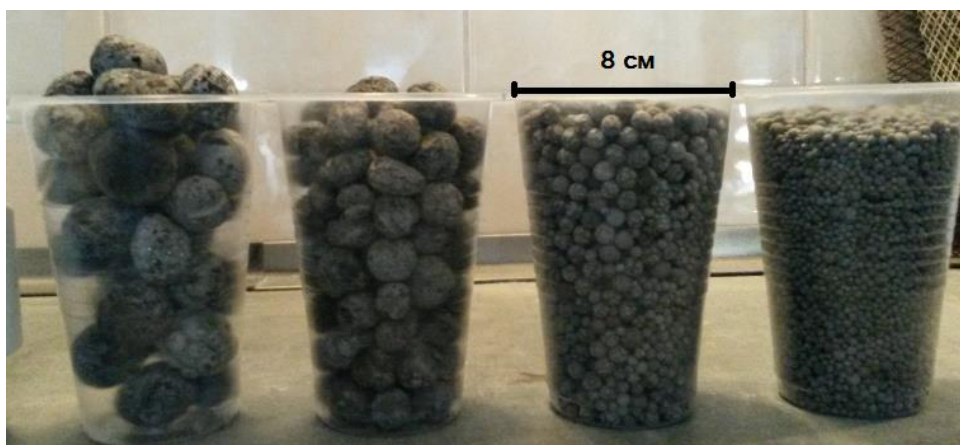


Рис. 1. Образцы гранулированного пеностекла различных фракций (фракция, слева направо: Φ -20-30 мм, Φ -10-20 мм, Φ -5-7 мм, Φ -1-5 мм)



Рис. 2. Подложка ($h = 7$ см, Φ -20-30 мм) в воде



Рис. 3. Подложка ($h = 7$ см, Φ -20-30 мм) в бензине АИ-92



Рис. 4. Подложка ($h = 7$ см, Φ -10-20 мм) в воде

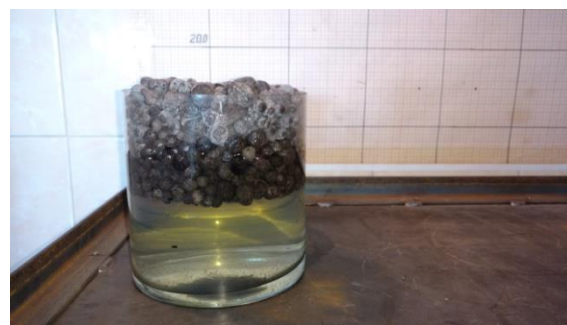


Рис. 5. Подложка ($h = 7$ см, Φ -10-20 мм) в бензине АИ-92

На рис. 2-5 видно, что нижняя часть гранулированной подложки из пено-стекла частично погружена в нефтепродукт, а верхняя – остаётся сухой, свободной от нефтепродукта.

При воспламенении паров нефтепродукта теплопередача от поверхностного слоя к нижележащим слоям происходит по принципу теплопроводности и ламинарной конвекции. Прогрев жидкости осуществляется на глубину в несколько сантиметров. На рис. 6 показана термограмма горения бензина АИ-92 в цилиндрической ёмкости (диаметр ёмкости – 150 мм, высота ёмкости

– 100 мм, толщина стенки – 3 мм). На рис. 7 показана термограмма горения бензина АИ-92 в цилиндрической ёмкости с плавающей гранулированной пеностеклянной подложкой фракции Ф-5-7 мм и высотой 70 мм с такими же параметрами ёмкости, как на рис. 6.

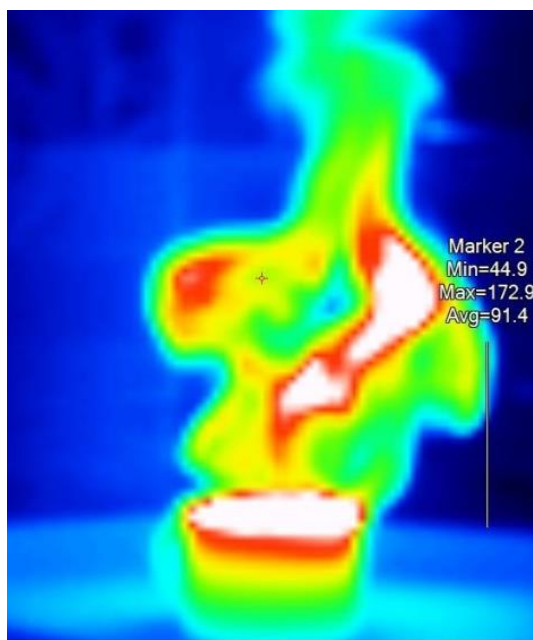


Рис. 6. Термограмма горения бензина АИ-92 в цилиндрической ёмкости

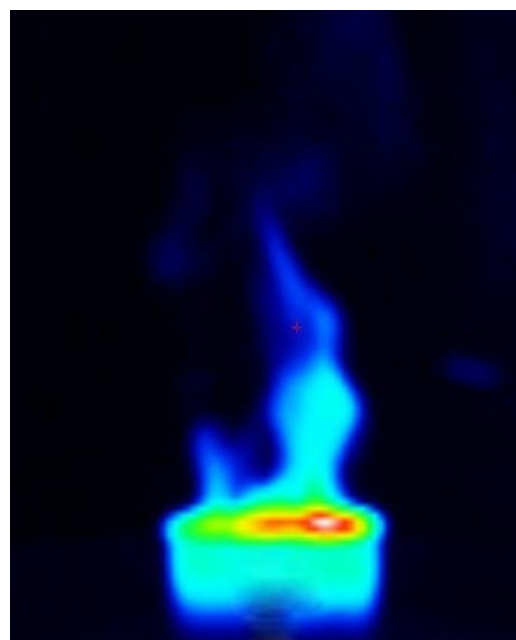


Рис. 7. Термограмма горения бензина АИ-92 в цилиндрической ёмкости с плавающей гранулированной пеностеклянной подложкой

На рис. 6 и 7 температурное поле белого цвета соответствует температуре $t > 360\text{ }^{\circ}\text{C}$, красного – $t = 360\text{ }^{\circ}\text{C}$, жёлтого – $t = 270\text{ }^{\circ}\text{C}$, зелёного – $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, синего $t \sim 40\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$, чёрного – $t = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис 6 очевидно преобладание оттенков белого, красного, жёлтого и зелёного цветов в контуре пламенного горения нефтепродукта, а также преобладание синего цвета за контуром пламени. Термограммы рис. 6, 7 показывают не только значительные отличия геометрии температурных полей, но и характера горения. На рис. 6 видны "отрывы" пламени (температурные поля белого и красного цветов не связаны с поверхностью горения нефтепродукта), что говорит о турбулентном характере горения нефтепродукта. На рис. 7 характер горения нефтепродукта – ламинарный.

Температурные поля в очаге горения нефтепродукта отличаются на обоих рисунках. На рис. 6 температура пламени на границе зеркала нефтепродукта и пламенного свечения более $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($360\text{ }^{\circ}\text{C}$ – верхняя граница температуры, определяемая тепловизором Fluke Ti20), источник [4] указывает, что температура на этой границе может достигать $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ниже границы температурного поля белого цвета идет граница жёлтого и зелёного цветов соответственно. При этом температура этих границ выше температуры кипения бензина АИ-92

($t_{\text{кип}} = 90 \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Термограммы показывают температуру на стенке очага горения нефтепродукта, это объясняет нагрев стенки до температуры, превосходящей температуру кипения бензина АИ-92. На рис. 7 температурные области белого, красного, жёлтого, зелёного цветов расположены на поверхности гранулированной подложки, которая в несколько раз меньше по площади, чем на рис. 6. Стенка ёмкости в экспериментах не прогревалась до температур, превосходящих температуры кипения нефтепродукта: во-первых, за счёт меньшей высоты и площади основания пламени, во-вторых, за счёт гранулированной подложки из теплоизоляционного материала.

Процесс огнепреграждения

Процесс огнепреграждения основан на теории распространения пламени и описан в работе [5]. Согласно этой теории, пламя (зона реакции) распространяется в исходную, холодную горючую смесь вследствие того, что между пламенем и холодной смесью имеется градиент температуры и концентраций. Тепло из зоны реакции, благодаря теплопроводности, распространяется в свежую смесь и нагревает её. Происходит также диффузия продуктов реакции и активных частиц из зоны реакции и активных частиц из зоны реакции в исходную смесь и из исходной смеси в зону реакции. Таким образом, в нагретой смеси и разбавленной активными частицами и продуктами реакции смеси начинается химическая реакция, которая перемещается в направлении исходной смеси.

Гашение пламени в узких каналах имеет тепловую природу. Поскольку передача тепла из зоны реакции в исходную смесь является основным процессом, вследствие которого пламя распространяется по смеси, то очевидно, что отдача тепла непосредственно из зоны реакции стенкам канала и отток тепла в охлаждающиеся продукты реакции являются процессами, тормозящими распространение пламени. Потери тепла в стенки канала вызывают понижение температуры горения в зоне реакции, растяжение этой зоны, увеличение времени протекания реакции и уменьшение скорости распространения пламени. В работе [6] показано, что при уменьшении диаметра канала увеличивается его поверхность на единицу массы реагирующей смеси, то есть возрастают тепловые потери из зоны реакции на единицу массы смеси. Вместе с тем уменьшение диаметра гранул пеностекла приведёт к увеличению насыпной плотности и погружению части гранул под слой нефтепродукта, что будет снижать эффект огнепреграждения.

Пламя теряет способность распространяться, когда температура пара в области фронта пламени понижается до определённой критической величины. Отвод тепла от пара в узком канале обеспечивается теплопроводностью пара. Выделение же тепла во фронте пламени определяется скоростью и кинетикой химической реакции горения. Интегральной характеристикой процесса горения является нормальная скорость распространения фронта пламени.

В качестве универсальной безразмерной характеристики соотношения динамики этих двух процессов – процессов выделения и отвода тепла – принято использовать критерий Пекле:

$$Pe = \frac{u \cdot d \cdot c_p \cdot P}{\lambda \cdot R \cdot T}, \quad (1)$$

где u – нормальная скорость распространения пламени;
 d – диаметр канала огнепреграждающего элемента (гранул пеностекла);
 c_p – теплоёмкость горючей смеси при постоянном давлении;
 P – давление горючей смеси;
 R – универсальная газовая постоянная;
 T – начальная температура горючей смеси;
 λ – теплопроводность горючей смеси.

Исходя из того, что критерий Пекле на пределе гашения пламени в огнепреградителях является величиной постоянной, можно найти величину критического диаметра гранулированного пеностекла по формуле:

$$d_{кр} = \frac{Pe_{кр} \cdot \lambda \cdot R \cdot T}{\omega_n \cdot c_p \cdot P}, \quad (2)$$

где $Pe_{кр}$ – критерий Пекле на пределе погасания пламени, равный 65, определяемый по формуле:

$$Pe_{кр} = \frac{\omega_n \cdot d_{кр}}{a}, \quad (3)$$

где ω_n – нормальная скорость распространения пламени, м/с;
 $d_{кр}$ – критический диаметр канала насадки огнепреградителя, м;
 a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Многочисленными экспериментами установлено, что на пределе гашения пламени в узких каналах критерий Пекле принимает постоянное значение, приблизительно равное 65. Если условия в пламегасящих каналах огнепреградителя характеризуются критерием Пекле $Pe > 65$, то огнепреградитель неэффективен, и наоборот, если $Pe < 65$, то огнепреградитель работает удовлетворительно, то есть не пропустит пламя.

Условие постоянства критерия Пекле, составленного из нормальной скорости пламени и теплофизических параметров горючей смеси на пределе гашения пламени в узких каналах, теоретически получено, исходя из ряда допущений и упрощений, поэтому оно в принципе является приближенным. Экспериментальная проверка этого принципа тоже дает весьма существенный разброс количественных результатов. Поэтому, используя это условие в качестве научной основы методики расчёта эффективности сухих огнепреградителей, в расчётные формулы вводят коэффициент запаса, равный 2, то есть безопасное значение критерия Пекле принимается равным 32,5 [7].

Нераспространение пламени в узких каналах гранулированной подложки возможно ещё при важном условии: если уровень взлива нефтепродукта не превышает высоты сухого слоя гранул, кратной 100 диаметрам канала гранулированной подложки. Согласно [8], для огнепреградителей с гранулированными насадками рекомендуется, чтобы высота слоя насадки огнепреградителя превышала диаметр её канала не менее, чем в 100 раз.

Безопасный диаметр канала слоя огнепреградителя, с учётом коэффициента безопасности, $K_{\sigma} \geq 2$:

$$d = \frac{\delta_{\text{кр}}}{K_{\sigma}}. \quad (4)$$

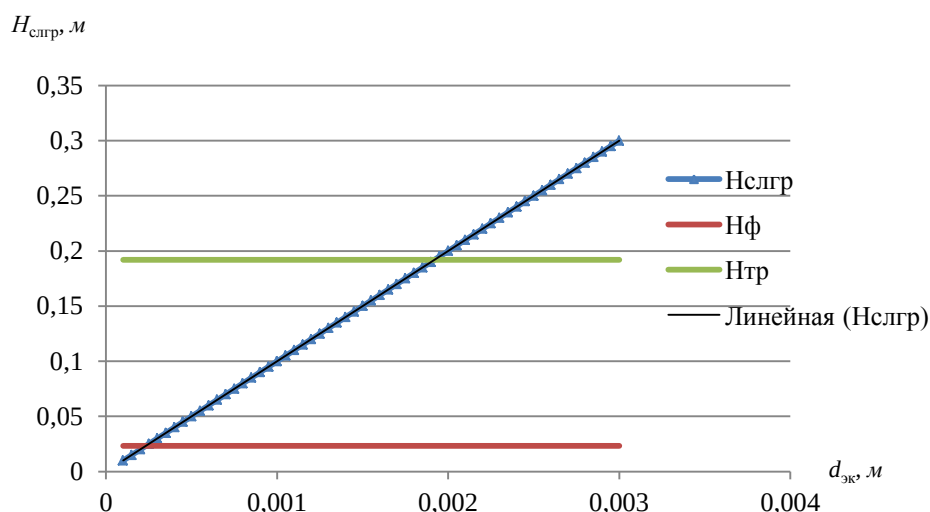
Результаты оценки параметров огнепреградителя для бензино-воздушной смеси, фактических и требуемых параметров гранулированной подложки сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты оценки параметров огнепреградителя и гранулированной подложки для бензино-воздушной смеси

Параметр	Расчёт для огнепреградителя	Расчётное значение	Фактическое значение
Безопасный диаметр канала слоя огнепреградителя, m	$2,097 \cdot 10^{-3}$	-	-
Диаметр гранул, m	$2,795 \cdot 10^{-3}$	-	$6,0 \cdot 10^{-3}$
Эквивалентный диаметр огнегасящих каналов в слое гранул, m	$1,636 \cdot 10^{-3}$	$1,918 \cdot 10^{-3}$	-
Высота слоя гранул в огнепреградителе / высота сухого слоя гранулированной подложки, m	0,164	0,192	0,023
Свободный объём, ϵ , %	0,5	0,47	-
Удельная поверхность S , m^2/m^3	1150	980	-

График зависимости высоты слоя гранулированной подложки от эквивалентного диаметра огнегасящих каналов в соотношении с фактической и требуемой высотами сухого слоя гранулированной подложки представлен на рис. 8.



$H_{\text{слгр}}$ — высота сухого слоя гранулированного материала;
 $H_{\text{ф}}$, $H_{\text{тр}}$ — фактическая и требуемая высота сухого слоя гранулированного материала соответственно;
 $d_{\text{эк}}$ — эквивалентный диаметр огнегасящих каналов

Рис. 8. График зависимости высоты слоя гранулированной подложки от эквивалентного диаметра огнегасящих каналов

На графике (рис. 8) видно, что в точке пересечения линии $H_{тр}$ с линией $H_{слгр}$ геометрические параметры (эквивалентный диаметр огнегасящих каналов и высота сухого слоя) гранулированной подложки обеспечивают эффект гашения пламени. В точке пересечения линии $H_{ф}$ с линией $H_{слгр}$ обеспечивается условие гашения пламени в узких каналах гранулированной подложки, при этом $d_{эк} = 2,258 \cdot 10^{-4}$ м. Однако $d_{эк}$, полученный расчётным путём, существенно меньше $d_{эк} = 1,918 \cdot 10^{-3}$ м, поэтому при проведении экспериментов наблюдается горение на поверхности гранулированной подложки. Для создания условий нераспространения пламени через слой гранул в гранулированной подложке необходимо увеличивать высоту сухого слоя, при этом будет увеличиваться и высота слоя, находящегося в нефтепродукте. Экспериментальные исследования показали, что высота сухого слоя для фракции гранул Ф-5-7 мм составляет 50 % от высоты слоя, находящегося в нефтепродукте. Расчётное значение высоты сухого слоя ($H_{тр} = 0,192$ м), при котором проскок пламени исключается, общая высота гранулированной подложки будет составлять $H_{слгр} = 0,576$ м.

Проведённые эксперименты показали, что можно существенно снизить геометрические и термодинамические параметры пламени при горении нефтепродукта с гранулированной подложкой на ограниченной поверхности. Расчётные значения высоты сухого слоя гранулированной подложки, а также общей высоты гранулированной подложки, при которых исключается проскок пламени в узких каналах гранулированной подложки, требуют проверки опытным путём.

Литература

1. Огнезащитный эффект гранулированной пеностеклянной подложки при углеводородном пожаре пролива / Ширяев Е. В., Рубцов Д. Н., Назаров В. П., Булгаков В. В. // Безопасность жизнедеятельности. № 4, 2016. С. 33-37.
2. Назаров В. П., Гилетич А. Н., Коротовских Я. В. Оценка исходных данных для прогнозирования опасности воспламенения и горения углеводородной плёнки на поверхности воды // Технологии техносферной безопасности. Вып. 4 (44). 2012. 5 с. <http://academygps.ru/ttb>.
3. ТУ 5914-001-15068529-2006. Универсальный пористый материал термоизоляционный УПМ "Термоизол".
4. Абдурагимов И. М., Говоров В. Ю., Макаров В. Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980.
5. Зельдович Я. Б. Теория предела распространения тихого пламени // ЖЭТФ. № 1. Т. 11, 1941. С. 159-169.
6. Принципы конструирования коммуникационных огнепреградителей, используемых для снижения риска крупных пожаров на объектах нефтегазового комплекса / Хорошилов О. А., Котов И. Ю., Потеряев Ю. К., Мамонтов В. В. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. №2, 2011. С. 22-27.
7. Алексеев М. В. Основы пожарной профилактики в технологических процессах производств. М.: Высшая школа МВД СССР, НИИРИО, 1972. С. 120-146.
8. ГОСТ Р 12.3.047-98. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
9. Marshall V. C. Major chemical hazards / published by Ellis Horwood, Chichester, 1987. 587 p.
10. Van den Bosch C.J.H., Weterings R.A.P.M. (Eds). Methods for the calculation of physical effects // Yellow book CPR 14E (Part 2). Sdu Uitgevers, The Hague, 1997, Pp. 6.17-6.138.

References

1. Ogneshhitnyj jeffekt granulirovannoj penostekol'noj podlozhki pri uglevodorodnom pozhare proliva (The fire retardant effect of granulated foam glass substrate with the hydrocarbon fire of strait) / Shirjaev E. V., Rubcov D. N., Nazarov V. P., Bulgakov V. V. // Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti. No 4, 2016. Pp. 33-37.
2. Nazarov V. P., Giletich A. N., Korotovskih Ja. V. Ocenka ishodnyh dannyh dlja prognozirovaniya opasnosti vosplamenenija i gorenija uglevodorodnoj pljonki na poverhnosti vody (Estimation of the source data for forecasting risk of ignition and combustion of hydrocarbon films on the surface waters) // Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti. Vyp. 4 (44). 2012. 5 p. <http://academygps.ru/ttb>.
3. TU 5914-001-15068529-2006. Universal'nyj poristyj material termoizoljacionnyj UPM "Termoizol".
4. Abduragimov I. M., Govorov V. Ju., Makarov V. E. Fiziko-himicheskie osnovy razvitija i tushenija pozharov (Physico-chemical basis of development and fighting fires). M.: VIPTSh MVD SSSR, 1980.
5. Zel'dovich Ja. B. Teorija predela rasprostranenija tihogo plameni (Theory of limit distribution of a quiet flame) // ZhJeTF. No 1. T. 11, 1941. Pp. 159-169.
6. Principy konstruirovaniya kommunikacionnyh ognepregraditelej, ispol'zuemyh dlja snizhenija riska krupnyh pozharov na obektah neftegazovogo kompleksa (The design principles of the communication of a flame-arrester used to reduce the risk of major fires at oil and gas facilities) / Horoshilov O. A., Kotov I. Ju., Poterjaev Ju. K., Mamontov V. V. // Zashhita okruzhajushhej sredy v neftegazovom komplekse. No2, 2011. Pp. 22-27.
7. Alekseev M. V. Osnovy pozharnoj profilaktiki v tehnologicheskikh processah proizvodstv (Basics of fire prevention in the technological processes of production). M.: Vysshaja shkola MVD SSSR, NIIRIO, 1972. Pp. 120-146.
8. GOST R 12.3.047-98. Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharnaja bezopasnost' tehnologicheskikh processov. Obshhie trebovaniya. Metody kontrolja.
9. Marshall V. C. Major chemical hazards / published by Ellis Horwood, Chichester, 1987. 587 p.
10. Van den Bosch C.J.H., Wetterings R.A.P.M. (Eds). Methods for the calculation of physical effects // Yellow book CPR 14E (Part 2). Sdu Uitgevers, The Hague, 1997, Pp. 6.17-6.138.