

УДК 536.468

АНАЛИЗ ПРЕДЕЛОВ ПРИМЕНИМОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЖАРА РАЗЛИТИЯ

Чж. Чэнь¹, С.-Н. У², В.-Х. Сон¹, Л.-Ю. Лв¹, С.-Д. Ван³

¹Политехнический университет Тяньцзиня, 300387 Тяньцзинь, Китай, chenzhen3419@126.com

²Университет Тяньцзиня, 300110 Тяньцзинь, Китай

³Группа изучения взрывчатых веществ, 100038 Пекин, Китай

Пожар разлития, характеризующийся высокими температурами и тепловым излучением, — распространенная аварийная ситуация в химической промышленности. Характерными параметрами такого горения являются тепловое излучение, скорость горения, высота пламени и т. д., но наиболее существенный среди них — поток теплового излучения. При оценке аварии важную роль играет расчетная модель пожара разлития. Широко известны модель Шокри и Бейлера, модель Мудана и модель точечного источника. По этим моделям проведен расчет параметров горения трех видов нефти в баках различного размера, и результаты сопоставлены с данными компьютерного моделирования. Анализ показал, что при использовании модели точечного источника ошибка больше для пожара разлития диаметром меньше 10 м с потоком теплового излучения менее 5 кВт/м². Наиболее адекватна эта модель для оценки пожара разлития сырой нефти. Область применения модели Мудана шире и ее результаты точнее, когда поток излучения менее 5 кВт/м². Модель Шокри и Бейлера больше подходит для пожара диаметром свыше 40 м с тепловым излучением, превышающим 5 кВт/м², и наиболее адекватно описывает пожар разлития легкой нефти.

Ключевые слова: пожар разлития, характеристики горения, поток теплового излучения, математическая модель, FDS.

ВВЕДЕНИЕ

Пожар разлития воспламеняемых жидкостей либо легковоспламеняемых твердых тел — одна из широко распространенных катастроф в нефтехимической индустрии. Он не только наносит значительный материальный ущерб, но и становится непосредственной причиной гибели людей. Ситуация еще более осложняется, если пожар приводит к взрыву паров кипящей жидкости или паров топлива [1]. Предотвращение таких пожаров требует глубокого их исследования. В настоящей работе рассматривается пожар разлития в открытой среде сырой нефти из топливной емкости.

Понимание характеристик пожара разлития является основным и необходимым условием для анализа направления движения огня и оценки влияния пожара на окружающую среду. По данному вопросу выполнены много-

численные исследования, в том числе экспериментальные. В работе [2] изучали структуру пламени разлитой нефти на основе обобщения ранее проведенных экспериментов и теоретических исследований. В работе [3] описан эксперимент по горению разлитого этана площадью 4 м² и керосина площадью 12 м². В [4] экспериментально исследованы характеристики горения в крупномасштабном баке (диаметром 80 м), при этом получены некоторые фундаментальные результаты. Однако эксперименты с огнем в резервуарах не только дорогостоящие, но и трудны в исполнении, требуют соблюдения сложных условий безопасности, защиты экологии и т. д. Поэтому особую значимость приобретают математические модели расчета параметров горения при пожаре разлития [5]. Таких моделей существует множество, и для получения адекватных численных результатов необходимо изучить области применения каждой из них. В данной работе на основе компьютерного моделирования верифицированы результаты расчетов по трем математическим моделям и проведен анализ этих результатов с точки зрения приложения данных моделей.

© Chen Zhen¹, Wu Xiao-Na², Song Wen-Hua¹, Lv Ling-Yue¹, Wang Xiao-Di³, 2014.

¹Environment and Chemistry College, Tianjin Polytechnic University, 300387 Tianjin, China. ²School of Environment Science and Engineering, Tianjin University, 300110 Tianjin, China. ³Poly Explosives Group CO., LTD, 100038 Beijing, China.

1. МОДЕЛЬ ПОЖАРА РАЗЛИТИЯ

1.1. Скорость горения

Скорость горения является базовой характеристикой при описании пожара разлития. На нее влияют тепловое излучение, локализация и форма пламени, теплопроводность топливного контейнера и другие факторы [6]. Изменение скорости горения разлива нефти тесно связано с подводимым теплом, а тепло, выделяемое в процессе горения, воздействует на поверхность топлива путем передачи тепла излучением, конвекцией и теплопроводностью. Тепловое излучение и высокая температура пламени оказывают непосредственное воздействие на поверхность топлива и стенки топливного бака. Поглощенное поверхностью топлива тепло передается слоям с более низкой температурой посредством теплопроводности через стенки топливного бака, а также за счет конвективного движения топлива, находящегося внутри бака. К тому же, высвобождаемое в процессе горения тепло переносится за счет конвективного теплообмена между парами топлива около поверхности и топливом в жидком состоянии [7].

Основной способ передачи тепла зависит от масштаба пожара. Например, при пожаре сырой нефти с относительно малым размером разлития (меньше 0.6 м) топливо получает тепло главным образом за счет теплопроводности, но при более крупных размерах разлива (больше 3 м) тепло передается в основном за счет излучения пламени [8].

В общем случае процесс распространения пожара разлития можно разделить на три стадии. Первая стадия — горение с увеличивающейся скоростью по мере роста температуры пламени. Спустя некоторое время тепло, которое топливо получило от пламени, становится

сопоставимым с теплом, отдаваемым топливом в окружающую среду, и скорость горения выходит на постоянное значение (рис. 1). Это вторая стадия — стационарное горение. На третьей стадии подача топлива снижается и скорость горения падает.

Значения скорости горения обычной горючей жидкости можно найти в литературе. Для некоторых типов жидкостей ее можно также вычислить по модели Бюргесса и Хертцберга [9]. Данная расчетная модель учитывает температуру кипения жидкости. Если эта температура ниже температуры окружающей среды, скорость горения горючей жидкости вычисляется по формуле

$$m' = 0.001H_c/H_e, \quad (1)$$

если выше температуры окружающей среды — по формуле

$$m' = \frac{0.001H_c}{c_p(T_b - T_0) + H_e}. \quad (2)$$

Здесь m' — скорость горения, кг/(м²·с); H_c — теплота сгорания, кДж/кг; H_e — теплота парообразования, кДж/кг; c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(моль·К); T_b — температура кипения, К; T_0 — температура окружающей среды, К.

Поскольку скорость горения весьма неустойчива и непостоянна, ее можно заменить осредненной по периоду горения величиной. Скорости горения на единицу площади поверхности жидкости для баков различного диаметра можно вычислить по формуле [10]

$$V_b = \frac{1}{60} (6.932 - 6.01^{-D/1.31}). \quad (3)$$

Здесь V_b — линейная скорость горения, мм/с; D — диаметр пожара разлития, м.

1.2. Температура пламени

Обычно светящийся факел возникает за счет пиролиза разлитого топлива, когда в пламени появляются твердые горячие частицы [11].

Вблизи пожара разлития температура пламени (T_f , К), в соответствии с экспериментальными результатами, в основном зависит от высоты пламени (H_f , м) и времени горения (t , с) [12]:

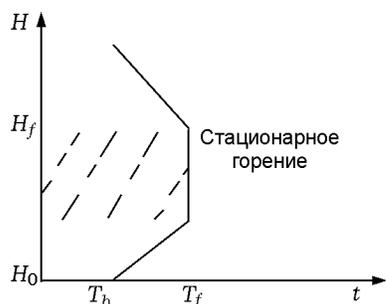


Рис. 1. Распределение температуры пламени

Таблица 1

Модели количественного анализа потока теплового излучения при пожаре разлития

Основной параметр	Модель точечного источника	Модель Шокри и Бейлера	Модель Мудана
Поток теплового излучения	$q = \frac{E \cos \theta}{4\pi L}$	$q = EF_{12}$	$q = EF_{12}\tau$
Скорость тепловыделения	$E = (0.21 - 0.0034D)Q$	$E = 58 \cdot 10^{-0.00823D}$	$E = \frac{0.25\pi D^2 \eta m' \Delta H_c}{0.25\pi D^2 + \pi DH}$
Высота пламени	$H = 0.235q^{0.4} - 1.02D$ (уравнение Хескестада)	$H = 0.235q^{0.4} - 1.02D$ (уравнение Хескестада)	$H = 12D \left[\frac{m'}{\rho_0(gD)^{0.5}} \right]^{0.61}$ (эмпирическая формула Томаса в отсутствие ветра)
Длина или визуальный коэффициент	$L = \sqrt{R_2 + (H/2 - H_t)^2}$	$F_{12} = \sqrt{F_{12H}^2 + F_{12V}^2}$	$F_{12} = \sqrt{F_{12H}^2 + F_{12V}^2}$

Примечания. q — поток излучения, кВт/м²; E — тепловой поток, кВт; D — диаметр пожара разлития, м; Q — полное тепло от пожара разлития, кДж; L — расстояние между облучаемым объектом и центром пожара, м; R — расстояние между облучаемым объектом и центром разлитого топлива, м; H_t — высота емкости с топливом, м; m' — удельная скорость горения разлитой жидкости на единицу площади, кг/(м²·с); H_c — теплота сгорания, кДж/кг; ρ_0 — плотность окружающего воздуха, кг/м³; g — ускорение свободного падения, 9.8 м/с²; τ — оценка атмосферного коэффициента; F_{12} — визуальный коэффициент, F_{12H} , F_{12V} — горизонтальная и вертикальная составляющие визуального коэффициента; η — коэффициент, $\eta = 0.3$.

$$T_f = \frac{10^4 t}{8.51t + 210H_f + 34} + 290. \quad (4)$$

Но она также зависит и от типа топлива. Для пламени нефтепродуктов обычно $T_f = 800 \div 1200$ °С [13]. Чем больше температура пламени, тем выше интенсивность излучения.

1.3. Интенсивность излучения

Тепло пламени передается объектам, находящимся вблизи области разлития, преимущественно посредством излучения. Поток излучения зависит от температуры и толщины пламени, концентрации в нем излучающих частиц и от геометрических соотношений между пламенем и облучаемым объектом.

Для расчета интенсивности излучения при пожаре разлития широко известны три математические модели: модель точечного источника [14], модель Шокри и Бейлера [15] и модель Мудана [16] (табл. 1).

Модель точечного источника предполагает, что пожар разлития сконцентрирован в центре оси реального пламени и соответственно там выделяется тепло. Поток теплового излучения, поглощаемого объектом, расстояние до которого от центра точечного источника равно L , есть тепло, полученное в единицу времени

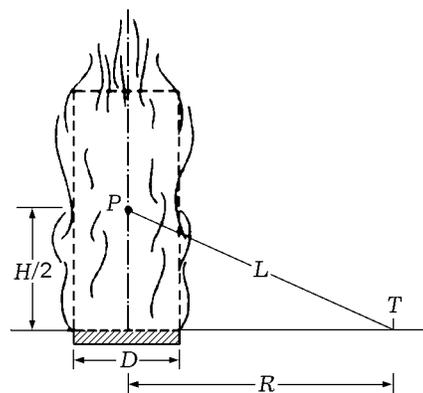


Рис. 2. Излучение по модели точечного источника

на единицу площади сферической поверхности радиусом L , центром которой является точечный источник (P) (рис. 2).

Для оценки высоты пожара разлития в этой модели используется уравнение Хескестада (см. табл. 1). Оно построено на основе большого объема экспериментальных результатов, включая данные по пожарам разлития и плавающим горящим факелам [17].

Модель Шокри и Бейлера предполагает, что пожар разлития представляет собой источник излучения абсолютно черного тела цилиндрической формы.

Таблица 2

Критерии разрушения/отказа в зависимости от интенсивности теплового излучения

Интенсивность теплового излучения, кВт/м ²	Степень разрушения зданий и оборудования	Ущерб персоналу
37.5	Все рабочее оборудование и здания разрушены	1 % смертей в течение 10 с, гибель всех через 1 мин
25	Минимальная интенсивность излучения для воспламенения лесоматериалов и деформирования оборудования из стали при нормальных условиях	Серьезный ущерб в течение 10 с, гибель всех через 1 мин
12.5	Минимальная интенсивность излучения для плавления пластика при нормальных условиях	Несущественные ранения за 10 с, 1 % смертей в течение 1 мин
4.0	Разрушение стекла после длительного облучения	Боль после облучения в течение более чем 20 с, но раненых нет
1.6	Разрушений нет	Ранений нет

дрической формы с постоянной мощностью излучения, диаметр которого равен размеру разлива, а высота — размеру пожара разлива [18]. При анализе теплового излучения учитывается преимущественно его удельный поток по поверхности пожара и коэффициент видимости между излучением от пожара разлива и объектом, поглощающим излучение. Высота пламени рассчитывается по уравнению Хескстада.

Модель Мудана рассматривает пожар разлива как вертикальный (в отсутствие ветра) или наклонный (в присутствии ветра) цилиндрический источник излучения. В этой модели, помимо учета удельного потока теплового излучения, положения объекта, поглощающего излучение, и центра пожара разлива, дополнительно учитывается еще и коэффициент пропускания атмосферы (см. табл. 1). Высота пламени рассчитывается по эмпирической формуле Томаса [19].

Обычные критерии безопасности при воздействии теплового излучения можно соотнести с критерием разрушения/отказа, как показано в табл. 2.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

FSD (fire dynamics simulator) — один из программных продуктов для моделирования динамики пожара зданий, основанный на полевой модели. Разработан в Национальном ин-

ституте стандартов и технологий, США, в лаборатории по исследованию пожаров в зданиях. Это программное обеспечение, использующее передовые технологии моделирования по методу крупных вихрей, успешно применялось для решения многих задач и заслужило признание относительно точности расчетов [20].

Модель FDS включает в себя следующие уравнения [21, 22]:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \boldsymbol{\mu} = 0, \quad (5)$$

уравнение сохранения импульса

$$\rho \left(\frac{\partial \boldsymbol{\mu}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla |\boldsymbol{\mu}|^2 - \boldsymbol{\mu} \omega \right) + \nabla p - \rho g = \mathbf{f} + \nabla \sigma, \quad (6)$$

уравнение сохранения энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla (\rho h \boldsymbol{\mu}) = \frac{\partial p}{\partial t} + \boldsymbol{\mu} \nabla p - \nabla \mathbf{q}_r + \\ + \nabla (k \nabla T) + \sum \nabla (h_i \rho D_i \nabla Y_i), \end{aligned} \quad (7)$$

уравнение сохранения компонентов

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla (\rho Y_i \boldsymbol{\mu}) = \nabla (\rho D_i \nabla Y_i) + m_i, \quad (8)$$

уравнение состояния

$$p_0 = \rho T R \sum_i \frac{Y_i}{M_i}. \quad (9)$$

Таблица 3

Характеристики различных видов сырой нефти

Сырая нефть	Теплота горения, кДж/кг	Плотность, кг/м ³	Скорость горения, кг/(м ² ·с)		Мощность пожара, кВт/м ² (по FDS)	
			$D = 1$ м	$D \geq 10$ м	$D = 1$ м	$D = 10$ м
Китайская сырая нефть из Синьцзяна	39 940	890	0.012	0.017	635	700
Венесуэльская легкая нефть	42 180	820	0.018	0.022	1 225	1 500
Китайская нефтяная смесь из Дагана	44 370	730	0.035	0.04	1 575	1 800

В качестве примера взят пожар разлития бака сырой нефти, размеры пожара варьировались, рассчитывалась интенсивность теплового излучения пожара. Сначала проводилось моделирование с помощью FDS, затем расчет по трем моделям.

Моделируемая область строилась соответственно размеру пожара разлития. Например, если диаметр пожара 100 м, размеры области моделирования задавались 150 × 150 × 100 м, при этом на верхней границе ставилось условие OPEN, а на боковых и нижних гранях — INERT. Размер каждой ячейки 0.5 × 0.5 × 0.25 м. Время расчета 60 с. В центр каждого пламени помещалась управляемая вертикальная плоскость для записи интенсивности теплового излучения.

Источник пожара можно задавать двумя способами: неподвижный источник пламени и источник, зависящий от скорости тепловыделения за счет химических реакций горючего. Поскольку механизм химических реакций сырья очень сложен, в настоящей работе использовался метод неподвижного источника пламени.

Скорость горения различных типов сырой нефти на стадии устойчивого горения постоянна [23]. При диаметре пожара разлития $D < 10$ м скорость горения растет с увеличением D . При $D > 10$ м скорость имеет тенденцию к стабилизации [24]. В данной работе использовались три типа нефти и пять баков диаметром 1, 10, 20, 40 и 100 м. Характеристики пожароопасности различных типов нефти, смоделированных по программе FDS, представлены в табл. 3.

Для упрощения моделирования и расчета предполагается, что степень черноты границы земли и моделируемого пространства равна 1, температура 300 К, граница с землей адиабатическая.

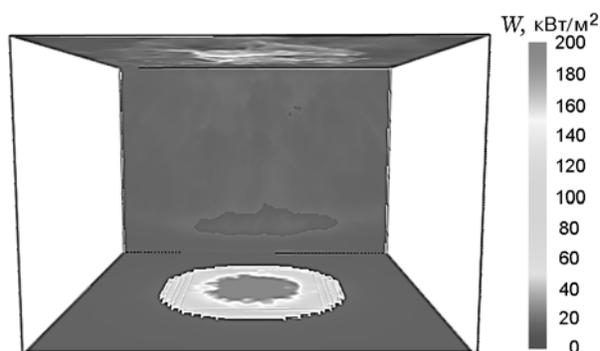


Рис. 3. Модель потока излучения (W) пожара разлития, построенная методом численного моделирования FDS ($D = 100$ м)

тическая.

Модель потока излучения пожара разлития представлена на рис. 3, полученные по ней результаты для пожаров различных размеров и типов сырой нефти — на рис. 4.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета по моделям, приведенным в табл. 1, и численного моделирования по программе FDS показаны на рис. 5–7.

Результаты расчета и моделирования высоты пламени при различных размерах пожара разлития (1, 10, 20, 40 и 100 м) приведены в табл. 4.

Температура в центре пламени для различных баков и типов нефти лежит в диапазоне 1 200 ÷ 1 400 °С. С увеличением диаметра пожара разлития отношение H/D постепенно уменьшается. Это является причиной того, что чем больше размер пожара, тем меньше сырой нефти доступно для горения. Составляю-

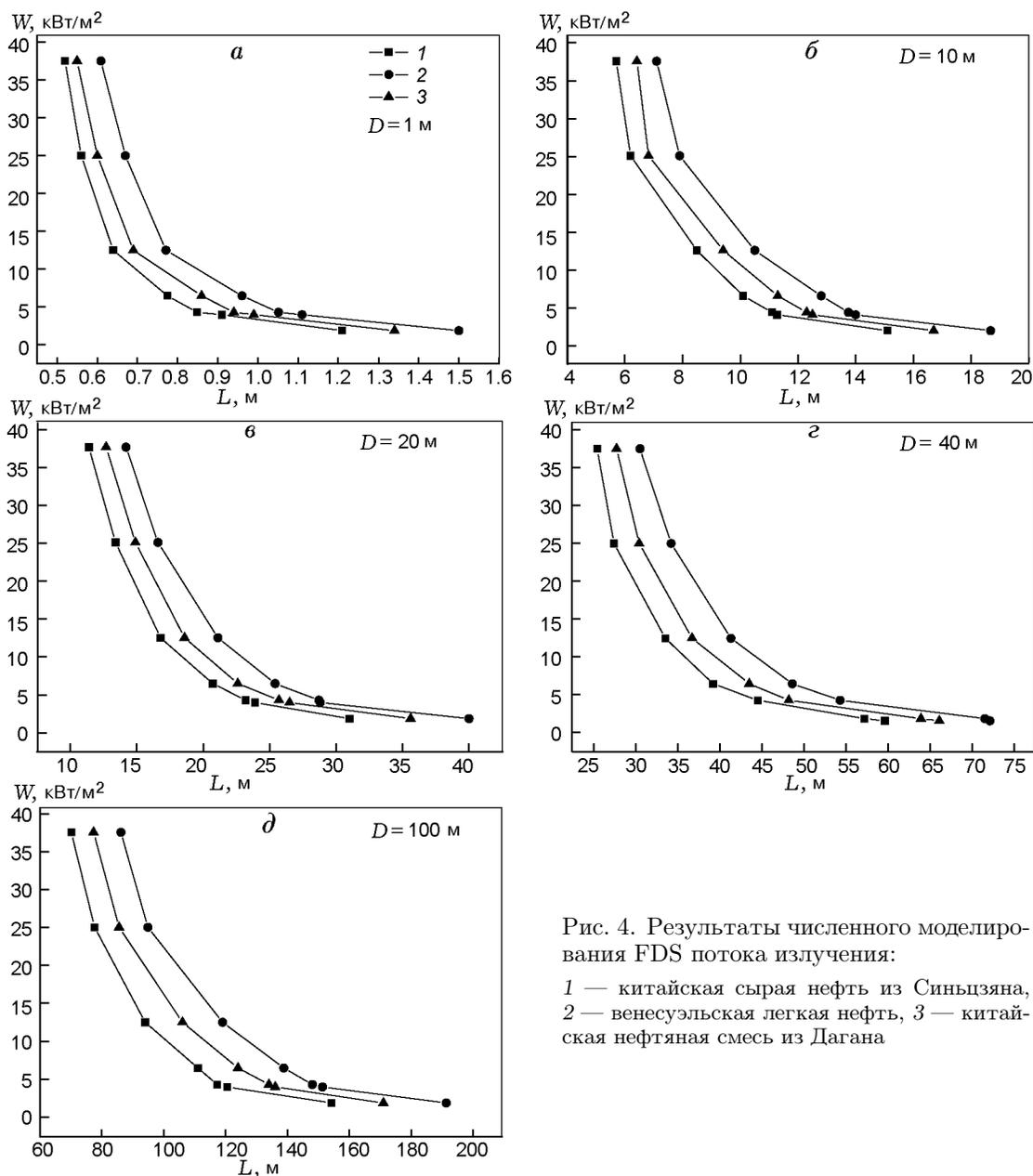


Рис. 4. Результаты численного моделирования FDS потока излучения:

1 — китайская сырая нефть из Синьцзяна, 2 — венесуэльская легкая нефть, 3 — китайская нефтяная смесь из Дагана

щая дымных частиц крупномасштабного пожара разлития выше в результатах моделирования FDS, что согласуется с вышеприведенным объяснением.

Проанализируем интенсивность теплоизлучения пламени. В целом расчеты по моделям принципиально согласуются с результатами численного моделирования FDS. Ошибки расчетов по моделям растут при увеличении диаметра пожара разлития. Для крупно-

масштабных пожаров разлития ($D > 40$ м) результаты расчета по моделям существенно отличаются от результатов численного моделирования. Причина, возможно, заключается в том, что существующие модели расчета базируются на экспериментах с мелкомасштабными пожарами и потому не могут достаточно хорошо описывать крупные пожары. Если исходить из вида нефти, результаты расчета по моделям и результаты FDS наиболее близки для

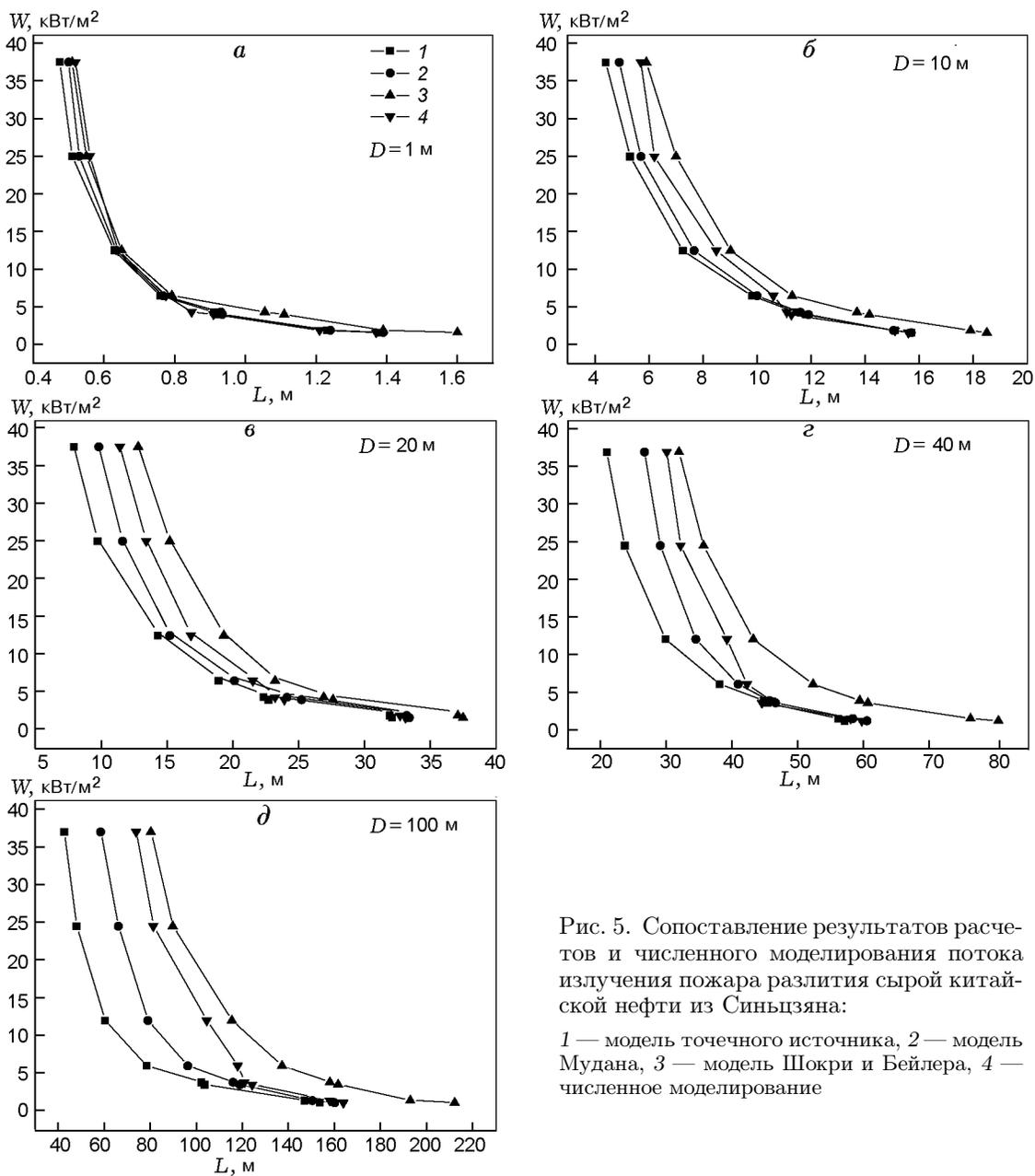


Рис. 5. Сопоставление результатов расчетов и численного моделирования потока излучения пожара разлития сырой китайской нефти из Синьцзяна:

1 — модель точечного источника, 2 — модель Мудана, 3 — модель Шокри и Бейлера, 4 — численное моделирование

венесуэльской легкой нефти. Это связано с тем, что все три модели построены на основе экспериментов с легкими углеводородами, такими как бензин, а большую часть венесуэльской нефти составляют именно легкие углеводороды. Для китайской сырой нефти из Синьцзяна и китайской нефтяной смеси из Дагана ошибки расчета выше.

Сравним между собой результаты расчета по трем моделям. Для пожара разлития диа-

метром менее 10 м с потоком теплового излучения меньше 5 кВт/м² ошибка модели точечного источника относительно невелика. Модель применима для малоразмерных пожаров разлития и для тепловых потоков в точках, расположенных далеко от центра пламени. Процесс расчета прост и удобен. К недостаткам этой модели следует отнести то, что расчетные значения отличаются от действительных больше, чем в двух других моделях. Наиболее надеж-

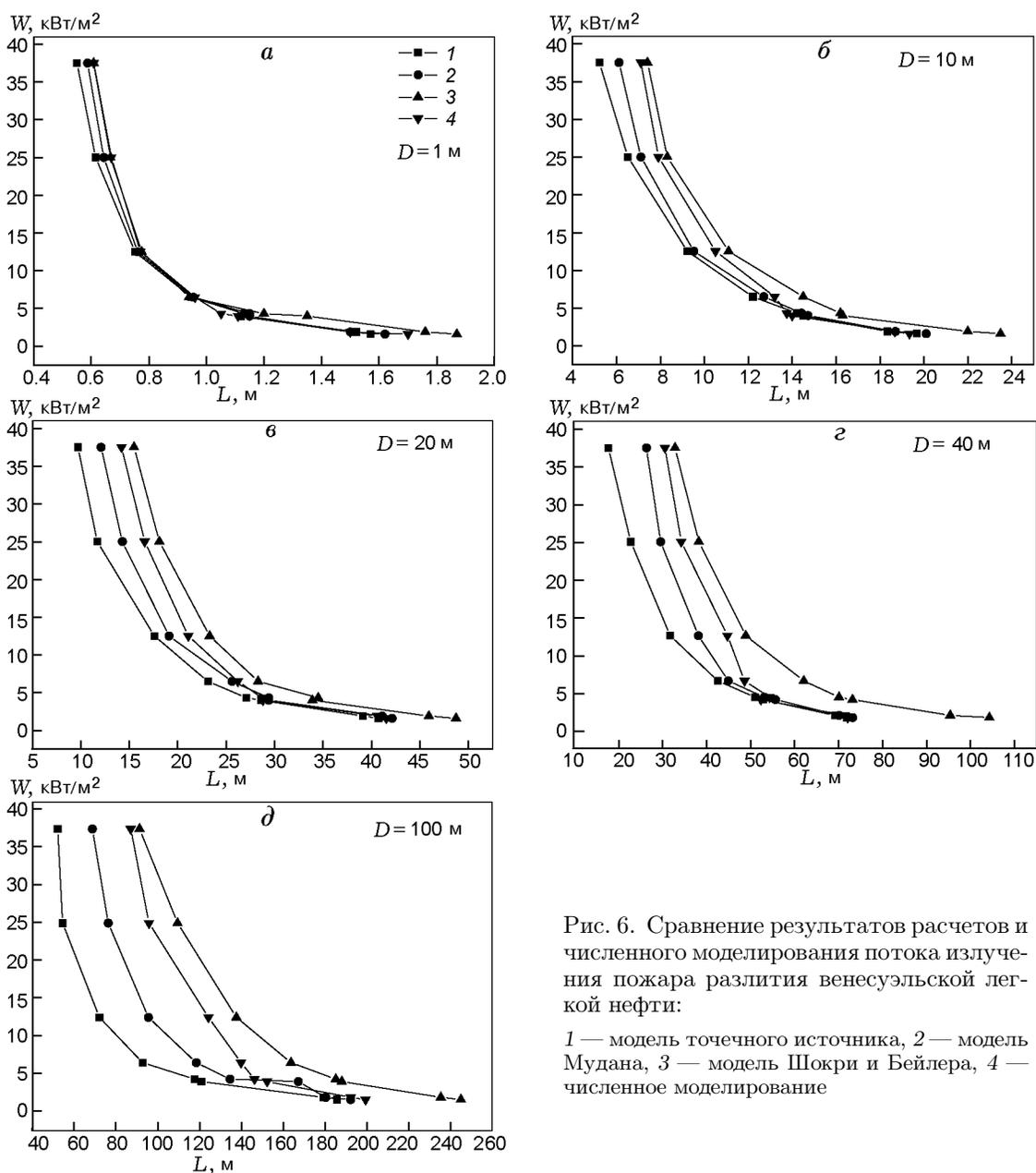


Рис. 6. Сравнение результатов расчетов и численного моделирования потока излучения пожара разлития венесуэльской легкой нефти:

1 — модель точечного источника, 2 — модель Мудана, 3 — модель Шокри и Бейлера, 4 — численное моделирование

ные результаты расчета по модели точечного источника получены при отношении расстояния от облучаемого объекта до центра пламени L к диаметру бака D , равном $L/D > 2.5$. Эта модель больше пригодна для моделирования пожара сырой нефти, чем легкой.

Область применения модели Мудана шире, чем двух других моделей. При потоке теплового излучения в точке расположения объекта меньше 5 кВт/м^2 расчет по этой модели бо-

лее достоверен, чем по модели точечного источника, и приближается к результатам численного моделирования. Результаты расчета по модели Мудана практически одинаковы для всех рассмотренных типов нефти.

Модель Шокри и Бейлера лучше применять при интенсивности теплового излучения в месте расположения объекта менее 5 кВт/м^2 и диаметре пожара более 40 м . При интенсивности больше 5 кВт/м^2 точность этой модели

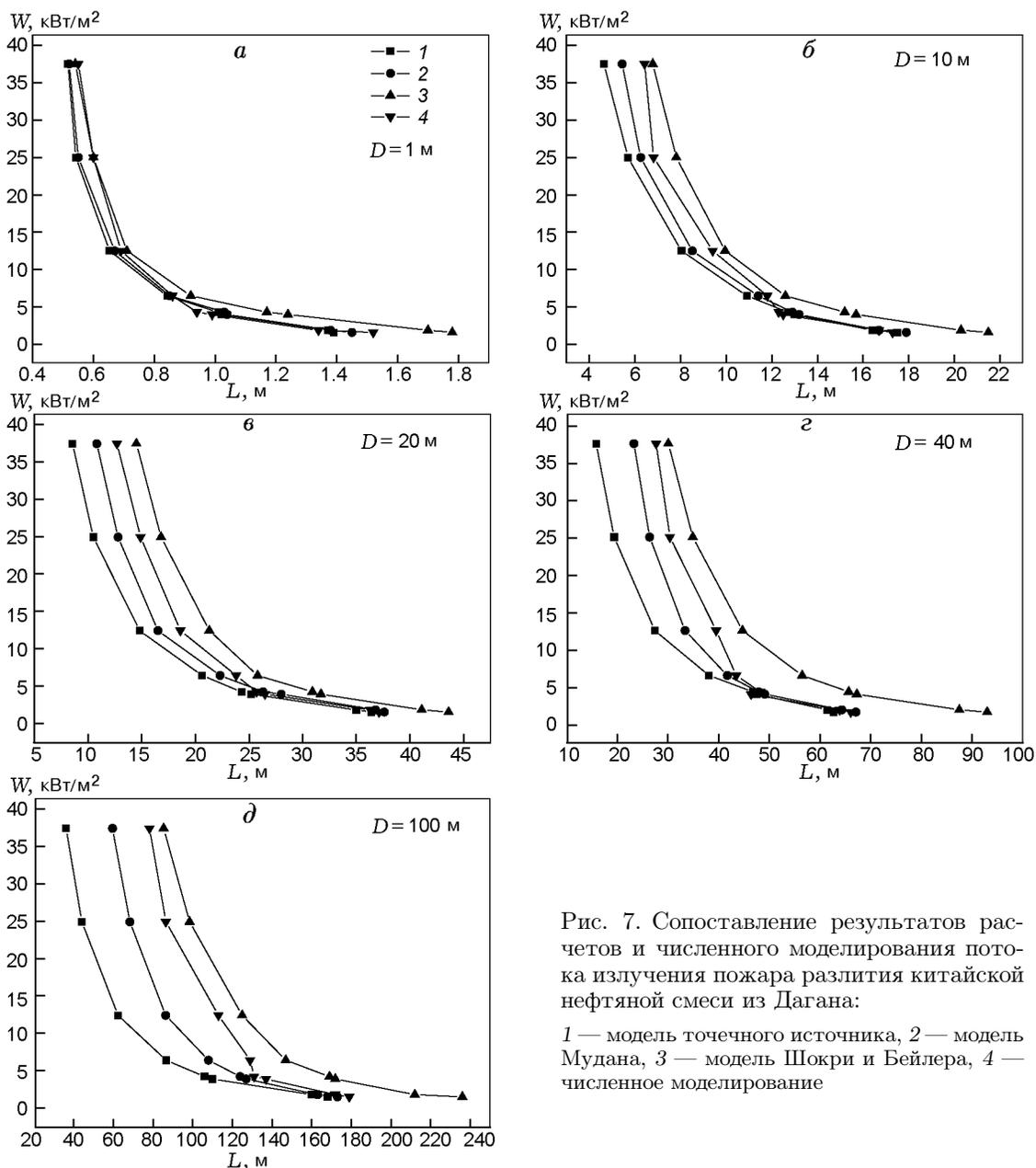


Рис. 7. Сопоставление результатов расчетов и численного моделирования потока излучения пожара разлива китайской нефтяной смеси из Дагана:

1 — модель точечного источника, 2 — модель Мудана, 3 — модель Шокри и Бейлера, 4 — численное моделирование

хуже, чем у двух других. Для крупномасштабных пожаров ошибка расчетов по модели Шокри и Бейлера высока, но точность модели все же намного выше, чем у двух других. Модель Шокри и Бейлера более пригодна для легкой нефти, в этом случае ошибка меньше, чем для сырой нефти и нефтяной смеси.

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (№ 50974096), приоритетных проектов иссле-

довательской программы по прикладным основам и перспективным технологиям Тяньцзиня (№ 10JCZDJC25000) и приоритетных проектов программы поддержки науки и технологий Тяньцзиня (№ 10ZCGYSF01600).

Таблица 4
Высота пламени пожаров разлития
различных видов нефти

Диаметр, м	Высота пламени, м		
	китайская сырая нефть из Синьцзяна	венесуэльская легкая нефть	китайская нефтяная смесь из Дагана
1	1.51	2.32	1.86
10	7.51	11.55	9.24
20	12.15	18.69	14.95
40	19.67	30.25	24.20
100	37.20	57.2	45.76

ЛИТЕРАТУРА

- Zhi-rong Wang, Jun-cheng Jiang, Hui Jiang.** Review of characteristic environment of outdoor pool fire // *Chem. Eng. of Oil and Gas.* — 2005. — V. 34, N 4. — P. 321–324.
- Hamins A.** Flame extinction by sodium bicarbonate powder in a cup burner // *Proc. Combust. Inst.* — 1998. — V. 27, N 2. — P. 2857–2864.
- Planas-Cuchi E., Casal J.** Flame temperature distribution in a pool-fire // *J. Hazard. Mater.* — 1998. — V. 62, N 3. — P. 231–241.
- Hiroshi Koseki, Yusaku Iwata, Toru Takahashi, et al.** Large-scale boilover experiments using crude oil // *Fire Saf. J.* — 2006. — V. 41, N 7. — P. 529–535.
- Liu Bo, Liang Dong, Huang Yanbo.** Heat radiation calculation and simulation of pool fire // *Saf. Health Environ.* — 2009. — V. 9, N 1. — P. 36–38.
- Zhi-min Fu, Jin-yin Huang, Min Fu, et al.** Quantitative analysis of damaging effect of hydrocarbon fluid fire // *China Saf. Sci. J.* — 2008. — N 9. — P. 29–36.
- Peacock R. D., Babrauskas V.** Analysis of large-scale pool fire test data // *Fire Saf. J.* — 1991. — V. 17, N 5. — P. 387–414.
- De-ming Yu, Chang-gen Feng, Qing-xuan Zeng, et al.** Pool fire in open air and the hazard analysis // *Combust. Sci. Technol.* — 1996. — V. 2, N 2. — P. 95–103.
- Hertzberg M., Litton C. D., Donaldson W. F., Burgess D.** The infrared radiance and the optical of fires and explosins // *Proc. Combust. Inst.* — 1975. — V. 15, N 1. — P. 137–144. — (15th Symp. (Intern.) on Combustion).
- Hamins A., Johnsson E., Donnelly M., et al.** Energy balance in large compartment fire // *Fire Saf. J.* — 2008. — V. 43, N 3. — P. 180–188.
- Babrauskas V.** Smoke and gas evolution rate measurements on fire-retarded plastics with the cone calorimeter // *Fire Saf. J.* — 1989. — V. 14, N 3. — P. 135–142.
- Rew P. J., Spencer H., Daycock J.** Off-side ignition probability of flammable gases // *J. Hazard. Mater.* — 2000. — V. 71, N 1-3. — P. 409–422.
- Chao Hu, Guo-qing Zhu, Wei-hua Wu.** The model calculation and analysis of the pool fire hazards // *Fire Sci. Technol.* — 2011. — V. 33, N 30. — P. 570–573.
- Croce P. A., Mudan K. S.** Calculating impacts for large open hydrocarbon fires // *Fire Saf. J.* — 1986. — V. 11, N 1-2. — P. 99–112.
- Babrauskas V.** A simplified characterization of upholstered furniture heat release rates // *Fire Saf. J.* — 1986. — V. 11, N 3. — P. 181–192.
- Mudan K. S.** Geometric view factors for thermal radiation hazard assessment // *Fire Saf. J.* — 1987. — V. 12, N 2. — P. 89–96.
- Soares C. G., Teixeira A. P.** Probabilistic modeling of off shore fires // *Fire Saf. J.* — 2000. — V. 34, N 1. — P. 25–45.
- Planas-Cuchi E., Casal J.** Modeling temperature evolution in equipment engulfed in a pool-fire // *Fire Saf. J.* — 1998. — V. 30, N 3. — P. 251–268.
- Atsushi Nakakuki.** Heat transfer in hot-zone-forming pool fires // *Combust. Flame.* — 1997. — V. 109, N 3. — P. 353–369.
- Xiao Ze-nan, Xie Da-yong, Sun Xuan.** The application of CFD technique used in modeling smoke movement in large space // *Fire Sci. Technol.* — 2005. — V. 24, N 2. — P. 175–178.
- Madrzykowski D., Verrori R. L.** Simultaneous of the Dynamics of the Fiert 3144 Cherry Road NE. — National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD20899, 2000.
- Sinai Y. L.** Exploratory CFD modeling of pool fire instabilities without cross-wind // *Fire Saf. J.* — 2000. — V. 35, N 1. — P. 51–61.
- Yang Jun-tao, Wei Dong, Zhang Xue-kui, et al.** The theoretical analysis of the burning characteristics for oil tank fires // *J. Eng. Thermophys.* — 2006. — V. 27, N 1. — P. 151–154.
- Wei Dong, Zhao Da-lin, Du Yu-long, et al.** Experimental study on the burning rate of oil tank fires // *J. Combust. Sci. Technol.* — 2005. — V. 11, N 31. — P. 286–291.

Поступила в редакцию 4/XI 2012 г.,
в окончательном варианте — 18/VI 2013 г.