

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НАД БОЛЬШИМ ПОЖАРОМ В АТМОСФЕРЕ

С. В. УТЮЖНИКОВ

Московский физико-технический институт, Долгопрудный Московской обл.

## SIMULATION OF POLLUTION SPREAD OVER CONFLAGRATIONS IN ATMOSPHERE

S. V. UTUZHNIKOV

*The simulation of the rise of combustion products over conflagrations into the atmosphere is discussed. The research can be performed by means of both computer simulation and laboratory modeling. The latter was carried out with the help of the theory of similarity and dimension. The influence of a fire source area upon the altitude of pollutants rising is discussed. On the basis of the obtained results, a conclusion regarding the possibility of "nuclear winter" is drawn.*

*Рассмотрена проблема моделирования подъема продуктов сгорания над крупными пожарами в атмосфере. Исследование проблемы возможно как методами вычислительного эксперимента, так и с помощью лабораторного моделирования. Последнее осуществляется с помощью методов теории подобия и размерности. Рассмотрено влияние площади очага пожара на высоту подъема примеси. На основании полученных результатов сделан вывод о возможности ядерной зимы.*

[www.issep.rssi.ru](http://www.issep.rssi.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

При крупных пожарах в атмосферу выбрасывается большое количество аэрозольных частиц в виде сажи и пепла. Выброс в атмосферу продуктов горения может приводить к локальным и региональным климатическим последствиям. На опасность глобального воздействия на климат пожаров большой протяженности, которые могут возникать в случае ядерного взрыва, было указано в исследованиях, проводимых в СССР и США. У нас в стране такие исследования проводили в Вычислительном центре АН СССР В.В. Александров и Г.Л. Стенчиков в 70–80-е годы XX века под руководством академика Н.Н. Моисеева методами вычислительного эксперимента.

Была разработана концепция так называемой ядерной зимы [1], согласно которой продукты сгорания, поднимаясь в атмосфере, пробивают тропопаузу, которая находится на высотах 11–19 км, и попадают в стратосферу. Из стратосферы сажа и пепел выходят очень медленно, так как дождевые облака находятся в тропопаузе и ниже. В результате продукты сгорания в случае выброса больших объемов обволакивают Землю, экранируя при этом солнечные лучи, что должно приводить к сильному похолоданию вплоть до глобального изменения климата. Характерная продолжительность такого явления по различным сценариям оценивалась от трех месяцев до года. В то время мир находился в условиях холодной войны, и сенсационные результаты исследований, показавших нелокальность последствий ядерного удара, возможно, остудили не одну горячую голову.

Исследования, проводимые в Вычислительном центре АН СССР, выполняли на БЭСМ-6, что в большой степени определяло простоту применяемой математической модели. Даже аналогичные исследования в США были главным образом направлены на моделирование проблемы глобального изменения климата. При этом начальная стадия подъема примеси, как правило, не моделировалась, а объем выброшенной примеси задавался из оценок.

В настоящее время угроза глобального ядерного конфликта отошла на неопределенное время. В то же время существует реальная угроза ядерного терроризма. Кроме того, обширные пожары возможны в результате входа в атмосферу крупных метеороидов, сопровождающегося мощным излучением. Классическим примером такого явления представляется Тунгусский метеорит, взрыв которого в атмосфере сопровождался большими пожарами тайги. По названным причинам представляется очень важным продолжение исследований по изучению последствий крупных пожаров в атмосфере и их влияния на климат с привлечением последних достижений как вычислительной математики, так и вычислительной техники. Роль численного эксперимента при изучении данной проблемы является особенно важной в силу невозможности проведения натуральных экспериментов. Кроме того, данная проблема допускает изучение и в лабораторных исследованиях при некоторых допущениях с привлечением результатов теории подобия и размерностей [2], на которых мы остановимся ниже.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

При прогнозировании климатических последствий крупномасштабных пожаров принципиальное значение имеет начальная стадия эволюции примеси, а именно стадия подъема примеси. Оказывается, проведение оценок количества выброшенного аэрозоля весьма затруднительно, так как в случае достаточно большого размера очага необходимо решение сложной системы нелинейных уравнений в частных производных. В ранних исследованиях по изучению климатических последствий, о которых уже была речь, максимальная высота, на которую поднимаются продукты сгорания, оценивалась из формулы [3]

$$z_{\max} = Aq_f^{1/4}, \quad (1)$$

где  $z_{\max}$  измеряется в километрах,  $q_f$  — мощность энерговыделения при пожаре, измеряемая в мегаваттах,  $A$  — безразмерная константа, которая может быть либо определена из эксперимента, либо оценена теоретически. Известные в литературе значения константы  $A$  приведены ниже.

Формула (1) получается с помощью теории подобия и размерностей [2]. Основу этой теории составляет так называемая  $\pi$ -теорема, согласно которой количество безразмерных определяющих параметров задачи (в том числе независимых переменных, например координат и времени) меньше количества размерных на число параметров, имеющих независимые размерности. Размерность одной величины называется независимой от размерностей других, если размерность данной величины невозможно выразить через размерности дру-

гих в виде степенного одночлена. Иногда это позволяет найти решение задачи с точностью до безразмерной константы. В физике это соответствует известному приему нахождения решения по размерности.

Безразмерный коэффициент пропорциональности в зависимости (1) остается неизвестным и оценивается тем или иным способом, например из эксперимента. Формула (1) получается в приближении так называемого точечного источника. В этом случае предполагается, что площадь энерговыделения как бы равна нулю, но мощность энерговыделения сохраняется. Такое приближение естественно, пока характерный размер очага много меньше другого характерного размера задачи — масштаба неоднородности атмосферы, то есть размера, на котором плотность меняется в  $e$  раз (для Земли он равен приблизительно 6–7 км). В то же время, когда размер очага становится сопоставим либо больше масштаба неоднородности атмосферы, в задаче появляется новый размерный определяющий параметр при неизменном количестве определяющих параметров с независимыми размерностями. Результаты численного моделирования показывают, что отличие реальной зависимости для  $z_{\max}$  от получаемого значения по формуле (1) может быть велико и является принципиальным при оценке климатических последствий.

Численному моделированию эволюции примеси над крупными пожарами посвящен ряд работ (см., например, [4, 5]). Исследования проводили в так называемой осесимметричной постановке, то есть в предположении наличия оси симметрии задачи, что позволяет в цилиндрической системе координат сократить число независимых переменных до трех (две пространственные переменные и время). Иными словами, полагали, что очаг пожара осесимметричен, а ветер отсутствует. В [4] предложено источником энерговыделения при пожаре моделировать объемным источником, мощность которого увеличивается со временем по линейному закону до некоторого максимального значения. По порядку величины мощность источника соответствовала случаю полного сгорания древесных материалов в пересчете на единицу площади ( $q = 0,05$  МВт/м<sup>2</sup>). В дальнейшем в СССР большое внимание исследованию данной проблемы уделяли в Институте химической физики АН СССР, в лаборатории Ю.А. Гостинцева. Исследования позволили определить характерные значения скорости образующегося течения, высоту подъема облака продуктов сгорания, количество аэрозоля, выбрасываемого в атмосферу, а также влияние на эту величину влажности атмосферы. Вместе с тем эти исследования проводили при значениях радиуса очага меньших 7 км.

В [5] аналогичные исследования были проведены практически во всем реальном диапазоне изменения

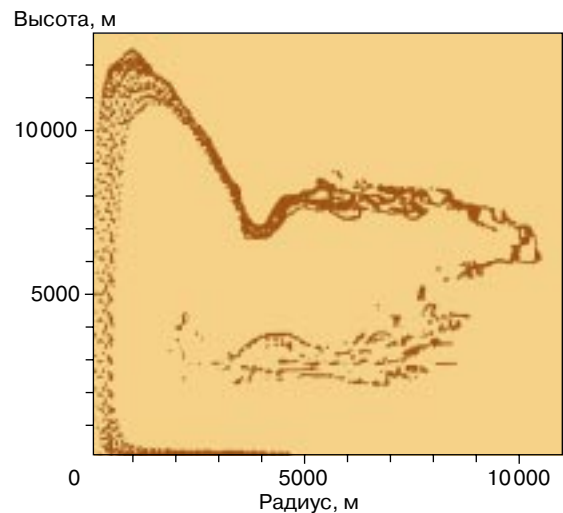
радиуса очага пожара (до нескольких десятков километров). При этом применяли один из наиболее современных высокоточных численных методов для решения системы определяющих уравнений. Движение газодинамических потоков и примеси над очагом пожара описывали с помощью так называемых уравнений Навье—Стокса, которые ввиду сложности здесь не выписываем. Заметим только, что это система нелинейных уравнений в частных производных, решение которой можно найти методами вычислительной математики с применением достаточно мощных ЭВМ.

Источник энерговыделения задавали объемным с радиусом  $R$  и высотой  $h$ , которую в работе принимали равной 100 м. Интенсивность объемного источника  $Q^*$  менялась со временем линейным образом до значения  $Q_{\max}^*$ , которое достигалось через 30 мин. Затем в течение 30 мин интенсивность источника полагали постоянной. Через 60 мин источник отключали, что моделировало процесс выгорания источника пожара.

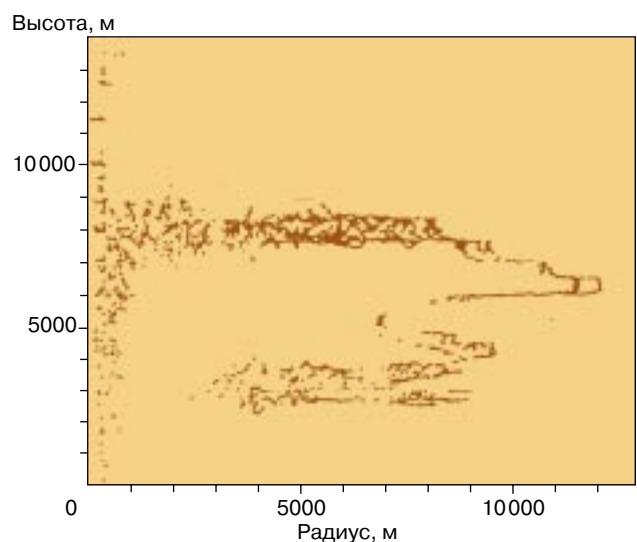
Проводили исследование влияния площади пожара на динамику течения и высоту подъема примеси. Рассматривали значения радиуса  $R$  очага от 5 до 33 км. Максимальная мощность энерговыделения с единицы площади поверхности соответствовала  $q_{\max} = 0,05 \text{ МВт/м}^2$ . Примесь моделировалась как пассивная, то есть не реагирующая и “вмороженная в газ”.

Качественно имеет место следующая динамика подъема примеси, моделирующей аэрозольные продукты пожара. Примесь поднимается вместе с нагретым воздухом под действием силы Архимеда. Причем поток воздуха в окрестности очага устремляется к центру, а затем поднимается вверх, подобно фонтану. Разгоняясь на начальной стадии подъема, воздух (а также и примесь) проскакивает положение равновесия. В результате чего в области максимальной высоты подъема (в окрестности оси симметрии) более тяжелый газ оказывается выше более легкого атмосферного. Поэтому поток газа затем устремляется вниз до высоты равновесия и растекается. Оказывается, что высота растекания облака приблизительно в два раза ниже максимальной высоты подъема.

На рис. 1 приведено распределение примеси над источником пожара радиуса 5 км (суммарная мощность  $q_f$  энерговыделения составляет  $3,9 \cdot 10^6 \text{ МВт}$ ) через 1 ч после начала пожара (здесь и везде ниже на рисунках расстояние измеряется в метрах). На рис. 2 приводится аналогичная картина, но через 90 мин после начала пожара или через 30 мин после его окончания. Хорошо видно, что в окрестности “фонтана” примесь перестает подниматься, а высота растекания примеси не меняется. На рис. 3 приведена высота верхней кромки как функция времени, которое измеряется в минутах. Оказывается, облако совершает колебания



**Рис. 1.** Распределение примеси над источником пожара ( $R = 5 \text{ км}$ ,  $t = 60 \text{ мин}$  после начала пожара)



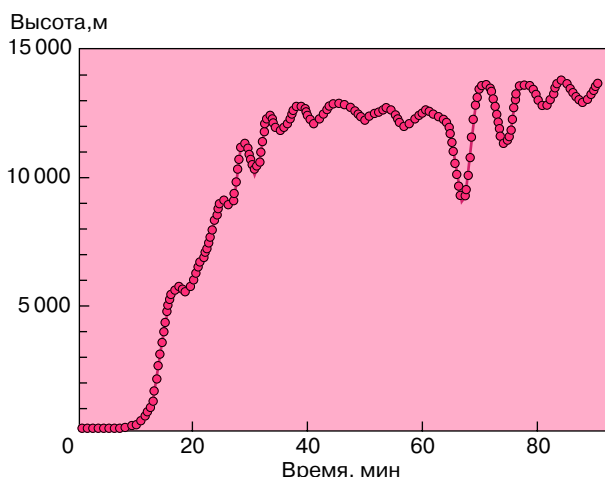
**Рис. 2.** Распределение примеси после выключения источника ( $R = 5 \text{ км}$ ,  $t = 90 \text{ мин}$ )

около положения равновесия с периодом 5–7 мин, соответствующим частоте собственных колебаний атмосферы, определяемой формулой Брента—Вяйсяля [6]:

$$N^2 = (\gamma - 1) \frac{g^2}{a^2}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — показатель адиабаты,  $a$  — скорость звука,  $g$  — ускорение силы тяжести.

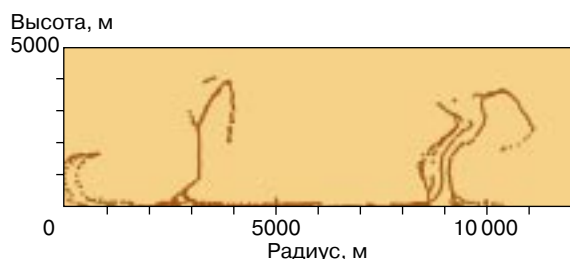
Высота подъема примеси оказывается ниже верхней границы тропопавзы. Тем самым не происходит



**Рис. 3.** Зависимость высоты верхней кромки от времени

выброса загрязнений в стратосферу. Интересно заметить, что подъем примеси сопровождается процессом интенсивного турбулентного перемешивания, который описывался с помощью приближенной модели турбулентности. Оказалось, что влияние турбулентности весьма существенно влияет на высоту подъема примеси. Так, уже в случае радиуса очага в 5 км без учета влияния турбулентности происходит выброс продуктов пожара на высоту в 25 км, то есть в стратосферу. Как уже отмечалось выше, это принципиально, так как из стратосферы примесь уходит очень медленно.

Динамика формирования газодинамического течения при  $R = 11$  км ( $q_f = 1,9 \cdot 10^7$  МВт) существенно иная. В начальный период времени в потоке формируются три вихря, распределенные один относительно другого в горизонтальном направлении с положением центров, примерно соответствующим значениям радиальной координаты  $r$  в 1, 4, 9 км. Распределение примеси над очагом пожара через 20 мин после его начала приведено на рис. 4. Хорошо видно, что очаг пожара приобретает ячеистую структуру. Такое разбиение очага пожара на систему локальных ячеек характерно для значений ра-



**Рис. 4.** Распределение примеси ( $R = 11$  км,  $t = 20$  мин)

диуса очага более 8 км и является определяющим для высоты подъема примеси при дальнейшем увеличении площади пожара, что будет рассмотрено ниже. Поле скоростей для момента времени 90 мин представлено на рис. 5. Здесь каждая стрелка является сонаправленной с вектором скорости потока в соответствующей точке, а ее длина пропорциональна величине скорости. Как видно из рисунка, структура потока к этому моменту времени весьма сложная, она характеризуется формированием большого количества вихрей в основном после достижения облаком продуктов сгорания высоты зависания. На этой стадии генерация вихрей обусловлена внутренними гравитационными волнами. Частота образования вихрей соответствует величине  $N(2)$ .

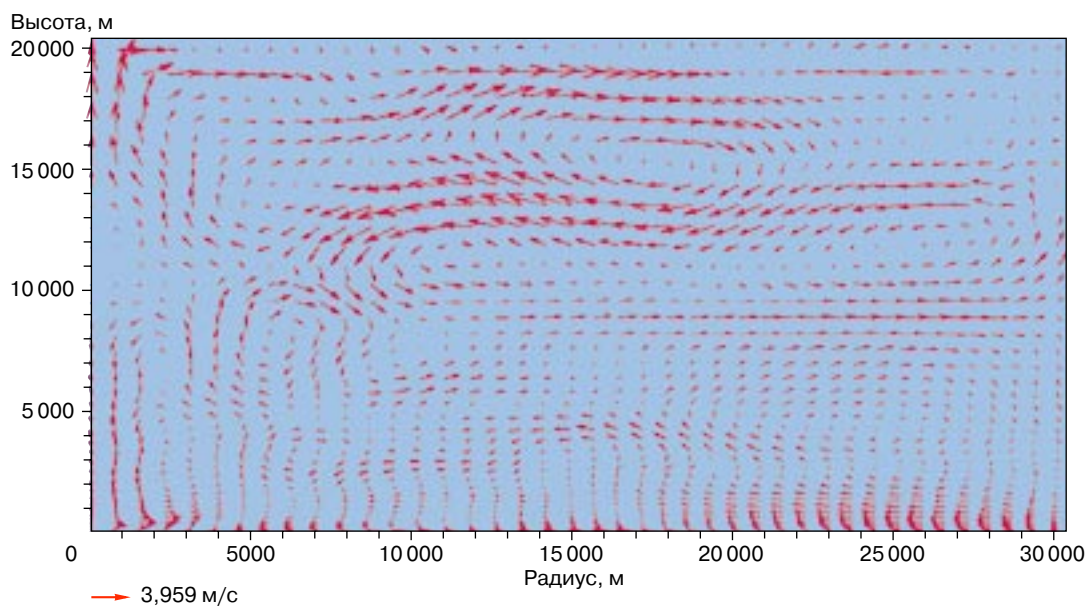
Любопытно сравнить полученные значения для  $z_{\max}$  со значениями, получаемыми из так называемого авторемодельного решения (1) с учетом того, что  $q_f = \pi R^2 q$ . Следует отметить здесь, что формула (1) получена для асимптотического предела точечного источника, а здесь мы формально применяем ее для источника, имеющего конечный размер, подставляя в нее соответствующее значение  $q_f$ . В литературе известны два значения коэффициента пропорциональности  $A$  [1]: 0,255 (Р.С. Manins) и 0,31 (Г.С. Голицын, Ю.А. Гостинцев, А.Ф. Солодовник), — которые были получены в результате сопоставления зависимости (1) с решениями, полученными для условий атмосферы Земли.

В табл. 1 приведены расчетные значения  $z_{\max}$  по формуле (1), соответствующие значениям  $A$ , равным 0,255 и 0,31, а также значения  $z_{\max}$ , найденные как координата верхней кромки облака с учетом ее колебаний, так что  $z_{\max}^{(1)} \leq z_{\max} \leq z_{\max}^{(2)}$ .

Оказывается, что при  $R = 5$  км значение  $A = 0,255$  дает оценку снизу для высоты подъема конвективной колонки, а  $A = 0,31$  дает оценку сверху. Из табл. 1 видно, что если для  $R = 5$  км формула (1) со значениями  $A$ , равными 0,255 и 0,31, действительно с высокой точностью дает оценку снизу и сверху для высоты верхней кромки с учетом ее колебаний во времени, то для  $R = 8$  км и  $R = 11$  км эта оценка уже не выполняется. Для последних двух значений  $R$  более подходит значение  $A = 0,255$ , при этом из формулы (1) получается верхняя оценка для высоты подъема конвективной колонки.

**Таблица 1**

$R$ , км	$z_{\max}$		$z_{\max}^{(1)}$	$z_{\max}^{(2)}$
	$A = 0,255$	$A = 0,31$		
5	11,3	13,4	11,3	13
8	14,4	17,5	11,9	15
11	16,8	20,5	12,9	16,2



**Рис. 5.** Поле скоростей для  $t = 90$  мин

Начиная с  $R = 11$  км зависимость (1), соответствующая точечному источнику, заметно нарушается. Так, в случае  $R = 22$  км и  $R = 33$  км максимальная высота подъема примеси равна 16 и 15 км соответственно. Значительное отклонение при больших  $R$  от зависимости (1) главным образом объясняется тем, что после того, как очаг пожара перестает быть точечным, он разбивается на локальные ячейки. Эти ячейки действуют в большой степени автономно. При этом в случае  $R$ , равного 33 км, практически происходит выход на асимптотику бесконечнопротяженного очага пожара, которая дает конечное значение  $z_{\max}$ . В то же время при неограниченном увеличении  $R$  из зависимости (1) следует неограниченное увеличение  $z_{\max}$ . Интересно также отметить, что результаты численного моделирования дают достижение глобального максимума  $z_{\max}$  при конечном значении  $R$  около 11 км.

Таким образом, максимальная высота подъема продуктов сгорания при варьировании площади очага составляет 16 км. Основная часть загрязнений распределяется на высоте около 8 км и достаточно быстро должна вымываться в виде осадков. Приведенные результаты исследований соответствовали мощности энерговыделения при горении древесных материалов. При рассмотрении максимально возможной мощности энерговыделения  $Q = 0,24$  МВт/м<sup>2</sup> (пожар города) изменение максимальной высоты подъема примеси составляет несколько километров ( $z_{\max}$  достигает 20 км), что не влияет принципиально на общие выводы.

## ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование рассматриваемой проблемы экспериментально на пожарах малой площади невозможно, если приближение точечного источника неверно. Дело в том, что из теории подобия в случае уменьшения размера очага пожара должны быть пропорционально перемасштабированы и другие размерные параметры, включающие в себя размерность длины, например масштаб неоднородности атмосферы. В условиях реальной атмосферы это невозможно. Тем не менее допустимо проведение лабораторного моделирования при условии выполнения некоторых критериев подобия.

Такая система критериев подобия была получена А.Т. Онуфриевым. Оказалось, что настоящая задача имеет 11 размерных определяющих параметров. Тем самым из  $\pi$ -теоремы следует, что число безразмерных определяющих параметров равно 8 (задача имеет три определяющих параметра с независимыми размерностями). В [7] отмечается, что в данной задаче можно пренебречь зависимостью от двух из них. В МФТИ был создан экспериментальный стенд, при проектировании которого учитывалось сохранение оставшихся шести определяющих безразмерных параметров по отношению к задаче в исходной постановке [7]. Эксперименты проводили в цилиндрической камере высотой 1,5 м и радиусом 7 м. Снизу камеры вдувался легкий газ, в то время как сверху газ забирался. Это позволило создать локальную стратификацию атмосферы, удовлетворяющую критериям подобия. Вдуть легкого газа, подкрашенного дымом, позволил имитировать очаг пожара.

Поднимающийся поток был турбулентным. Полученные в измерениях высоту подъема облака и высоту зависания пересчитывали затем на реальные условия при переходе к размерным величинам.

Полученные результаты лабораторных экспериментов хорошо согласуются с формулой (1) в случае точечного источника и с расчетными данными для протяженного источника как по максимальной высоте подъема, так и по высоте зависания облака.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного и лабораторного моделирования показывают, что основное распределение загрязнений над крупными пожарами происходит ниже или в области тропопаузы, а значительных выбросов в стратосферу не происходит. В этом случае примесь достаточно быстро вымывается дождями без значительного воздействия на климат. В то же время при сверхмощных выбросах энергии, которые возможны при ударах о Землю крупных метеоритов (радиуса ~1 км и более) концепция ядерной зимы имеет под собой основание. Как показали последние результаты численного моделирования у нас в стране и за рубежом, столкновение с крупным космическим объектом может привести к мощному механическому выбросу загрязнений в стратосферу. Вместе с тем источником подобного выброса не является пожар, и поэтому данная проблема уже выходит за рамки настоящей статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Будыко М.И., Голицын Г.С., Израэль Ю.А. Глобальные климатические катастрофы. М.: Гидрометеоздат, 1985. 158 с.
2. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1981. 448 с.
3. Morton B.R., Taylor G.T., Turner Y.S. Turbulent Gravitational Convection from Maintained and Instantaneous Sources // Proc. Royal Soc. A. 1956. Vol. 234, № 1196. P. 1–23.
4. Копылов Н.П., Рыжов А.М., Хасанов И.Р. Математическое моделирование крупномасштабного экспериментального пожара // Физика горения и взрыва. 1985. № 5. С. 51–54.
5. Музафаров И.Ф., Утюжников С.В. Численное моделирование конвективных колонок над большим пожаром в атмосфере // Теплофизика высоких температур. 1995. № 4. С. 594–601.
6. Госсард Э., Хук Т. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978.
7. Балабанов В.А., Мешков М.А., Онуфриев А.Т. и др. О динамической картине развития конвективного выброса на большие высоты в стратифицированной атмосфере от протяженного источника энерговыделения // I Рос. нац. конф. по теплообмену: Тез. докл. М.: МЭИ, 1994. Т. 2. С. 31–36.

Рецензент статьи Г.А. Тирский

\*\*\*

Сергей Владимирович Утюжников, доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной математики Московского физико-технического института. Область научных интересов – математическое моделирование газодинамических течений. Автор около 90 публикаций.