

УДК 536.46

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА  
ПРИ ПОЖАРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ PHOENICS**

В.А. Перминов, А.А. Шатохин

Томский политехнический университет  
E-mail: perminov@tpu.ru

**Перминов Валерий Афанасьевич**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: p\_valer@mail.ru

Область научных интересов: математическое моделирование лесных пожаров и загрязнения окружающей среды.

**Шатохин Андрей Александрович**, магистрант кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: andreisoulfly@tpu.ru

Область научных интересов: математическое моделирование лесных пожаров и загрязнения окружающей среды.

В данной работе представлены примеры использования программного обеспечения PHOENICS для описания процессов тепло- и массообмена в окружающей среде. Проведен краткий обзор по описанию данного программного обеспечения. Разработана математическая модель теплообмена при пожаре в здании и возникновения верховых лесных пожаров. Математическая модель лесного пожара получена на основе анализа экспериментальных данных и использования понятий и методов механики реагирующей среды. В работе представлена новая математическая постановка данной задачи и методика ее численного решения с помощью программного обеспечения PHOENICS. Представлены графики пространственного распределения основных функций рассматриваемых процессов. Полученные в работе распределения температуры, концентраций компонентов и векторных полей скорости для различных скоростей ветра и с течением времени позволяют изучать процессы тепло- и массообмена как в закрытых областях – зданиях, так и в открытых при лесных пожарах.

**Ключевые слова:**

Математическая модель, пожар, тепловой поток, турбулентность, дискретный аналог.

Программное обеспечение PHOENICS [1] – это многофункциональное ПО, позволяющее прогнозировать и формализовать описание, например, чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера. Программа позволяет решать одно-, дву- и трехмерные задачи с учетом тепло- и массообмена, турбулентности, переноса энергии излучением и химических реакций. Данное программное обеспечение может быть использовано для изучения процессов тепло- и массообмена в различных областях, для конструирования воздушного транспорта и оборудования, зданий и сооружений, прогнозирования загрязнения окружающей среды в различных средах, управления (если возможно) воздействия и опасности загрязнения окружающей среды. Графический редактор (VR – virtual reality) в составе PHOENICS позволяет задавать в расчетной области конструкции с необходимыми свойствами материалов, из которых они изготовлены. В соответствии с поставленной задачей имеется возможность определять необходимые для данной математической модели уравнения, начальные и граничные условия, задавать источники членов, описывающие изучаемый процесс. При этом PHOENICS генерирует специальный код, который пользователь может редактировать для задания новых условий и свойств математической модели решаемой задачи. Кроме того, имеется возможность подключать дополнительные компилированные модули, написанные на алгоритмическом языке (например, Fortran). Определенную трудность, требующую знаний вычислительных методов и механики жидкости и газа, представляет получение корректного численного решения за приемлемое время счета на компьютере. В специальном модуле требуется задать параметры дискретизации расчетной области и параметры итерационного процесса. Результаты численного решения задач могут быть представлены с помощью развитого графического интерфейса в виде изолиний, изоповерхностей искомым функций, векторных полей скорости, линий тока и т. д. На

сайте компании CHAM разработчика PHOENICS имеется подробное описание основных математических моделей и численных методов, используемых в данном программном обеспечении.

В состав программного обеспечения PHOENICS входит несколько модулей, позволяющих решать различные типы задач (многофазная среда, деформируемое твердое тело, течение с химическими реакциями, учет электролитических процессов и др.). Например, FLAIR [2, 3] – специализированный модуль для решения задач, связанных с процессами переноса тепла, вентиляционными системами и системами кондиционирования воздуха, которые обеспечивают тепловой комфорт, здоровье и безопасность, качество воздуха и контролируют загрязнение. FLAIR позволяет инженерам при помощи мощных и легкоуправляемых инструментов прогнозировать поведение воздушных потоков, распределение температуры и движение дыма в зданиях и прочих закрытых помещениях. Данный модуль дает возможность провести исследование [2] по моделированию воздействия тепловых потоков на человека [3]. Для этого с помощью VR-редактора конструируется помещение с определенными размерами и теплофизическими свойствами материалов, из которых изготовлены конструкции. В центре помещения размещена модель человека. Также были добавлены несколько физических объектов, а именно: окна, двери и направление потока (рис. 1–2). Более подробно постановка данной задачи представлена в [2, 3]. На рис. 1 изображено полученное в процессе численного моделирования распределение векторного поля скорости, а на рис. 2 – распределение температуры в расчетной области.

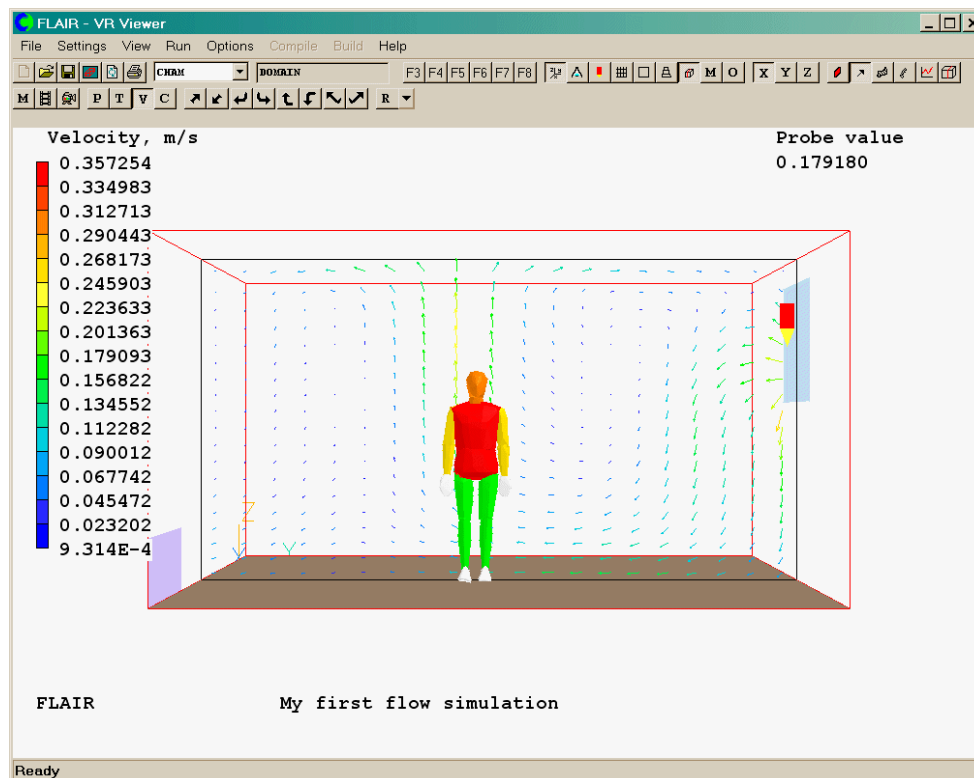


Рис. 1. Распределение векторов скоростей

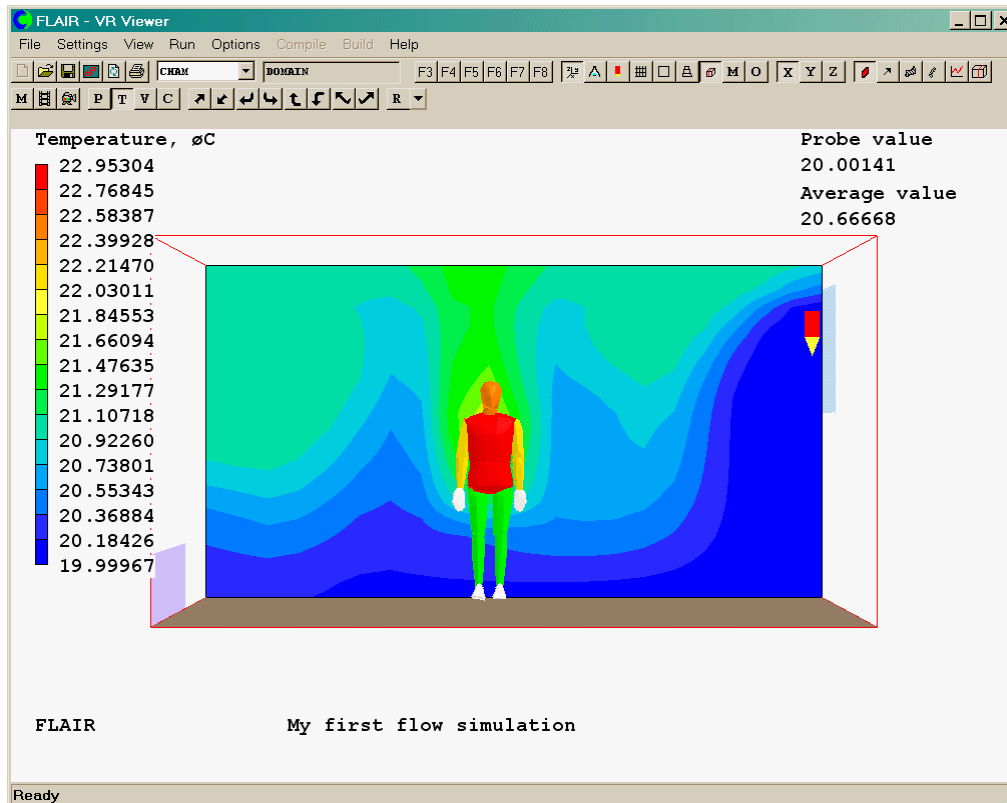


Рис. 2. Распределение полей температур

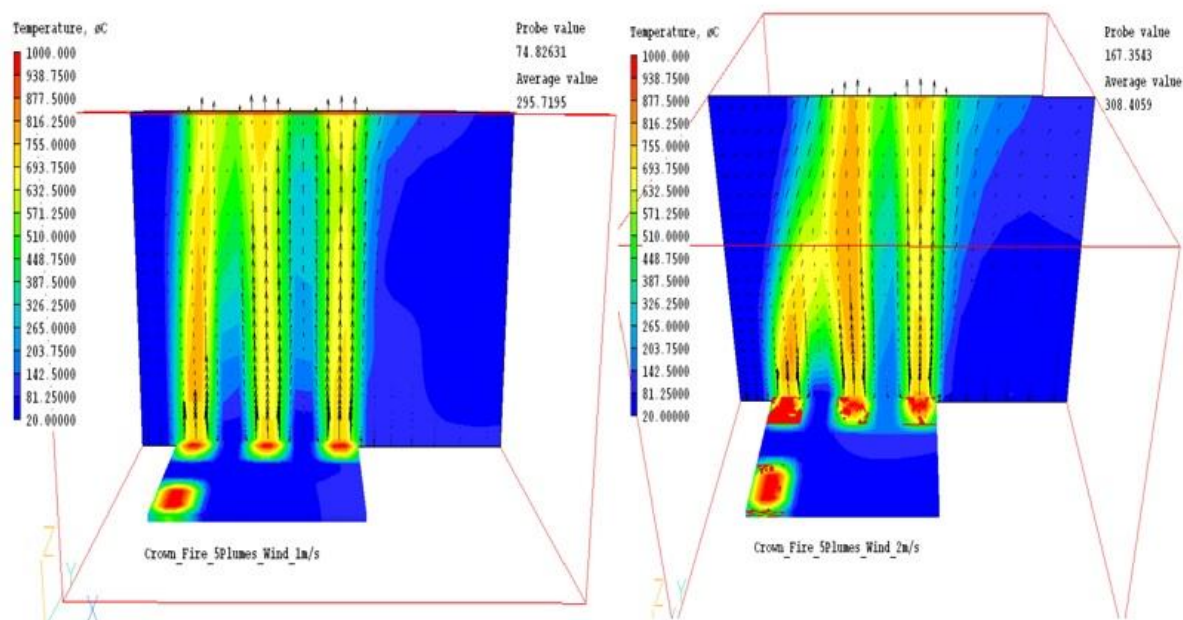
Для демонстрации возможностей программного обеспечения PHOENICS рассматривалась математическая модель течения в приземном слое атмосферы при лесных пожарах [4]. Численно решалась трехмерная нестационарная система уравнений сохранения (массы, концентрации продуктов горения, импульса и энергии). Математически задача сводилась к решению следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho U) &= 0; \\ \frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho C U - \rho D_{\text{eff}} \operatorname{grad} C) &= S_C; \\ D_{\text{eff}} &= \nu_l / Sc_l + \nu_t / Sc_t; Sc_l = D_l / \nu_l, Sc_t = 1; \\ \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u_i U - \rho \nu_{\text{eff}} \operatorname{grad} u_i) &= -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i; \\ i &= 1, 2, 3; U = (u_1, u_2, u_3); \nu_{\text{eff}} = \nu_l + \nu_t; \\ \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho c_p T U - \rho a_{\text{eff}} \operatorname{grad}(c_p T)) &= \frac{dP}{dt} + S_h, \\ a_{\text{eff}} &= \nu_l / Pr_l + \nu_t / Pr_t; Pr_l = \rho \nu_l c_p / k_l; Pr_t = 1. \end{aligned}$$

Здесь  $c_p$ ,  $\rho$  – теплоемкость и плотность газовой фазы;  $T$  – температура;  $C$  – массовая концентрация;  $P$  – давление;  $U$  – вектор скорости;  $u_i$  – проекции скорости на оси  $x_i$ ;  $t$  – время;  $D$  – коэффициент диффузии,  $S_h$  – источниковый член для описания процесса горения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $Sc$ ,  $Pr$  – числа Шмидта и Прандтля. Индексы  $l$  и  $t$  относятся к ламинарным и турбулентным параметрам. Для определения коэффициента турбулентной вязкости  $\nu_t$  использовалась стандартная  $k$ - $\epsilon$ -модель турбулентности описания течения в пограничном слое атмосферы. Радиационный теплообмен (коэффициент  $S_h$  – в уравнении теплопроводности) учитывался с использованием встроенной в PHOENICS модели излучения IMMERSOL [1]. На гра-

ницах расчетной области параметры лесных пожаров (вертикальная скорость газа и температура пламени и т. д.) определяются на основе эмпирических корреляций в зависимости от интенсивности лесных пожаров.

В рассматриваемой области  $1000 \times 1000 \times 500$  м задавались несколько отдельных лесных пожаров размерами  $100 \times 100$  м. Исследовалось поведение атмосферного пограничного слоя в зависимости от состояния окружающей среды (скорость ветра, температурная стратификация и шероховатость поверхности земли и т. д.) в окрестности очагов лесных пожаров. Изучалось гидродинамическое и тепловое взаимодействие между несколькими конвективными колонками. В результате математического моделирования получены стационарные распределения трехмерных полей скорости, температуры, концентрации дыма и потоков теплового излучения (рис. 3–5) для различных скоростей ветра. Из рисунков видно, что изучалось влияние скорости ветра на угол наклона конвективной колонки, а также на распределение температуры, потоков тепла и массы в расчетной области. Результаты расчетов, полученные с помощью данной модели, могут быть использованы для оценки теплового воздействия как на поверхности земли (например, на здания, сооружения и т. д.), так и над очагами горения (например, на летальные аппараты).



**Рис. 3.** Распределение температуры и скорости в конвективных колонках над очагами лесных пожаров для различных скоростей ветра (1 и 2 м/с)

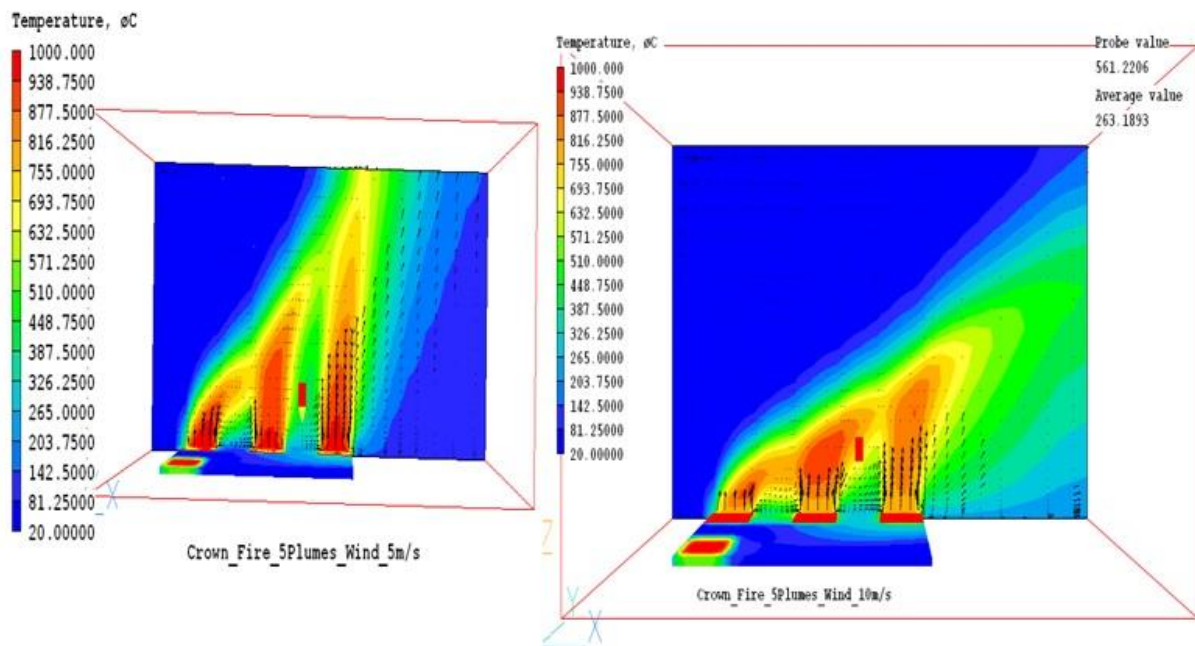


Рис. 4. Распределение температуры и скорости в конвективных колонках над очагами лесных пожаров для различных скоростей ветра (5 и 10 м/с)

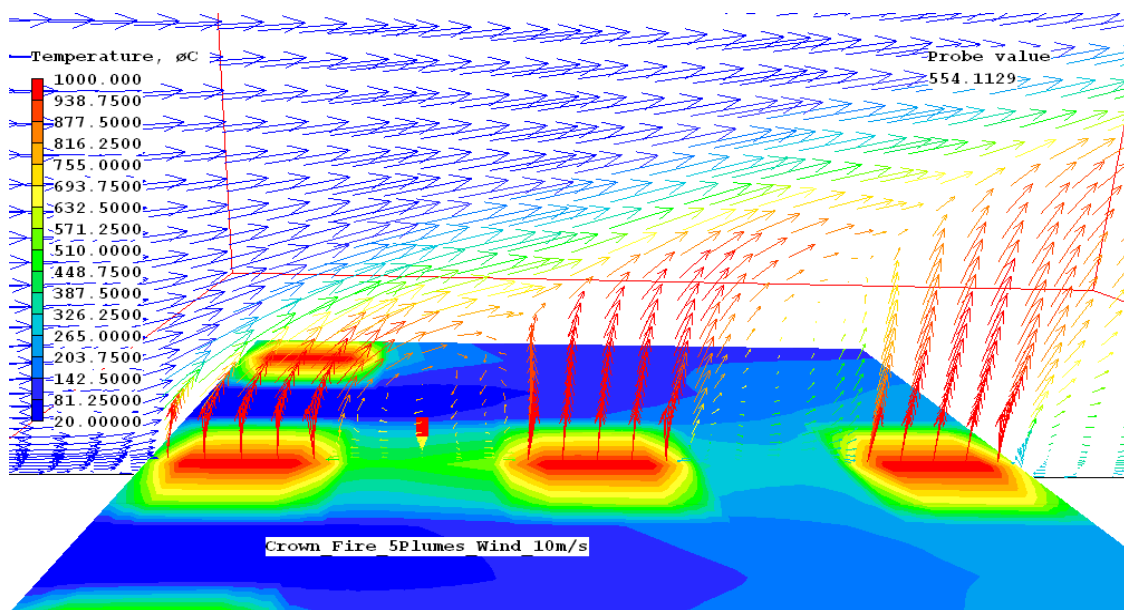


Рис. 5. Распределение температуры на подстилающей поверхности и скорости ветра над очагами лесных пожаров для скорости ветра 10 м/с

На основе полученных данных из представленных результатов следует, что PHOENICS позволяет изучать взаимное влияние пограничного слоя атмосферы и конвективной колонки от крупномасштабного верхового лесного пожара. Таким образом, математическое моделирование с использованием программного обеспечения PHOENICS может систематически применяться для исследования динамики лесных пожаров, распространяющихся и взаимодействующих с приземным слоем атмосферы при различных внешних условиях. Например, при различных метеорологических условиях (температура воздуха, скорость ветра, стратификация атмосферы и т. д.), рельефе местности, типе леса (различные виды лесных горючих материалов) и его параметрах (запас, влагосодержание и т. д.). Исследование с помощью PHOENICS позволяет лучше понять основные физические механизмы, которые контролируют возникновение и

развитие крупномасштабных лесных пожаров, их распространение и влияние на здания, сооружения, технику и людей, а также дает возможность разработки инструментов моделирования поведения данного опасного явления для его прогноза и борьбы с ним.

Таким образом, с помощью PHOENICS с использованием модуля FLAIR было апробировано решение практически важных задач, связанных с моделированием воздействия тепловых потоков на человека и возникновения и развития крупномасштабных лесных пожаров. Представлены полученные с помощью численного решения распределения скорости и температуры в зависимости от различных параметров, которые могут быть использованы для оценки состояния окружающей среды в окрестности лесных пожаров. Данное ПО также может быть полезно для моделирования чрезвычайных ситуаций, связанных с загрязнением окружающей среды, а также пожарами и взрывами. Для использования этого ПО в учебном процессе и научных исследований созданы методические указания, которые помогут с минимальными затратами решить практические важные задачи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Official site of company CHAM / Products, 2013. – URL: [www.cham.co.uk](http://www.cham.co.uk) (дата обращения: 05.11.2013).
2. Official site of company CHAM / FLAIR. User Guide CHAM Technical Report TR 313. – URL: [www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_docs/tr313/tr313.htm](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr313/tr313.htm) (дата обращения: 05.11.2013).
3. Official site of company CHAM / A FLAIR for SIMULATION. – URL: [www.cham.co.uk/DOCS/FLAIR-08.pdf](http://www.cham.co.uk/DOCS/FLAIR-08.pdf) (дата обращения: 05.11.2013).
4. Agranat V., Perminov V.A. CFD Modeling of large crown forest fires behavior // Wildland Fire Canada 2010. Kitchener, Ontario. October 5–7, 2010. – 19 p. – URL: [http://www.acfda.org/docs/CFD\\_Wildland\\_Fire\\_2010.pdf](http://www.acfda.org/docs/CFD_Wildland_Fire_2010.pdf)

*Поступила 24.01.2014 г.*