

УДК 519.8

К ОБОСНОВАНИЮ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Д. В. Баровик, В. И. Корзюк, В. Б. Таранчук

Институт математики НАН Беларуси
e-mail: barovikD@gmail.com, korzyuk@bsu.by, taranchuk@bsu.by
Поступила 30.12.2012

Рассматривается математическое описание процессов распространения низовых лесных пожаров. Изучаются вопросы корректности принятой постановки краевой задачи. Также дано обоснование предлагаемого авторами обобщения классической полуэмпирической модели Ротермела. Обсуждаются результаты анализа приближенных решений, в частности, зависимость скорости распространения фронта пожара от определяющих параметров задачи.

Введение. Из множества природных и антропогенных факторов негативного влияния на состояние и динамику лесных экосистем доминирующими являются пожары, которые наносят значительный материальный и экологический ущерб. Для научно обоснованных успешных действий, направленных на предупреждение, прогноз развития и ликвидацию лесных пожаров, требуется разработка соответствующих компьютерных моделей и программных средств, их включение в состав систем поддержки принятия решений по предотвращению чрезвычайных ситуаций в лесах и окрестностях.

В зависимости от того, какие ярусы леса, участки территории вовлечены в процесс распространения огня, лесные пожары подразделяются на подземные или почвенные, низовые и верховые. При почвенных или подземных пожарах (ground fires, smouldering fires) горит самый нижний ярус леса (подстилочные пожары) или торф (пожары на торфяниках). Такие пожары распространяются очень медленно, однако могут иногда достигать нескольких метров в глубину и оставаться необнаруженными долгое время. Эффективные методы тушения таких пожаров отсутствуют [1].

При низовых лесных пожарах (surface fires) сгорают опад, напочвенный покров, травы и кустарники. Большинство лесных пожаров начинаются как низовые, которые могут потом перейти в подземные или верховые в зависимости от типа лесных горючих материалов (ЛГМ) и климатических условий. Характерная скорость распространения фронта низового лесного пожара 1 см/с.

Пожар называется верховым (crown fire), если при его распространении повреждаются кроны деревьев. Верховые пожары классифицируются в зависимости от типа взаимодействия с низовыми пожарами. Если кроны деревьев сгорают в результате воспламенения от огня только низового пожара, пламя не перекидывается напрямую на соседние кроны, то такие верховые пожары называются пассивными верховыми пожарами (passive crown fires). Скорость распространения верхового пожара такого типа совпадает со скоростью распространения низового пожара. Если пожар распространяется как сплошная стена огня и ЛГМ повреждается во всех ярусах леса одновременно, то говорят о повальном верховом лесном пожаре (active crown fire или dependent crown fire). Верховой пожар называется вершинным верховым (independent

crown fire или running crown fire), если огонь быстро распространяется по кронам деревьев в направлении ветра независимо от низового пожара. Относительно густое расположение деревьев и сильный ветер необходимые условия распространения лесного пожара таким способом. Характерная скорость распространения фронта вершинного верхового лесного пожара 1 м/с, т.е. на два порядка выше, чем низового пожара.

Если горение ЛГМ носит многоочаговый характер, обусловленный разлетом (переносом) горящих частиц из зоны основного (материнского) лесного пожара, то говорят о пятнистом (spotting) лесном пожаре.

Самыми распространенными лесными пожарами являются низовые. На сегодняшний день разработано около полусотни моделей низовых лесных пожаров, при этом только четыре из них активно применяются в различных специализированных программных комплексах [2]. Это эмпирические модели А. McArthur [3] (Австралия), Forestry Canada Fire Danger Group (Канада), W. Hargrove (США) и полуэмпирическая модель Ричарда Ротермела [4] (R. Rothermel, США). Подробный обзор видов лесных пожаров, классификация существующих моделей и библиографические ссылки даны в работах [2, 5, 6].

1. Основы модели Ротермела. Наибольшее применение получила *полуэмпирическая модель* низовых лесных пожаров Ричарда Ротермела (R. Rothermel) [4]. Ее программные реализации (BehavePlus [7], FARSITE /Fire Area Simulator/ [8], FCCS /Fuel Characteristic Classification System/ [9, 10] и др.) используются в большинстве лесных служб Северной Америки и Европы. Основание широкого распространения модели — ее простота. Методика Ротермела на основе элементарных вычислений [4] отвечает на вопрос, какова прогнозируемая скорость распространения фронта низового лесного пожара в направлении ветра в зависимости от характеристик охваченных огнем растительности, угла склона местности и скорости ветра. Перечислим все исходные параметры модели Ротермела. Их немного: ω_0 , кг/м² — запас ЛГМ на местности в абсолютно сухом состоянии; δ , м — глубина слоя ЛГМ; σ , м⁻¹ — удельная поверхность ЛГМ; h , Дж/кг — теплотворная способность сухого горючего; ρ_p , кг/м³ — плотность горючего материала в абсолютно сухом состоянии; M_f — влагосодержание ЛГМ; M_x — критическое влагосодержание, т.е. минимальное значение влагосодержания ЛГМ, при достижении которого горение прекращается; S_T — массовая доля всех минеральных веществ в ЛГМ; S_e — массовая доля эффективных минеральных веществ; V , м/с — скорость ветра на середине высоты пламени, $\text{tg } \varphi$ — тангенс угла наклона рельефа.

Все параметры, за исключением двух последних (рельеф и скорость ветра), описывают тип горючей растительности. В последние годы в США и Канаде активизированы работы по классификации и картографированию типовых видов растительности; определяются перечисленные выше физико-химические характеристики, необходимые для использования в уравнениях модели Ротермела. Например, в работе [11] приведена классификация 40 типов растительности региона Скалистых гор США, создан соответствующий “альбом” с фотографиями. В США в настоящее время запущен приоритетный проект в рамках системы FCCS [10] по созданию ГИС-совместимых карт типов растительности всей территории с дискретом 30 × 30 м. (на текущий момент в заархивированном виде размер базы данных с картой [9] уже превышает 2 гигабайта).

Несмотря на такое широкое использование модели Ротермела, следует отметить ее существенные недостатки. Оригинальная модель является одномерной, а результатом ее применения является число — скорость распространения фронта пожара в направлении ветра. Модель вообще не отвечает на вопрос, какова скорость фронта пожара в направлениях флангов и против ветра. В разработанных позднее программных системах реализованы разные подходы, которые часто являются интуитивными и не содержат должных обоснований. Для примера отметим, как в модели Ротермела учитывается влияние ветра. Первоначально вычисляется скорость распространения фронта пожара в условиях однородного распределения ЛГМ на

равнинной местности при полном отсутствии ветра. Далее полученная скорость распространения пожара умножается на безразмерный коэффициент, пропорциональный $(1 + \varphi_W + \varphi_S)$, где φ_W — отвечает за влияние ветра, φ_S — за уклон рельефа.

Согласно [12], множитель “учета ветра” φ_W получен эмпирически в лаборатории путем наблюдения за горением опилок, а также с учетом результатов работы [3] по сжиганию травяного покрова в реальных условиях. Коэффициент φ_W вычисляется по формуле [4]:

$$\varphi_W = C \cdot V^B \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E}, \quad (1)$$

где V — скорость ветра на середине высоты V пламени, а C , B , E и оптимальная плотность упаковки ЛГМ β_{op} — функции, зависящие только от удельной поверхности частиц ЛГМ σ м⁻¹ (т.е. отношения площади поверхности горючих частиц к их объему). Подробно о формулах для функций, упомянутых в уравнении (1), и их физической интерпретации можно прочитать в первоисточнике у Ротермела [4].

В [12] показано, что коэффициент φ_W модели Ротермела, очевидно, не согласуется с натурными наблюдениями в части зависимости степени B от σ . Например, при σ более 107 см⁻¹ (горение травы) значение B превышает 2. Физически это означает, что скорость распространения фронта горения таких ЛГМ квадратично растет с увеличением скорости ветра. Для ЛГМ со значением $\sigma = 6.3$ см⁻¹ получается линейная зависимость ($B = 1$), а при горении веточек с диаметром тоньше 0.64 см зависимость получается слабее, чем “корень квадратный” ($B < 0.5$). Такое экстремальное влияние характерного размера частиц ЛГМ до сегодняшнего дня не было ни экспериментально, ни теоретически подтверждено [12]. Согласно работам [13, 14] и [15] (среди авторов этой работы есть и сам Ротермел) наблюдения за реальными пожарами указывают на линейную или слегка экспоненциальную зависимость скорости фронта пожара от размеров частиц ЛГМ.

Австралийская система прогнозирования пожаров [14] при реализации модели Ротермела в уравнении (1) вовсе использует константу $B = 1.1$. В экспериментах [16] по сжиганию слоя опада сосновых иголок получено значение $B = 0.8$. Американская система FCCS [9] по умолчанию использует $B = 1.2$, но дает возможность эксперту “поиграть” с этой константой при моделировании.

Одним из вариантов обобщения модели Ротермела для реальных расчетов является метод, изложенный в [17, 18]. В этих работах приведена адаптация модели Ротермела применительно к условиям лесов Республики Беларусь и ее компьютерная реализация. Программный комплекс (ПК) позволяет моделировать в реальном времени распространение лесных пожаров с учетом неоднородности распределения типов растительности и различных преград (ручьи, минерализованные полосы и др.). В ПК рассчитывается форма контура, периметр и площадь пожара в различные моменты времени. Реализована возможность визуализации результатов на электронных картах местности и экспорт в геоинформационные системы. Для наполнения базы данных типовых сценариев распространения пожаров наряду с расчетными формулами Ротермела в ПК используются и результаты вычислений по теоретической модели [19–21].

2. О теоретических моделях лесных пожаров. Область применения эмпирических моделей ограничена, а точность прогноза не высока в ситуациях, отличных от тех, при которых были собраны опытные данные. Поэтому актуально построение и исследование теоретических моделей лесных пожаров, которые базируются на законах газовой динамики, тепломассопереноса, теории горения, других фундаментальных законах физики, химии. Такие модели записываются, как правило, в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. Верификация теоретических моделей весьма затруднительна, однако только они, описывая развитие лесного пожара на основе общих законов и с учетом большого количества факторов, позволяют отвечать на широкий круг вопросов [1, 2].

Как было отмечено в [2], относительно теоретических моделей распространения лесных пожаров чаще других используется в качестве основы и считается наиболее обоснованной модель А.М. Гришина [1] — модель многофазной пористой реагирующей среды, которая описывает процессы нагрева, сушки, пиролиза и горения древесины. Эта модель базируется на фундаментальных законах физики (сохранения массы, количества движения и энергии), теоретически обоснована, частично подтверждена натурными и лабораторными экспериментами. Именно эта модель была принята авторами за основу при создании компьютерного комплекса по моделированию распространения вершинных верховых пожаров. В работах [19–21] приведены результаты детализации модели, уточнены определяющие функции и параметры применительно к характерным условиям возникновения и протекания процессов распространения лесных пожаров в Беларуси, изложены основы алгоритмической и компьютерной реализации. Эффективность модели демонстрируется в основном на примере расчета беглых верховых лесных пожаров, как наиболее быстро распространяющихся и наносящих значительный материальный ущерб.

В настоящей работе обсуждаются вопросы корректности постановки начально-краевой задачи и описания процессов лесных низовых пожаров. На основании серий проведенных расчетов двумерной задачи предлагается обобщение модели Ротермела. В частности, приводится зависимость от параметров задачи скорости распространения фронтов пожара в направлениях по и против ветра.

3. Адаптированная математическая модель низовых лесных пожаров. В приведенной ниже математической модели распространения лесных пожаров вычисляется эволюция распределений следующих величин: T — осредненная по высоте слоя ЛГМ температура в Кельвинах; φ_j , $j = 1, 2, 3, 4$ — объемные доли многофазной реагирующей среды, где φ_1 соответствует сухому органическому веществу лесных горючих материалов, φ_2 — связанной с ЛГМ воде в жидко-капельном состоянии, φ_3 — коксика (конденсированному продукту пиролиза), φ_4 — минеральной части ЛГМ (золе); c_ν , $\nu = 1, 2, 3$ — массовые концентрации компонентов газовой фазы, где c_1 соответствует кислороду, c_2 — горючим газам (горючим компонентам продуктов пиролиза), c_3 — смеси остальных газов (инертных компонентов воздуха, водяного пара, инертных продуктов реакций пиролиза, горения коксика и окисления горючих газов).

При построении модели учитываются следующие физико-химические процессы: “подвод” теплоты в результате конвекции, теплопроводности и излучения, прогрев ЛГМ, их сушка и пиролиз, горение газообразных и твердых продуктов пиролиза. Вывод уравнений, обоснование модели, численная схема и особенности организации расчетов приведены в публикациях [19–22] для беглых верховых лесных пожаров. В данной работе делается “формальный” переход от верховых пожаров к низовым, а именно, используется та же система дифференциальных уравнений, но с новыми значениями физико-химических величин, характерными для низовых лесных пожаров.

Относительно неизвестных функций φ_j ($j = 1, 2, 3, 4$), c_ν ($\nu = 1, 2, 3$), T , зависящих от времени и пространственных координат, формулируется начально-краевая задача.

3.1. Уравнения модели:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \Phi_{\varphi_1}(\varphi_1, T), \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \Phi_{\varphi_2}(\varphi_2, T), \quad \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \Phi_{\varphi_3}(\varphi_1, \varphi_3, c_1, c_2, T), \quad \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + (V, \text{grad } c_1) - \frac{1}{\rho_5} \text{div}(\rho_5 D_T \text{grad } c_1) = \Phi_{c_1}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T), \quad (3)$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} + (V, \text{grad } c_2) - \frac{1}{\rho_5} \text{div}(\rho_5 D_T \text{grad } c_2) = \Phi_{c_2}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_5 c_{p5}(V, \text{grad } T) - \text{div}(\lambda_T \text{grad } T)) \left(\rho_5 c_{p5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \varphi_j c_{pj} \right)^{-1} = \\ = \Phi_T(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, c_1, c_2, T). \end{aligned} \quad (5)$$

3.2. Определяющие функции:

$$\Phi_{\varphi_1}(\varphi_1, T) = -\frac{R_1}{\rho_1}, \quad \Phi_{\varphi_2}(\varphi_2, T) = -\frac{R_2}{\rho_2}, \quad \Phi_{\varphi_3}(\varphi_1, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{\alpha c R_1}{\rho_3} - \frac{M_c}{M_1} \frac{R_3}{\rho_3}, \quad (6)$$

$$\Phi_{c_1}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{1}{\rho_5} \left(R_{51} - c_1 Q - \frac{\alpha}{c_{p5} \Delta h} (c_1 - c_{1\infty}) \right), \quad (7)$$

$$\Phi_{c_2}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{1}{\rho_5} \left(R_{52} - c_2 Q - \frac{\alpha}{c_{p5} \Delta h} (c_2 - c_{2\infty}) \right), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Phi_T(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, c_1, c_2, T) = \\ = \left(q_5 R_5 - q_2 R_2 + q_3 R_3 - \frac{\alpha}{\Delta h} (T - T_\infty) - 4\kappa_R \sigma T^4 \right) \left(\rho_5 c_{p5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \varphi_j c_{pj} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\sum_{\nu=1}^3 c_\nu = 1, \quad \rho_5 = \frac{\rho_\infty T_\infty}{M_\infty T} \left(\sum_{\nu=1}^3 \frac{c_\nu}{M_\nu} \right)^{-1}, \quad Q = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_C}{M_1} R_3, \quad (10)$$

$$R_1 = k_{01} \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad R_2 = k_{02} T^{-1/2} \rho_2 \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \quad (11)$$

$$R_3 = k_{03} s_\sigma \varphi_3 \rho_5 c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right),$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{R_5 M_1}{2M_2}, \quad R_{52} = (1 - \alpha_c) \nu_\Gamma R_1 - R_5, \quad (12)$$

$$R_5 = \rho_5 \min\left(c_2, \frac{M_2}{2M_1} c_1\right) k_{CO} \exp\left(-\frac{E_{CO}}{RT}\right). \quad (13)$$

Здесь t — время; V — вектор равновесной скорости ветра; T_∞ — невозмущенная температура окружающей среды в Кельвинах; ρ_j , $j = 1, 2, 3, 4$ — истинные плотности j -й фазы; ρ_5 — плотность газовой фазы (смеси газов); ρ_∞ — невозмущенная плотность смеси газов (плотность воздуха); $c_{1\infty}$ и $c_{2\infty}$ — массовые концентрации кислорода и горючих газов в невозмущенной атмосфере; M_ν , $\nu = 1, 2, 3$ — молекулярные массы компонентов газовой фазы; M_C — молекулярная масса углерода, M_∞ — молекулярная масса (невозмущенная) воздуха; c_{pj} , $j = 1, 2, 3, 4$ — теплоемкости j -й фазы; c_{p5} — теплоемкость газовой фазы; Q — массовая скорость образования газовой фазы; λ_T — коэффициент турбулентной теплопроводности; D_T — коэффициент диффузии; q_2 , q_3 и q_5 — тепловые эффекты процессов испарения, горения конденсированного горючего и газообразного горючего продукта пиролиза соответственно; Δh — высота слоя ЛГМ ($\Delta h = h_2 - h_1$, где h_2 и h_1 — высоты верхней и нижней границ слоя соответственно); α — коэффициент теплообмена, между окружающим воздухом и моделируемым слоем ЛГМ; κ_R — интегральный коэффициент поглощения; σ — постоянная Стефана–Больцмана; R_1 — массовая скорость реакции пиролиза (разложения под действием высокой температуры с выделением горючих газов) сухого органического вещества ЛГМ; R_2 — массовая скорость испарения воды из ЛГМ (сушки ЛГМ); R_3 — массовая скорость реакции горения коксового остатка; R_{51} , R_{52} — массовые скорости образования кислорода, горючих газов; R_5 — массовая скорость реакции горения (окисления) горючих

газов; k_{01} , k_{02} , k_{03} — предэкспоненты химических реакций; E_1 , E_2 , E_3 — энергии активации химических реакций; R — универсальная газовая постоянная; s_σ — удельная поверхность конденсированного продукта пиролиза (коксыка); α_C — коксовое число ЛГМ; ι_Γ — доля газообразных горючих продуктов пиролиза ЛГМ.

Записанная выше система (2)–(5) — нелинейная система уравнений в частных производных, она включает теплофизические коэффициенты, скорости сушки и реакций пиролиза и горения, целый ряд других эмпирических постоянных. Совокупность коэффициентов уравнений представляет оснастку принятой математической модели, является ее существенной и неотъемлемой частью. Качественная оснастка модели позволяет адекватно воспроизводить в вычислительных экспериментах наблюдаемые реальные процессы распространения лесных пожаров. Наполнение модели осуществлялось с учетом приведенных в литературных источниках сведений, причем предпочтение отдавалось тем, где упоминались экспериментальные исследования или отмечалось, что они получены с помощью решения обратных задач механики реагирующих сред. В настоящей работе также несколько величин определялись в вычислительных экспериментах на этапе адаптации модели.

Принципиально, чтобы все параметры модели были согласованы между собой. В нашем случае согласование коэффициентов осуществлялось методом варьирования, подбора конкретных параметров и распределений с учетом приведенных в литературных источниках диапазонов их изменения. Контролировалась и обеспечивалась разумная точность численных решений, их соответствие результатам опубликованных экспериментальных данных, корректность воспроизведения физических процессов.

3.3. О начальных и граничных условиях. Начальные распределения объемных долей, массовых концентраций и температуры задаются во всей области определения решения. Обозначим область моделирования через G , а ее границу — Γ . Область G можно разбить на три подобласти $G = G_{fire} \cup G_- \cup G_+$. Эти подобласти не обязательно односвязные, их взаимная геометрия может быть довольно сложной, например, для многоочаговых пожаров. Через G_- и G_+ обозначим подобласти сгоревших и не затронутых пожаром участков области G , удаленные от очагов горения на достаточное расстояние (эти подобласти характеризуются невозмущенными значениями $c_{1\infty}$, $c_{2\infty}$ и T_∞).

В зоне горения G_{fire} начальные распределения величин φ_j ($j = 1, 2, 3, 4$), c_ν ($\nu = 1, 2, 3$) и T должны быть “самосогласованными”, так как между всеми этими величинами есть определенные связи физического характера, которые необходимо учитывать. Это довольно сложные вопросы, требующие отдельного рассмотрения.

Начальные распределения в зонах “выжженная” G_- и “невыжженная” G_+ задаются следующим образом:

$$T|_{t=0}(G_- \cup G_+) = T_\infty; \quad (14)$$

$$c_1|_{t=0}(G_- \cup G_+) = c_{1\infty}, \quad c_2|_{t=0}(G_- \cup G_+) = c_{2\infty}, \quad c_3|_{t=0}(G_- \cup G_+) = 1 - c_{1\infty} - c_{2\infty}; \quad (15)$$

$$\varphi_1|_{t=0}(G_+) = \frac{\rho_0}{\rho_1}, \quad \varphi_2|_{t=0}(G_+) = (1 - \zeta)W \frac{\rho_0}{\rho_2}, \quad \varphi_3(G_+)|_{t=0} = 0, \quad \varphi_4 \equiv 0; \quad (16)$$

$$\varphi_1|_{t=0}(G_-) = 0, \quad \varphi_2|_{t=0}(G_-) = 0, \quad \varphi_3|_{t=0}(G_-) = \alpha_C \frac{\rho_0}{\rho_3}. \quad (17)$$

Здесь предполагается, что в G_- ЛГМ полностью сгорели; ρ_0 — плотность типичного слоя ЛГМ, плотности ρ_j ($j = 1, 2, 3, 4$), W — влагосодержание слоя ЛГМ и ζ — зольность лесных горючих могут быть неоднородными, соответствующие распределения в рассматриваемой области моделирования считаются заданными функциями координат.

На границе Γ области моделирования G удобно использовать так называемые мягкие граничные условия:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_\Gamma = 0, \quad \left. \frac{\partial c_1}{\partial n} \right|_\Gamma = 0, \quad \left. \frac{\partial c_2}{\partial n} \right|_\Gamma = 0. \quad (18)$$

4. О корректности приведенной постановки. Система дифференциальных уравнений принятой теоретической модели является нелинейной, коэффициенты и правые части уравнений зависят от всех искомым переменных. Физико-химические процессы имеют “взрывной” характер протекания, описывающие их функции выражаются экспоненциальными зависимостями от температуры. Температура в зоне горения (обычно относительно узкой) меняется от невозмущенного до значения более тысячи градусов Кельвина. Также в зоне пожара по направлению его распространения распределения массовых концентраций горючих газов и окислителя, объемных долей компонент ЛГМ имеют большие градиенты.

Записанная выше система уравнений даже в одномерном случае очень сложна; в печати нет публикаций, упоминаний построенных точных или хотя бы приближенных аналитических решений. Относительно записанных граничных условий — они представляются корректными, исходя из содержания и типов уравнений модели.

В каком ракурсе авторами изучались вопросы корректности приведенной постановки задачи? Анализировались численные решения и их поведение при возмущении определяющих функций и начальных условий. Уравнения аппроксимировались по явным однородным схемам, описание дано в [19, 20].

Следует заметить, что для низового пожара, по аналогии с верховым [20], возможны несколько режимов развития чрезвычайной ситуации. В частности, режимы затухания и устойчивого распространения. Например, для режима устойчивого распространения характерны установление определенной геометрии и формы профилей температуры, физико-химических параметров. Они без существенных изменений переносятся во всех направлениях развития процесса (по, против ветра и во флангах).

Приведем несколько результатов анализа поведения возмущенных решений для режима устойчивого распространения лесного пожара. В соответствующих расчетах уравнений системы (2)–(15) в одномерном линейном случае, чтобы не было влияния эффектов аппроксимации и устойчивости в каждом конкретном варианте шаг сетки h по пространству подбирался таким, чтобы профили решений были идентичны в расчетах с h и $h/2$. Во всех вариантах временной шаг выбирался таким, чтобы выполнялись условия устойчивости разностной схемы.

На рис. 1 для четырех моментов времени показаны графики, иллюстрирующие эволюцию распределений температуры и объемной доли сухих ЛГМ в элементе распространяющейся по ветру кромки пожара. Изучались три варианта задания разных возмущений начального распределения температуры (тонкая сплошная, жирная сплошная и пунктирная линии), другие начальные распределения для этих вариантов принимались одинаковыми. Для всех рассмотренных вариантов малых возмущений начальных условий решения со временем сходятся к одним и тем же распределениям. Не приводя дополнительные графики, отметим, что при незначительных возмущениях других вычисляемых распределений (объемные доли сухих ЛГМ, влагосодержание, массовая концентрация горючих газов в очаге пожара) с течением времени также имеет место сходимость. Профили распределений в расчетной области (в зоне пожара) через некоторое время принимают характерную форму, они без существенных изменений переносятся в направлениях развития процесса.

Графики рис. 2 иллюстрируют другую конфигурацию возмущений начальных распределений температуры. Но, как и в предыдущих вариантах, с течением времени все распределения принимают одинаковые фиксированные формы и переносятся по потоку с постоянной скоростью. Однако в отличие от графиков на рис. 1 для “пунктирных” профилей наблюдается сдвиг решений по пространству на фиксированное расстояние по сравнению со “сплошными” графиками. Иллюстрации на рис. 3 показывают, что на сдвиг оказывает взаимное расположение распределений температуры и объемной доли сухих ЛГМ в начальный момент.

5. Об инструментарии вычислительных экспериментов. Изучение особенностей численных решений на этапах исследования их точности, анализа поведения базовых и асимпто-

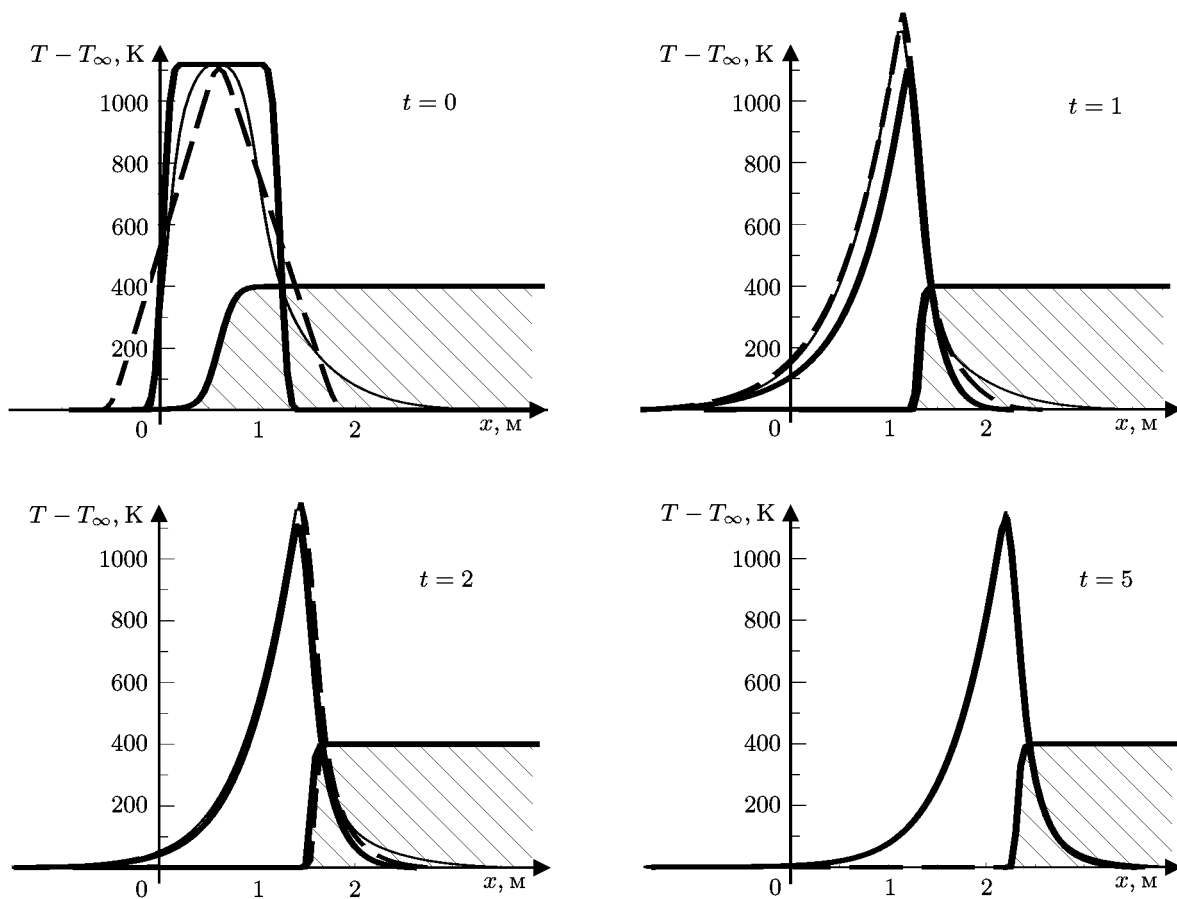


Рис. 1. Распределения температуры и объемной доли сухих ЛГМ (время $t = 0, 1, 2$ и 5 с.)

тики возмущенных решений, обнаружения качественных особенностей моделируемых процессов предполагают многовариантные расчеты. Пришлось провести сотни продолжительных по времени вычислительных экспериментов. Моделирование пожаров авторами проводилось на “обычных” компьютерах. Расчет большинства вариантов в двумерной постановке по времени занимает до нескольких суток. Для реализации возможностей проведения многовариантных расчетов с разными параметрами сетки и характеристиками модели, без повтора признанных удовлетворительными фрагментов расчетов, разработаны специальные модули автоматизации проведения и протоколирования серий вычислительных экспериментов. Запрограммированный инструментальный позволяет изменять параметры моделирования, сетки и сохранять любые наборы результатов в базе данных [22]. Конечно, ввиду вычислительной сложности задачи очевидным становится необходимость разработки и исследования методов распараллеливания вычислительного алгоритма задачи, проведение соответствующих расчетов на суперкомпьютере.

6. Результаты расчетов, предлагаемое обобщение модели Ротермела. Как отмечено выше, широко применяемая модель Ротермела одномерна, ее результатом является прогноз скорости распространения фронта пожара в направлении ветра. В обобщении модели предлагаются выражения для расчета скоростей фронта пожара в направлениях флангов и против ветра. Основанием является анализ решений задачи распространения низового пожара в двумерной постановке.

Приведем представительные результаты численного моделирования распространения пожара для случая равномерно распределенного сильно высушенного слоя опада и мхов, когда

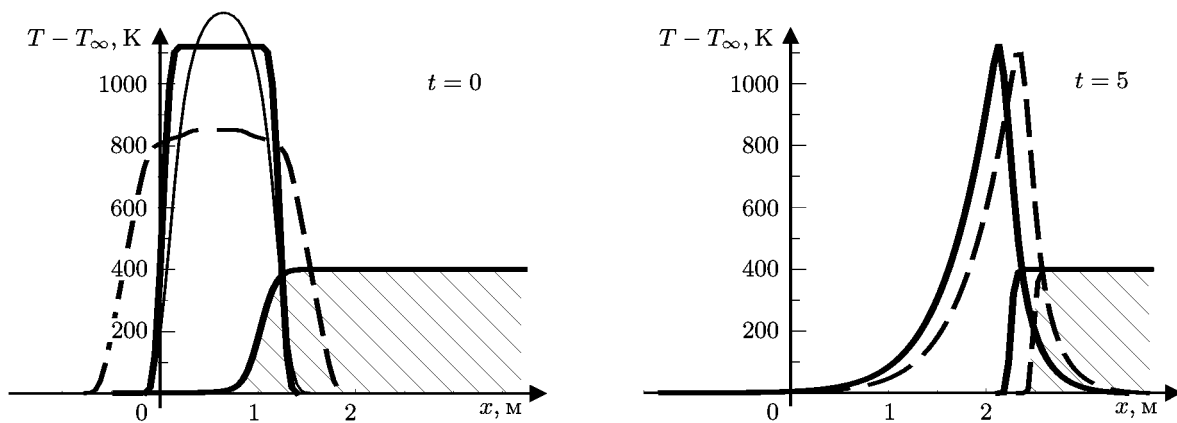


Рис. 2. Распределения температуры и объемной доли сухих ЛГМ. Второй комплект формы возмущений начального профиля температуры

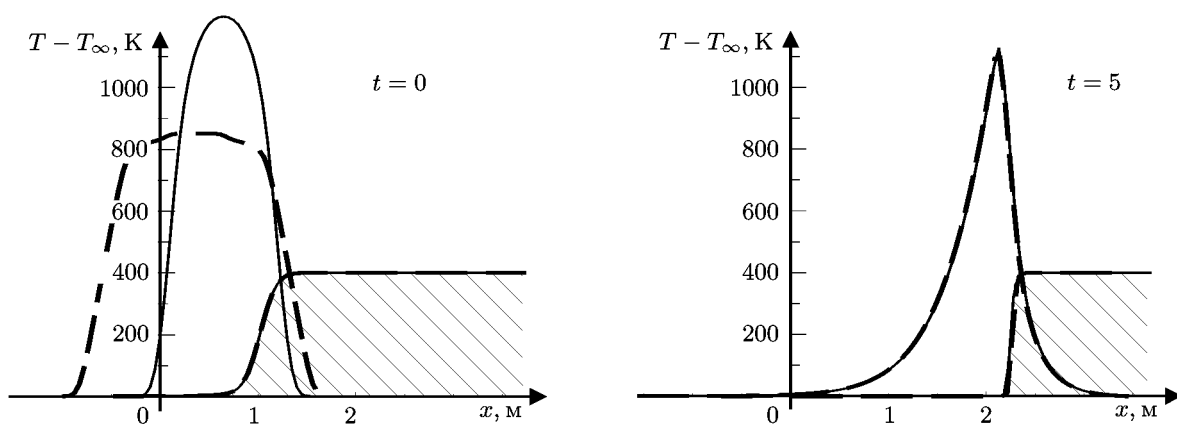


Рис. 3. Распределения температуры и объемной доли сухих ЛГМ (время $t = 0$ и 5 с). Сдвиг распределения температуры относительно объемной доли сухих ЛГМ

площадь возгорания — квадрат. При анализе получаемых численных решений основное внимание уделялось контролю распределений вблизи центральной линии по направлению ветра, где решения локально одномерны, а также скоростей распространения фронта и тыла. В расчетах использовались следующие значения: $V = 2$ м/с, $W = 10\%$, $\zeta = 0$, $\rho_0 = 10$ кг/м³, $\Delta h = 0.1$ м, $T_\infty = 25$ С, $\rho_1 = 500$ кг/м³, $\rho_2 = 1000$ кг/м³, $\rho_3 = 200$ кг/м³, $\rho_4 = 200$ кг/м³, $\rho_\infty = 1.15$ кг/м³, $c_{1\infty} = 0.23$, $c_{2\infty} = 0$, $M_1 = 32$, $M_2 = 28$, $M_3 = 29$, $M_C = 12$, $M_\infty = 29$, $c_{p1} = 2000$ Дж/(кг·К), $c_{p2} = 4180$ Дж/(кг·К), $c_{p3} = 900$ Дж/(кг·К), $c_{p4} = 1000$ Дж/(кг·К), $c_{p5} = 1000$ Дж/(кг·К), $q_2 = 3 \cdot 10^6$ Дж/кг, $q_3 = 1.2 \cdot 10^7$ Дж/кг, $q_5 = 10^7$ Дж/кг, $\lambda_T = 1000$ Дж/(м·с·К), $D_T = 1$ м²/с, $\alpha = 300$ Вт/(м²·К), $\alpha_c = 0.1$, $\nu_\Gamma = 0.8$, $\kappa_R = 0.3$, $s_\sigma = 1000$ м⁻¹, $E_1/R = 9400$ К, $E_2/R = 6000$ К, $E_3/R = 10000$ К, $k_{01} = 3.63 \cdot 10^4$ с⁻¹, $k_{02} = 6 \cdot 10^5$ К^{0.5} с⁻¹, $k_{03} = 1000$ м·с⁻¹.

Графики рис. 4 иллюстрируют рассчитанные распределения температуры T и объемной доли сухих ЛГМ φ_1 . Для приведенных моментов времени на начальной стадии форма профилей меняется — этап развития процесса. Далее профили температуры и объемной доли сухих ЛГМ устанавливаются, в последующем их формы меняются незначительно, возмущения переносятся по и против ветра с разными скоростями — режим устойчивого распространения. Для рассматриваемого варианта профили устанавливаются после 15 с.

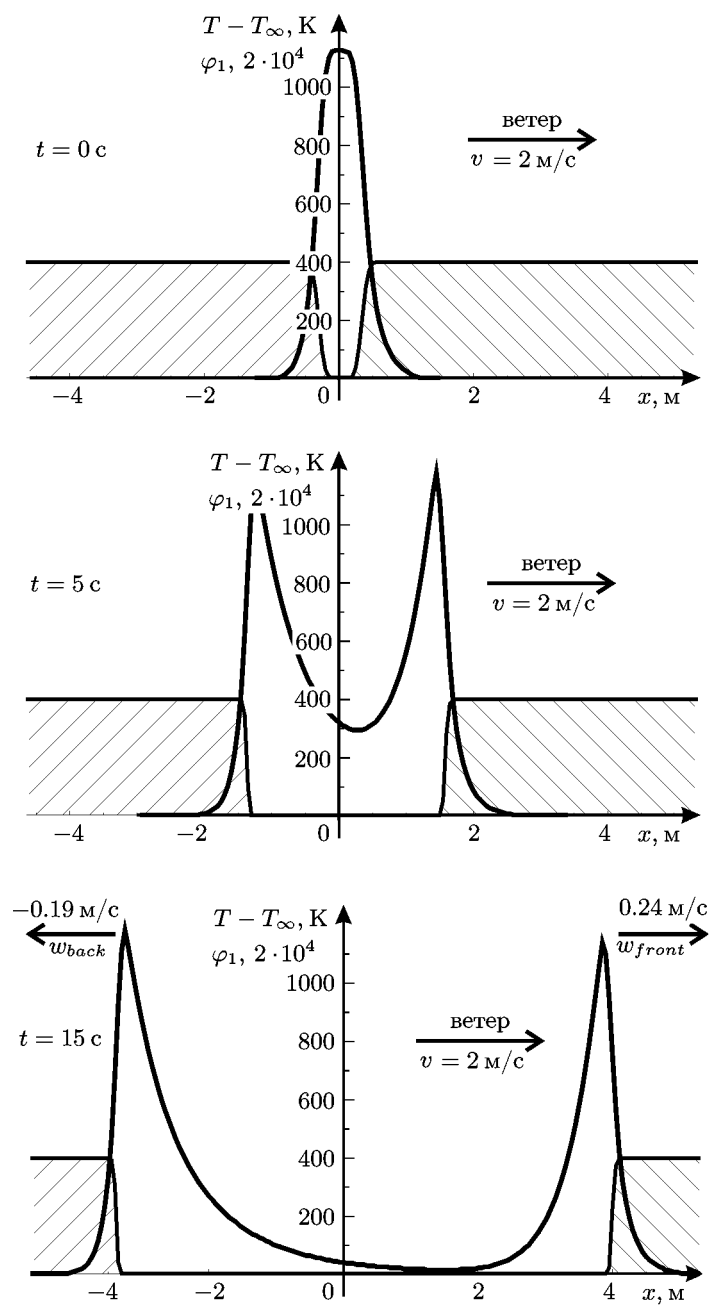


Рис. 4. Графики распределения температуры и объемной доли сухих ЛГМ

При величине скорости ветра $V = 2$ м/с рассчитанная скорость фронта пожара по направлению ветра равна $\omega_{front} = 0.24$ м/с, против ветра (задняя кромка): $\omega_{back} = -0.19$ м/с.

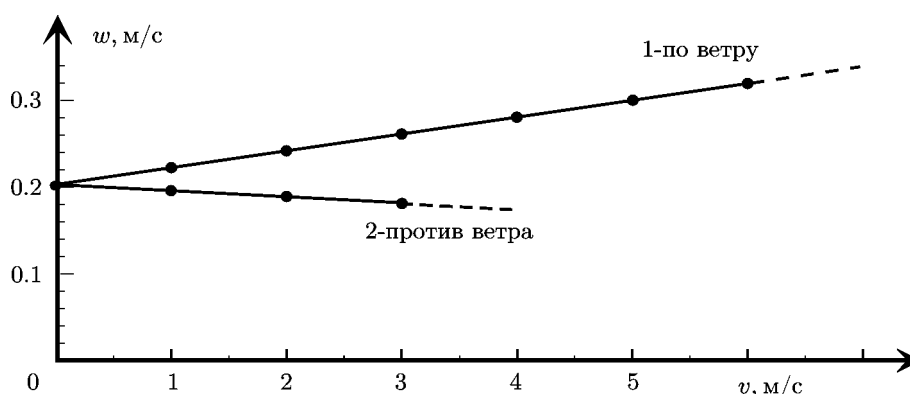


Рис. 5. Зависимости скоростей фронта и тыла кромки пожара от скорости ветра

На рис. 5 приведена полученная по результатам расчетов серии вариантов зависимость скорости распространения фронта и тыла кромки пожара от равновесной скорости ветра V при остальных фиксированных переменных для случая режима устойчивого распространения. Из графика видно, что зависимость скорости распространения фронта пожара от скорости ветра близка к линейной; количественно зависимости различны для передней и задней кромки. Расчеты и анализ результатов показывают, что в заданных условиях существуют предельные значения скорости ветра, при превышении которых происходит изменение режима пожара. Возможна ситуация, когда нет распространения пожара против сильного встречного ветра, он в основном развивается по ветру. Проведенные расчеты также показали, что для каждого класса пожарной опасности территории при конкретных климатических условиях можно определить скорость ветра, когда происходит “срыв” пламени, горение прекращается и в направлении по ветру.

Обобщая приведенные и другие уже полученные, но не обсуждаемые в настоящей работе результаты расчетов, следует отметить, что, используя разработанный программный комплекс, методику вычислительного эксперимента и интерпретации результатов, можно составить таблицы зависимостей скорости распространения фронта и тыла кромки пожара от равновесной скорости ветра V для типичных по каждому региону наборов значений основных характеристик территорий. К таковым относятся коэффициенты влагосодержания, плотности сухого органического вещества ЛГМ, связанной с ЛГМ воды в жидко-капельном состоянии, коксика, минеральной части ЛГМ. Реализация сказанного позволит на основе использования табулированных данных для каждого конкретного пожароопасного региона значительно расширить возможности методики Ротермела, повысив точность прогнозов распространения пожаров.

Литература

1. *Гришин А.М.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992.
2. *Pastor E. et al.* Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour // Progress in Energy and Combustion Science. 2003. V. 29. P. 139–153.
3. *McArthur A.G.* Weather and grassland fire behaviour. – Commonwealth of Australia: Forestry Research Institute, Leaflet № 100, 1966.
4. *Rothermel R.C.* A Mathematical model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. – USDA Forest Service. Res. Pap. INT-115, 1972.

5. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Состояние проблемы и результаты компьютерного прогнозирования распространения лесных пожаров // Вестник БГУ. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика. 2011. № 3. С. 78–84.
6. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. О развитии методики Ротермела и реализации двумерной компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров // Веснік Віцебскага дзярж. ун-та. 2011. № 6 (66). С. 5–11.
7. Andrews P.L. BehavePlus fire modeling system, version 5.0: Variables. – USDA Forest Service. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-213WWW Revised, 2009.
8. Finney M.A. FARSITE: Fire Area Simulator – model development and evaluation. – USDA Forest Service. Res. Pap. RMRS-RP-4, 2004.
9. Ottmar R.D. et al. An overview of the Fuel Characteristic Classification System – Qualifying, classifying, and creating fuelbeds for resource planning // Can. J. For. Res. 2007. № 37. P. 2383–2393.
10. US Forest Service. The Fuel Characteristic Classification System. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fs.fed.us/pnw/fera/fccs/index.shtml>
11. Scott J.H., Burgan R.E. Standard fire behaviour fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. – USDA Forest Service, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153, 2005.
12. Sandenberg D.V. et al. Reformulation of Rothermel's wildland fire behavior model for heterogeneous fuelbeds // Can. J. For. Res. 2007. № 37. P. 2438–2455.
13. Nelson R.M., Adkins C.W. Flame characteristics of wind-driven surface fires // Can. J. For. Res. 1986. № 16. P. 1293–1300.
14. McCaw W.L. Predicting fire spread in Western Australian mallee-heath shrubland (Ph. D. thesis). – University of New South Wales, Australia, 1997.
15. Catchpole W.R. et al. Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel // Combust. Sci. Technol. 1998. № 131. P. 1–37.
16. Pagni T.J., Peterson T.G. Flame spread through porous fuels // Proceedings of the 14th (International) Symposium on Combustion. – The Combustion Institute, Pittsburgh, Penn. 1973. P. 1099–1107.
17. Баровик Д.В., Корзюк В.И., Таранчук В.Б. Методические и алгоритмические основы программного комплекса “Расчет и визуализация динамики лесного пожара” // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2011. № 2 (30). С. 22–33.
18. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Адаптация модели Ротермела для реализации в программном комплексе прогноза распространения лесных пожаров // Научный интернет журн. Технологии техно-сферной безопасности. 2011. № 6 (40). <http://ipb.mos.ru/ttb/2011-6/2011-6.html>
19. Barovik D.V., Taranchuk V.B. Mathematical Modelling of Running Crown Forest Fires // Mathematical Modelling and Analysis. 2010. V. 15. № 2. P. 161–174.
20. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Об особенностях адаптации математических моделей вершинных верховых лесных пожаров // Вестник БГУ. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика. 2010. № 1. С. 138–143.
21. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Численная реализация математической модели верховых лесных пожаров // Весці БДПУ. Сер. 3. Физика. Математика. Информатика. 2010. № 2. С. 40–44.
22. Баровик Д.В. Базы данных результатов численного моделирования (на примере задачи распространения лесных пожаров) // Вестник БГУ. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика. 2010. № 2. С. 170–174.

D. V. Barovik, V. I. Korzyuk, V. B. Taranchuk
Methods of forest fires computer modelling

Summary

Adapted by authors mathematical model of ground forest fire propagation is considered. Questions of mathematical correctness of accepted boundary value problem are examined. The rationale of authors' generalization of classical semi-empirical Rothermel's model is also provided. Numerical experiment results analysis, in particular, dependence of fire rate of spread from some of the problem's parameters are discussed.

ТРУДЫ ИНСТИТУТА МАТЕМАТИКИ

Выходит два номера в год

Основан в 1998 году

МИНСК. 2013. ТОМ 21. № 1

СОДЕРЖАНИЕ

Баровик Д.В., Корзюк В.И., Таранчук В.Б. К обоснованию математических моделей низовых лесных пожаров	3
Буриченко В.П. Некоторые вопросы конечности для формаций	15
Васильев А.Ф., Халимончик И.Н. О решетках подгрупп субнормального типа в конечных группах	25
Вдовин Е.П., Ревин Д.О. Нерадикальность класса E_π -групп	35
Ведерников В.А. Силовские свойства конечных групп	40
Guo Wenbin, Skiba Alexander N. On the intersection of maximal supersoluble subgroups of a finite group	48
Дашкова О.Ю. Обобщенно разрешимые AFM-группы	52
Княгина В.Н. Конечные группы с \mathbb{P} -субнормальными бипримарными подгруппами	63
Kurdachenko L.A., Subbotin I.Ya., Turbay N.A. On influence of formation theory concepts and ideology on infinite group theory	69
Лепин В.В., Дугинов О.И. О числе бикликового покрытия декартова произведения графов	78
Миротин А.Р. Тауберова теорема Пэли–Винера–Гельфанда для полугрупп с инвариантной мерой	88
Семенчук В.Н., Велесницкий В.Ф. О конечных группах с обобщенно субнормальными критическими подгруппами	98
Фролова Д.С. О секвенциально собственных топологиях пространства отображений	102
Шамукова Н.В., Калоша Н.И. О метрических оценках аппроксимационных свойств значений унитарных многочленов	109

CONTENTS

Barovik D.V., Korzyuk V.I., Taranchuk V.B. Methods of forest fires computer modelling	3
Burichenko V.P. Some finiteness questions about formations	15
Vasil'ev A.F., Khalimonchik I.N. On subgroup lattices of subnormal type in finite groups	25
Revin D.O., Vdovin E.P. Non-radicality of the class E_π -groups	35
Vedernikov V.A. Sylow properties of finite groups	40
Guo Wenbin, Skiba Alexander N. On the intersection of maximal supersoluble subgroups of a finite group	48
Dashkova O.Yu. Generalized soluble AFM-groups	52
Kniahina V.N. Finite groups with \mathbb{P} -subnormal biprimary subgroups	63
Kurdachenko L.A., Subbotin I.Ya., Turbay N.A. On influence of formation theory concepts and ideology on infinite group theory	69
Lepin V.V., Duginov O.I. On biclique covering number of the Cartesian product of graphs	78
Mirotin A.R. The Paley–Wiener–Gelfand tauberian theorem for semigroups with invariant measure	88
Semenchuk V.N., Veliasnitski V.F. On finite groups with generalized subnormal critical subgroups	98
Frolova D.S. On the family of sequentially proper topologies on the space of maps	102
Shamukova N.V., Kalosha N.I. On metric estimates of approximation properties of monic polynomial values	109

ТРУДЫ ИНСТИТУТА МАТЕМАТИКИ
2013. ТОМ 21. № 1

Технический редактор Я.В. Рощина

Подписано в печать 22.12.2012. Формат $60 \times 84 \frac{1}{8}$. Усл. печ. л. 13,48. Уч.-изд. л. 12,14. Тираж 51 экз. Заказ 18.

Государственное научное учреждение “Институт математики Национальной академии наук Беларуси”.
220072, г. Минск, ул. Сурганова, 11. ЛИ № 02330/0549443 от 8 апреля 2009 г.
Отпечатано на ризографе в Институте математики НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. Сурганова, 11.

© Институт математики НАН Беларуси
Труды Института математики, 2013