

УДК 536.24:01

Определение термокинетических постоянных процесса сушки степных горючих материалов*

А.И. Фильков

Томский государственный университет

E-mail: filkov@mail.tsu.ru

На основе полученных экспериментальных данных с помощью разработанной методики решения обратных кинетических задач определены термокинетические постоянные процессов сушки различных образцов степных горючих материалов. Установлено, что анатомическое строение рассмотренных горючих материалов является доминирующим параметром, влияющим на процессы испарения. Предложен основной проводник горения для прогноза пожарной опасности на данной местности.

Ключевые слова: сушка, степные горючие материалы, термокинетические постоянные, обратные задачи.

Введение

Вопросы физико-математического моделирования степных (травяных и кустарниковых) пожаров исследованы не так широко, как лесных, из-за недостатка надежных данных о теплофизических и термокинетических коэффициентах степных горючих материалов. Однако опасность они представляют не меньшую, т. к. дикие степи, сельскохозяйственные поля, кустарниковые заросли нередко имеют еще большую воспламеняемость, и скорость распространения пожара по ним выше, чем при лесных пожарах.

Для описания процесса сушки с помощью известной общей математической модели степных пожаров [1] необходимо знать теплофизические характеристики (коэффициенты теплоемкости и теплопроводности), а также термокинетические постоянные (ТКП) процесса сушки степных горючих материалов (СГМ). В настоящее время достоверных данных об этих величинах недостаточно, и поэтому математическое моделирование возникновения и распространения степных пожаров [2–4] осуществляется на основе ориентировочных сведений.

В этих условиях существенно возрастает роль обратных задач [5] как методологической основы создания информационных баз данных для математических моделей степных пожаров. Круг обратных задач механики реагирующих сред достаточно широк и многообразен ввиду широты и многообразия математических постановок прямых задач механики реагирующих сред. Кроме того, каждая прямая

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.», Роснауки (г/к № 02.740.11.0674), РФФИ (гранты №№ 11-01-00673-а и 12-01-00142-а).

задача механики реагирующих сред в пределах принятой структуры математической модели может быть сопоставлена с некоторой обратной задачей. В известной классификации обратных задач механики реагирующих сред [5] важное место занимают обратные задачи химической кинетики. В отличие от прямых задач химической кинетики обратные задачи химической кинетики по определению ТКП гетерогенных и гомогенных химических реакций являются некорректно поставленными задачами [6], что требует для их решения применения специальных регуляризирующих методов. В частности, для прогноза степной пожарной опасности необходимо знание ТКП процесса сушки СГМ.

Математическая постановка и метод решения обратных задач химической кинетики

Считается [7], что вода может быть связана с материалом химически, физико-химически и физико-механически. При этом наибольшей энергией связи обладает химически связанная вода, которая при сушке не удаляется. В работе [1] утверждается, что стадией, лимитирующей испарение воды из горючего материала, является десорбция. Для ее математического описания используется аналог формулы, выражающей закон Герца–Кнудсена:

$$(\rho v)_w = \frac{AM(P_* - P)}{\sqrt{2\pi MRT}}, \quad P_* = P_0 \exp\left(-\frac{L}{RT}\right). \quad (1)$$

Здесь $(\rho v)_w$ — массовая скорость испарения с единицы поверхности, кг/(м²·с); P_* — давление насыщенного пара, Па; P — парциальное давление пара во внешней среде, Па; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); M — молекулярная масса воды, кг/моль; T — абсолютная температура, К; A и P_0 — постоянные множители, безразмерный (A) и Па (P_0); L — теплота испарения воды, Дж/моль.

Используя формально-кинетический подход, скорость испарения воды из некоторого фиксированного элемента СГМ с массой m можно описать следующей математической моделью:

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{k_1 P_* (m - m_\infty)(1 - \varphi)}{\sqrt{T}}, \quad (2)$$

$$m|_{t=t_{\text{in}}} = m_{\text{in}}, \quad (3)$$

где t — время, с; $\varphi = P/P_*$ — относительная влажность воздуха; k_1 — предэкспоненциальный множитель, К^{0,5}/(Па·с). Иногда математическую модель (2, 3) записывают через влагосодержание $W(t) = \Delta m / m_{\text{др}}$, $\Delta m = m - m_{\text{др}}$. Здесь индексы: in — начальный, др — сухой, ∞ — равновесное состояние.

Будем определять искомые термокинетические постоянные (энергию активации L и предэкспоненциальный множитель $B = k_1 P_0$) из условия среднеквадратичного согласования экспериментальных и расчетных, определенных по математической модели (2, 3), значений массы образцов для различных моментов времени. В результате использования аналитического решения модели (2, 3), предложенного в работе [7], энергия активации находится из решения трансцендентного уравнения (4), а предэкспоненциальный множитель — из алгебраического соотношения (5):

$$B = \sum_{i=1}^N \exp(-L / RT_{si}) \int_{t_{in}}^{t_{fin}} F_1^i F_2^i dt \left/ \left[\sum_{i=1}^N \exp(-2L / RT_{si}) \int_{t_{in}}^{t_{fin}} (F_2^i)^2 dt \right] \right., \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N T_{si}^{-1} \exp(-L / RT_{si}) \int_{t_{in}}^{t_{fin}} F_1^i F_2^i dt - B \sum_{i=1}^N T_{si}^{-1} \exp(-2L / RT_{si}) \int_{t_{in}}^{t_{fin}} (F_2^i)^2 dt = 0. \quad (5)$$

Интегралы в (4), (5) вычисляются по формуле Симпсона, а трансцендентное уравнение (5) решается методом деления отрезка пополам. Для интерполяции и аппроксимации расчетных и экспериментальных данных используются интерполирующие и аппроксимирующие кубические сплайны. При необходимости заданные с ошибкой экспериментальные зависимости сглаживаются с помощью эффективного метода регуляризации, описанного в [6]. Анализ предлагаемого метода показывает, что для получения единственного решения рассматриваемой обратной задачи химической кинетики необходимо использовать как минимум две температуры стабилизации T_s . Апробация метода на модельной и реальной задачах была проведена в работе [7], где показано, что данный метод является устойчивым, а погрешность определения термокинетических постоянных пропорциональна погрешности исходных экспериментальных данных.

Для определения экспериментальных зависимостей массы от времени образцы исследуемых материалов выдерживались при различных температурах стабилизации T_s до равновесного состояния, при котором их масса перестает изменяться $m = m_\infty$. При этом одна и та же температура стабилизации может достигаться при различных относительных влажностях окружающего воздуха φ .

Экспериментальные методики и результаты исследования процессов сушки СГМ

Для исследования процесса сушки были взяты СГМ, собранные в результате экспедиции с 5 по 7 мая 2010 г. в районе г. Карасук Новосибирской области. Растительность в этом районе является характерной для степей и южных лесостепей (рис. 1, *a*), она представляет собой злаково-полынную залежь, на которой четко выделяются 3 яруса (рис. 1, *b*): 1 — ярус злаков (прошлогодние побеги злаков и значительно реже — прошлогодние цветоносы полыней), 2 — ярус полыни (прошлогодние вегетативные части полыни австрийской), 3 — ярус типчака (куртины типчака, проростки злаков и др. трав).

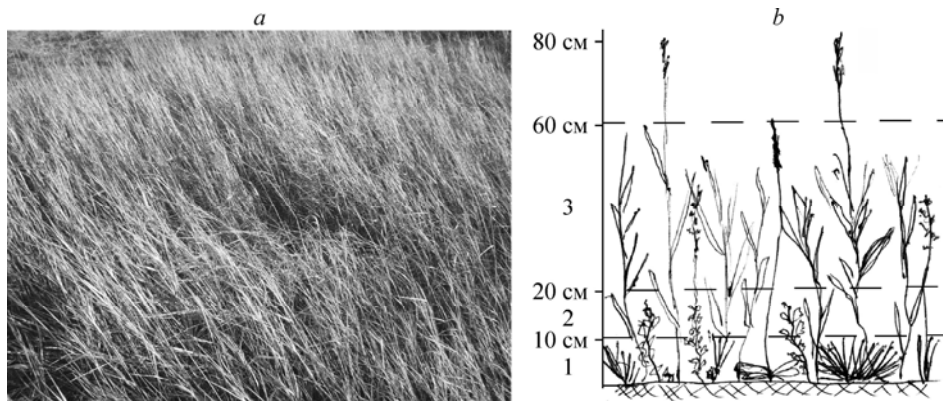


Рис. 1. Экспериментальная площадка.

a — общий вид, *b* — ярусы типичной растительности.

Таблица 1

**Проективное покрытие и процентное соотношение биомассы доминантов
и содоминантов к общему проективному покрытию**

Вид растения	Высота, см	Покрытие, %	биомасса, %
<i>Elytrigia repens</i> (Пырей ползучий)	60–80	40–50	75–95
<i>Artemisia austriaca</i> (Польнь австрийская)	40–65	30–50	4–25
<i>Festuca ovina</i> (Типчак или Овсяница овечья)	5–20	5–10	2–5
Остальные	до 20	1–5	1–2

Общее проективное покрытие¹ составило 15–20 %. Биомассу на площадке определяли следующим образом. Срезали всю растительность с трех участков 1×1 м, далее разбирали по видам и определяли процентное соотношение от общей биомассы. Виды произрастающих растений, их биомасса и покрытие приведены в табл. 1.

Влагосодержание доминирующих растений *W* составило: пырей ползучий (образец 1) — 11 %, польнь австрийская (образец 2) — 44 %, типчак (образец 3) — 26,8 %. Данные растения составляют основную часть биомассы, поэтому они были выбраны в качестве исследуемых образцов для определения термокинетических постоянных процесса сушки.

Экспериментальные исследования процесса сушки СГМ проводились в изотермических условиях при температурах 50, 80 и 100 °С с помощью анализатора влажности МХ-50 фирмы А&D. Сушка образцов осуществлялась в результате их нагрева галогеновой лампой в анализаторе влажности, где температура достигала 100 °С в течение 20 с. Регистрируемая температура соответствовала температуре поверхности образца. Дрейф температуры образца в процессе испарения влаги анализатор выравнивал автоматически до уровня заданной. Сушка образцов продолжалась до полного испарения влаги. Анализатор влажности имел встроенные весы, что давало возможность автоматически с заданной точностью достигать абсолютно сухого состояния образцов.

Начальная масса образцов составляла 1 г. Перед загрузкой их в анализатор влажности образцы предварительно нарезались на части размером 3–4 см. Для каждой температуры осуществлялось от 3 до 5 опытов, а затем полученные значения масс усреднялись. Далее рассчитывались доверительные интервалы δ с уровнем значимости 0,05. Погрешность измерения массы образцов составила $\pm 0,01$ г, а влагосодержания $\pm 0,01$ %.

Результаты определения ТКП процессов сушки СГМ

В результате исследования процесса сушки при температурах 50, 80 и 100 °С для каждого образца растительности были получены экспериментальные зависимости относительной массы образцов от времени (рис. 2).

Из анализа рис. 2 видно, что с увеличением температуры стабилизации скорость сушки растет, а убыль массы образцов значительно варьируется и составляет от 10 % (пырей ползучий) до 50 % (польнь австрийская), что согласуется с данными работы [9].

На рис. 3 показано влияние вида СГМ на процесс сушки при различных температурах стабилизации. Видно, что для всех трех видов СГМ кривые сушки при температурах стабилизации 50, 80 и 100 °С отличаются очень значительно. Можно

¹ Проективное покрытие — показатель, определяющий относительную площадь проекции отдельных видов или их групп, ярусов и т. д. фитоценоза на поверхность почвы. Различают общее проективное покрытие (покрытие всего яруса) и частное проективное покрытие (покрытие отдельных видов) [8].

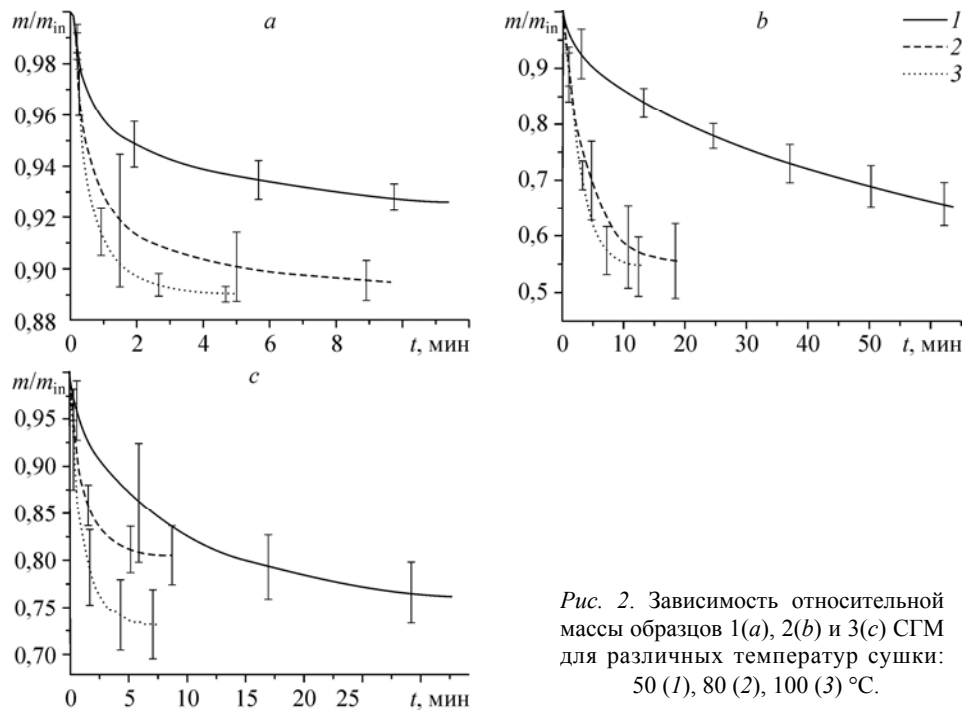


Рис. 2. Зависимость относительной массы образцов 1(a), 2(b) и 3(c) СГМ для различных температур сушки: 50 (1), 80 (2), 100 (3) °С.

сделать вывод, что процесс сушки носит сложный характер и существенно зависит от характеристик СГМ (влажностное содержание, строение и т. д.).

В результате обработки экспериментальных данных по методике [7] были получены значения ТКП процесса сушки, представленные в табл. 2. Видно, что ТКП процесса сушки второго и третьего образца СГМ имеют близкие значения и существенно отличаются от первого образца. Это можно объяснить различием

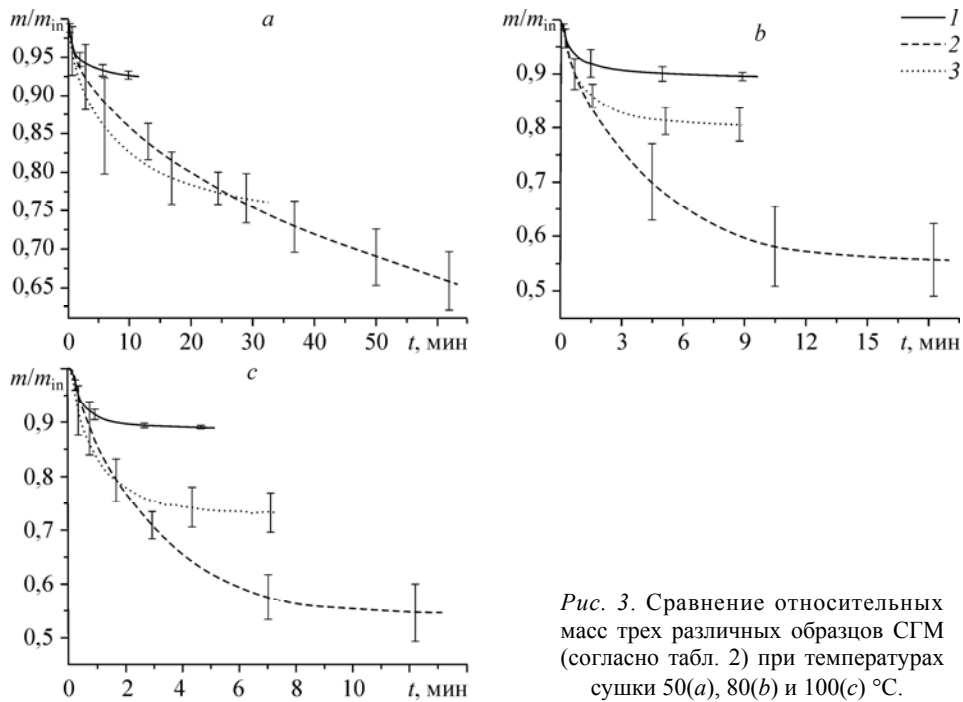


Рис. 3. Сравнение относительных масс трех различных образцов СГМ (согласно табл. 2) при температурах сушки 50(a), 80(b) и 100(c) °С.

Таблица 2
Термокинетические постоянные процесса сушки
трех образцов СГМ

№ образца	L , Дж/моль	B , $K^{0.5} \cdot c^{-1}$
1	4971	$0,305 \cdot 10$
2	16558	$0,770 \cdot 10^2$
3	16870	$0,190 \cdot 10^3$

в анатомическом строении образцов. Так, образец 1 (*Elytrigia repens*) относится к экогруппе мезофитов², а образцы 2 и 3 (*Artemisia austriaca* и *Festuca ovina*) к экогруппе ксерофитов³. Согласно работе [10], образец 1 имеет относительно большой объем (размеры) и значительную листовую поверхность. Величина устьечных клеток у данного вида примерно в два раза больше, чем у ксерофитов типа *Artemisia austriaca* и *Festuca ovina*, что повышает интенсивность испарения. Образец 2, наоборот, обильно снабжен эфирномасличными железками, которые испаряясь в воздухе, повышают его давление у поверхности листа, что вызывает снижение интенсивности испарения [10]. Кроме того, данный вид имеет обильное развитие эпидермальных волосков, которые, сплетаясь друг с другом, образуют подобие войлока, покрывающего листья, стебли. Такое густое войлочное опушение играет огромную роль в водном обмене растения. Прежде всего, опушение имеет серебристо-белый цвет, хорошо отражает солнечные лучи и тем самым предотвращает растение от перегрева. Кроме того, в нем накапливаются испаряющиеся водяные пары, создающие у поверхности листа повышенную влажность воздуха, что также ведет к снижению интенсивности испарения. Таким образом, густое опушение также защищает растение от чрезмерной потери влаги. Образец 3 также имеет ряд защитных механизмов [10], например, узкие бороздчатые листья в виде щетинки (трубочки). Благодаря этому: а) такие листья образуют небольшую испаряющую поверхность, б) устьица располагаются в бороздках или во внутренней части трубки свернутой листовой пластинки, где создается повышенная влажность воздуха, снижающая интенсивность испарения. Все это способствует затрудненному испарению воды. Кроме того, ксерофиты имеют высокое осмотическое давление клеточного сока (80–100 атм.), что обеспечивает значительную сосущую силу. Характерна также засухоустойчивость протоплазмы, которая обладает большой вязкостью и эластичностью, что значительно затрудняет высыхание и делает растение жизнеспособным даже при потере воды до 98 %. Все эти приспособления ксерофитов (образцы 2 и 3) препятствуют испарению влаги и повышают теплоту испарения воды более чем в 3 раза, в отличие от мезофита (образец 1).

Искомые в работе термокинетические постоянные отличаются от опубликованных в литературе. Так, в работе [1] энергия активации составила 44465 Дж/моль·К для вейника, в [11] — 19860 Дж/моль·К для ромашки крупной, в [12] — 26760 Дж/моль·К для люцерны, в [13] — 34727 Дж/моль·К для маниоки. Однако в этих работах приводятся энергии активации для других классов растений. Отличие в данных также объясняется расхождением условий проведения экспериментов и используемых математических моделей. Например, в работах [11–13] сушка проводилась при более низких температурах (30–60 °С), что привело к повышению

² Мезофиты — наземные растения, которые приспособлены к обитанию в среде с более или менее достаточным, но не избыточным увлажнением почвы [10].

³ Ксерофитами называют растения засушливых местообитаний. В процессе длительной эволюции у них выработались разнообразные приспособления, позволяющие ксерофитам жить в условиях малого содержания воды в почве, которое обычно сочетается с высокими температурами и низкой влажностью воздуха [10].

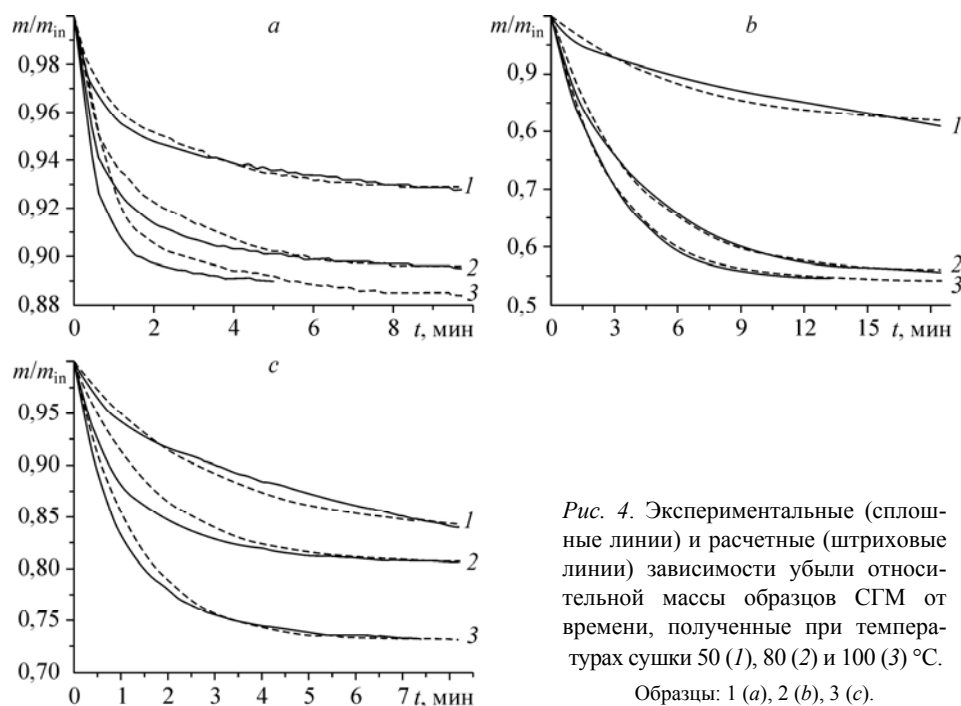


Рис. 4. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) зависимости убыли относительной массы образцов СГМ от времени, полученные при температурах сушки 50 (1), 80 (2) и 100 (3) °С. Образцы: 1 (а), 2 (b), 3 (с).

энергии активации, а в работе [1] используемая математическая модель сушки не учитывала влияние степенной зависимости от температуры. Известно, что вид математической модели при использовании формальной кинетики может влиять на величину получаемой энергии активации и приводить к различию данных на порядок и более [14].

Для оценки точности полученных значений термокинетических постоянных были решены прямые задачи химической кинетики с использованием математической модели (2), (3) на основе полученных L и B . Расчетные зависимости относительной массы образцов от времени сравнивались с экспериментальными (рис. 4).

Из анализа рис. 4 следует удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных зависимостей, что говорит о достоверности полученных термокинетических постоянных.

Выводы

На основе полученных экспериментальных данных с помощью разработанной методики решения обратных задач химической кинетики [7] определены термокинетические постоянные процессов сушки различных образцов СГМ.

Анализируя изменение относительных масс образцов 1–3 и их ТКП, можно предположить, что анатомическое строение рассмотренных СГМ является доминирующим параметром, влияющим на процессы испарения.

Для исследуемого типа местности образец 1 имеет доминирующую биомассу и минимальное влагосодержание, что позволяет его считать основным проводником горения. Таким образом, математическое моделирование процессов сушки СГМ с целью прогноза пожарной опасности на данной местности по методике [15] целесообразно осуществлять для основного проводника горения и использовать ТКП образца 1.

Автор выражает благодарность д. ф.-м. н., профессору [Кузину А.Я.](#) за оказание помощи и консультации при решении обратных задач сушки СГМ, а также

старшему лаборанту Сибирского ботанического сада Томского государственного университета Бабичевой Н.В. за помощь при анализе анатомического строения и физиологических особенностей СГМ.

Список литературы

1. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
2. Бурасов, Д.М., Гришин А.М. Математическое моделирование низовых лесных и степных пожаров. Кемерово: Изд-во Практика, 2006. 133 с.
3. Morvan D. Physical modelling of fire spread in grasslands / D. Morvan, S. Meradji, G. Accary // Fire Safety J. 2009. № 44. P. 50–61.
4. Cheney N.P. Prediction of fire spread in grasslands / N.P. Cheney, J.S. Gould, W.R. Catchpole // Int. J. Wildland Fire. 1998. № 8. P. 1–13.
5. Гришин А.М., Зинченко В.И., Кузин А.Я, Сеницын С.П., Трушников В.Н. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2006. 418 с.
6. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 224 с.
7. Гришин А.М., Кузин А.Я, Алексеенко Е.Н. Определение кинетических характеристик процесса сушки лесных горючих материалов // ИФЖ, 2003. Т. 76, № 5. С. 170–174.
8. Воронов А.Г. Геоботаника. М.: Высшая школа, 1973. 384 р.
9. Гришин А.М., Голованов А.Н., Русаков С.В. Об испарении свободной и связанной с лесным горючим материалом воды в изотермических условиях // ИФЖ. 2003. Т. 76, № 5. С. 175–180.
10. Прокопьев Е.П. Экология растений. Томск: Томский гос. ун-т, 2001. С. 90–142.
11. Nakibu T., Carrier D.J., Sokhansanj S., Crowe T. Drying of feverfew (*Tanacetum Parthenium* L.) // Canadian Agricultural Biosystems Engng. 2005. Vol. 47. P. 3.57–3.61.
12. Sokhansanj S., Patil R.T. Kinetics of dehydration of green alfalfa // Drying Technology. 1996. Vol. 14, No. 5. P. 1197–1234.
13. Saucedo-Castaneda G., Rimbault V., Vinigra-Gonzalez G. Energy of activation in cassava silages // J. of the Sci. of Food and Agriculture. 1990. Vol. 53, No. 4. P. 559–562.
14. Zhou D., Grant D.J.W. Model dependence of the activation energy from nonisothermal kinetic data // J. Phys. Chem. A. 2004. Vol. 108, No. 19. P. 4239–4246.
15. Гришин А.М., Фильков А.И. Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров. Кемерово: Изд-во Практика, 2005. 197 с.

*Статья поступила в редакцию 3 мая 2011 г.,
после доработки — 21 июля 2011 г.*