

В.А. Васильев, Т.С. Дергачева

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ НИЗОВЫХ ПОЖАРОВ НА ПОЛИГОНЕ ТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

V.A. Vasilyev, T.S. Dergacheva

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF OCCURRENCE AND EXPANSION OF CREEPING FIRES ON THE TOXIC WASTE LANDFILL IN THE LENINGRADSKAYA OBLAST

В работе рассматриваются условия возникновения и развития низовых пожаров в Ленинградской области. Показана возможность использования метеорологической информации в качестве одного из предикторов угрозы возникновения пожаров. На основе простой модели выполнена оценка выбросов загрязнителей и тепловой энергии.

Ключевые слова: низовой пожар, метеорологические условия возникновения и развития, модель эмиссии загрязнителей и тепловой энергии, численный эксперимент.

The conditions of occurrence and expansion of creeping fires in the Leningradskaya oblast are considered. The possibility of usage of meteorological information as one of predictors of the fires beginning threat are shown. The emissions of pollutants and heat energy are assessed on the basis of simple model.

Key words: creeping fire, meteorological conditions of occurrence and expansion, model of pollutants and heat energy emissions, numerical experiment.

Введение

Низовые пожары растительности оказывают значительное негативное влияние на геоэкологическое состояние природной среды и в значительной степени способствуют развитию других видов пожаров. Низовые лесные пожары составляют абсолютное большинство от числа всех пожаров в лесу, более 80 % всех пожаров — низовые. Практически все верховые пожары развиваются из них [6]. При этом в атмосферу поступает значительное количество газообразных и аэрозольных продуктов пиролиза сгорания, в том числе токсичных. В связи с этим разработка информационно-аналитических систем и моделей, позволяющих прогнозировать пожарную опасность и динамику развития низовых пожаров, направленных на снижение экологического и экономического ущерба, является весьма актуальной задачей современной прикладной экологии [3].

Целью представляемой работы является использование и верификация модели прогноза распространения низовых пожаров для полигона токсичных отходов в Ленинградской области.

Полигон «Красный Бор», предназначенный для обезвреживания и захоронения промышленных токсичных отходов, расположен в 2 км от поселка «Красный Бор» Ленинградской области, в 5 км от Муниципального Образования «Колпино» (Колпинский район Санкт-Петербурга) и в 30 км от Санкт-Петербурга. Площадь полигона составляет 73 га. За время работы полигоном принято более 1,5 млн т промышленных токсичных отходов. На полигоне «Красный Бор» неоднократно возникали пожароопасные ситуации и пожары (пожар 28 мая 2006 г., 24 июня 2008 г.) [7].

Модель возникновения и развития низового пожара

В данной работе для моделирования пожароопасной ситуации и прогноза пожаров был использован метод и технология, разработанной в СО РАН [2]. Суть метода заключается в максимальном использовании имеющейся лесостроительной информации о распределении по территории полигона растительных горючих материалов (РГМ) и текущей метеорологической информации. В соответствии с используемой методикой вокруг потенциального очага пожара (по уровню засушливости) были выделены несколько участков с близкими эколого-ландшафтными условиями и проведена оценка их готовности к горению. При моделировании поведения пожара используются данные о РГМ, метеорологическая информация, комплект специальных справочных таблиц [5].

Количественным отражением угрозы возникновения лесного пожара является комплексный лесопожарный показатель засухи (ЛПЗ). Он определяется по формуле [9]:

$$\text{ЛПЗ} = \sum_{K=1}^N \text{ПН}_{K-1} K_{\text{OC}} + [(T - T_D) T]_K, \quad (1)$$

где ПН — показатель В.Г. Нестерова; T — температура воздуха; T_D — точка росы; K — день, для которого рассчитывается показатель; $K - 1$ — предыдущий день; N — число дней, прошедших после дождя, включая последний день выпадения осадков; K_{OC} — коэффициент поправок на осадки (учитывается сумма осадков за предыдущие 24 ч).

$$K_{\text{OC}} = 1,8 / (R - 1), \quad (2)$$

где R — сумма осадков.

Соответствие между прогнозируемым количеством осадков и значением коэффициента K_{OC} приведено в табл. 1 [2].

По величине лесопожарного показателя засухи, определялся класс засухи (КЗ). Соответствие классов засухи (КЗ) и ЛПЗ приведено в табл. 2.

Затем сравнивалось КЗ сегодняшнего дня с критическими классами, указанными в [5]. Если КЗ менее критического значения, то состояние негоримое, если больше — горимое, при равенстве состояние оценивается как переходное.

Таблица 1

Соответствие между среднесуточным количеством осадков и величиной коэффициента ($K_{ос}$)

Категория дождей	Показатели	Осадки, мм	$K_{ос}$
I	Слабые дожди	до 2	0,8
II	Умеренные дожди	2–5	0,4
III	Ливневые дожди	5–12	0,2
IV	Сильные дожди	Более 12	0,1

Таблица 2

Характеристика классов засухи (КЗ)

Класс засухи (КЗ)	ЛПЗ	Характеристика опасности
I	< 300	Пожарная опасность отсутствует
II	301–1000	Малая пожарная опасность
III	1001–4000	Средняя пожарная опасность
IV	4001–10000	Высокая пожароопасность
V	10001–30000	Чрезвычайная пожароопасность

Моделирование пожара осуществляется по выбранным временным интервалам. Расчет вероятной скорости распространения низового пожара и его силы (интенсивности кромки) проводился в пределах каждого временного шага моделирования: сначала в направлении продвижения фронта пожара, затем по флангам и в тылу. Для расчета количественных показателей распространения пожара использовались формулы, включающие переменные коэффициенты относительного влияния различных факторов [1]. В табл. 3 приведены основные расчетные формулы.

Таблица 3

Основные расчетные формулы

Количественный показатель	Расчетная формула
Скорость распространения кромки, м/мин	$V_x = V_0 K_f K_r K_w$
Базовая скорость, м/мин	V_0
Коэффициент влияния уклона поверхности	K_f
Коэффициент для относительной влажности	K_r
Коэффициент влияния ветра	K_w
Скорость ветра на площадке м/мин	$W = W_M K_c$
Скорость ветра на метеостанции, м/мин	W_M
Коэффициент полноты древостоя	K_c
Расстояние, проходимое кромкой пожара	$L_{\Pi} = (V_x)_{\Pi} (t_p - t_{p-1})$
Время распространения кромки выделе, мин.	$(t_p - t_{p-1})$
Интенсивность кромки пожара, кВт/м	$I_{kp} = 0,017 Q_{сл} V_x$
Поверхностная теплота сгорания слоя, МДж/м ²	$Q_{сл}$

Моделирование эмиссии поллютантов и тепловой энергии

Наиболее значимым фактором, влияющим на состояние атмосферного воздуха при развитии пожаров, является состояние почвенного покрова. Особенно, если почва загрязнена нефтепродуктами. Если почва покрыта растительностью (трава, лишайник или отмершими частями растений опад хвойных и лиственных деревьев, подстилка торф), то наряду с нефтепродуктами сгорают и растительные материалы. Для сухой почвы, покрытой напочвенным покровом (трава, опад хвои, опад листьев и др.) считается, что имеет место полное сгорание растительности. Тогда коэффициент недожога $K_H^P = 0$, а коэффициент полноты сгорания $K_H^P = 1$. Лесные горючие материалы можно рассматривать как своеобразное углеводородное топливо с известными коэффициентами эмиссии, элементарным составом, химической формулой и тепловым эффектом. Слой растительности характеризуется типом и запасом растительных горючих материалов (РГМ) в (кг/м²) а также влагосодержанием W в %. В обычных условиях при влагосодержании $W > W^*$, где W^* — предельное значение влагосодержания, выше которого РГМ не горят. Однако РГМ, смоченные нефтью, бензином или керосином, сгорает даже при $W > W^*$. В дальнейшем принимается, что коэффициент полноты сгорания нефтепродуктов $K_H^G = 0,6$.

Если почва покрыта растительностью (трава, лишайник, мох, кустарник) или отмершими частями растений (опад хвойных и лиственных деревьев), то выбросы поллютантов будут обусловлены не только горением нефтепродуктов, но и сгоранием растительного напочвенного покрова. Поэтому для определения выбросов поллютантов и тепла имеют место формулы:

$$M(\alpha) = M^G(\alpha) + M^P(\alpha), \quad (3)$$

$$Q(\alpha) = Q^G(\alpha) + Q^P(\alpha), \quad (4)$$

где $M^P(\alpha)$, $Q^P(\alpha)$ — выбросы альфа-поллютанта и тепловой энергии, обусловленные горением растительных горючих материалов; $M^G(\alpha)$, $Q^G(\alpha)$ — выбросы обусловленные горением нефтепродуктов.

Следует считать, что динамика сложного пожара определяется линейной скоростью, присущей распространению пламени по почве, смоченной нефтепродуктом и линейной скоростью выгорания нефтепродукта. В этом случае законы сохранения массы нефтепродукта и растительного горючего материала (РГМ) принимают вид:

$$\frac{dM^G}{dt} = -K_H^G \rho^G \pi S \Omega(z), \quad M^G(0) = N^G, \quad (5)$$

$$\frac{dM^P}{dt} = -K_H^P \rho^P \pi S \Omega(z), \quad M^P(0) = N^P, \quad (6)$$

здесь M^G — текущая масса нефтепродуктов на подстилающей поверхности; M^P — текущая масса растительности; ρ — плотность нефтепродукта и растительного покрова;

ρ^G и ρ^P — коэффициенты полноты сгорания; $\Omega(z)$ — линейная скорость выгорания нефтепродукта; S — площадь, ограниченная контуром горения.

Интегрируя (5, 6), получим выражение для масс поллютантов, выброшенных в атмосферу на начальной стадии распространения пожара, которая принимается равной 3 мин:

$$M^G(\alpha) = 0,6K^G(\alpha)\frac{\pi\rho^G}{6}\Omega(z)(V_x + V_x^*)V^T t^3, \quad (7)$$

$$M^P(\alpha) = K^P(\alpha)\frac{\pi\rho^P}{6}\Omega(z)(V_x + V_x^*)V^T t^3, \quad (8)$$

где V_x — скорость распространения фронта пожара; V_x^* — скорость распространения пожара в направлении противоположном направлению ветра; V^T — скорость распространения пожара в направлении перпендикулярном направлению ветра; $K^G(\alpha)$, $K^P(\alpha)$ — удельные выбросы α -поллютантов при сгорании нефтепродуктов и растительности, кг/кг. Коэффициент 0,6 характеризует полноту сгорания нефтепродуктов. Предполагается, что растительность сгорает полностью, $K_{II}^P = 1$.

Следует отметить, что кубический закон горения реализуется только для первых моментов времени, когда имеет место распространение пламени по поверхности загрязненной нефтепродуктами. При дальнейшем распространении пожара количество поллютантов и тепла, поступающих в атмосферу, определяется не столько линейной зависимостью от времени, сколько выгоревшей площадью.

Для расчета количества вредных выбросов, образующихся при сгорании нефти и продуктов ее переработки на инертном грунте, т.е. на таком грунте, который уже ранее был пропитан нефтепродуктами, используются следующие формулы:

$$M^G(\alpha) = 0,6K_N K^G(\alpha)\rho^G h S, \quad (9)$$

$$M^P(\alpha) = K^P(\alpha)\rho^P \Omega(z) S \Delta t, \quad (10)$$

где K_N — нефтеемкость грунтов, $\text{м}^3/\text{м}^3$; h — толщина, пропитанного нефтепродуктом слоя почвы, м; S — площадь пятна нефтепродуктов на почве; Δt — интервал времени, для которого рассчитывается выброс, равный 20 мин.

Общее количество тепла (кДж), выбрасываемого в атмосферу при $t > 0$ равно:

$$Q = \frac{\pi}{6} \left[(q^G \rho^G + q^P \rho^P) \Omega(z) (V_x + V_x^*) V^T \right] t^3, \quad (11)$$

где q^G и q^P — тепловые эффект горения нефтепродукта и растительности, кДж/кг. Эти величины определяются с помощью формулы [8]:

$$q = 4,19 \left[81C^* - 246H^* - 26(O^* - S^*) - 6W^* \right]. \quad (12)$$

Величины C^* , H^* , O^* , S^* , W^* характеризуют элементарное содержание в % углерода, водорода, кислорода, серы и влаги к рабочей массе горючего. Теплота сгорания является наиболее важной характеристикой топлива, так как определяет количество тепла, получаемого при сжигании 1 кг твердого и жидкого топлива или 1 м³ газообразного топлива в кДж/кг. В России тепловые расчёты (например, расчёт тепловой нагрузки для определения взрывопожарной и пожарной опасности) обычно ведут по нижней теплоте сгорания. Низшая теплота сгорания определяется экспериментально для каждого вещества и является справочной величиной [11].

Численный эксперимент

В качестве примера рассмотрим развитие пожара на полигоне промышленных токсичных отходов. Будем для определенности считать, что исследуемая площадь содержит грунт, состоящий в основном из супеси и суглинка, пропитанный дизельным топливом, который занимает 40 % исследуемой площади и имеет пятнистую структуру, остальные 60 % заняты травянисто-ветошным грунтом. Глубина выгорания грунта h составляет 5 см. Пожар начинается с небольшого количества разлившегося по поверхности дизельного топлива. Начальный период пожара продолжается 3 мин. За это время огнем будет охвачена площадь S около 7 м². Контур пожара напоминает форму двух соединенных основанием трапеций.

В соответствии с рассмотренной методикой была проведена серия численных экспериментов оценки пожароопасности для полигона «Красный Бор». Сильный пожар наблюдался 23 июня 2011 г. Метеорологические данные предшествующие этому дню представлены в табл. 4.

Таблица 4

Данные для расчета класса пожарной опасности (класса засухи), метеостанция Пушкин, 15 часов, 2011 г.

Дата	Осадки	T , °C	Влажность, %	Ветер, м/с	ЛПЗ	Класс засухи
14.06	нет	28	28	4,3	492	II
15.06	нет	28	26	4,6	984	II
16.06	нет	28	29	5,2	1476	III
17.06	нет	28	28	6,5	1968	III
18.06	нет	29	29	4,5	2502	III
19.06	нет	29	29	4,8	3036	III
20.06	нет	32	32	5,5	3604	III
21.06	нет	27	27	4,2	4202	IV
22.06	нет	33	33	4,4	4810	IV
23.06	нет	30	30	4,1	5378	IV

При анализе метеорологических данных с целью определения пожароопасности обычно используют данные за 10 дней после последнего дождя. Это связано с тем, что в России за эталон растительного горючего материала принят слой зеленых мхов на дренированной основе. Полное высыхание мхов происходит за 10-дневную засуху [2].

В результате выполненных расчетов и анализа результатов моделирования было установлено, что наиболее пожароопасным является период июнь–июль, так как в это время наблюдаются наиболее высокие температуры воздуха, уменьшается влажность и резко снижается вероятность выпадения осадков. Прогнозирование развития пожара осуществлялось по выбранным временным интервалам. Контур пожара рассчитывался на конец каждого временного интервала. В данной работе величина этого интервала принималась равной 20 мин.

Расчет вероятной скорости распространения низового пожара и его силы (интенсивности кромки) проводится в пределах каждого временного этапа прогнозирования: сначала в направлении продвижения фронта пожара, затем по флангам и в тылу [5]. Используя метеорологические данные о ветровом режиме, была рассчитана скорость распространения кромки пожара для фронта (0,6 м/с), флангов и тыла (0,4 м/с). Таким образом, расстояние, которое пройдет кромка пожара по каждому выделу до конца намеченного этапа прогнозирования для пожара в целом 48 м — фронт, 32 м — каждый фланг и тыл. Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Рассчитав расстояние, которое пройдет кромка пожара, была получена площадь всего пожара, которая по расчетам составила 5120 м². Полученное значение очень близко к фактически определенной площади пожара, равной 5000 м².

Таблица 5

Результаты расчетов

Время	Показатель	Фронт кромки	Левый фланг	Правый фланг	Тыл	$S, \text{ м}^2$	$I_{\text{кр}}, \text{ кВт/м.}$
	$V_x, \text{ м/мин.}$	0,6	0,4	0,4	0,4	—	—
Через 20 мин	$L_{\text{п}}, \text{ м.}$	12,1	8,2	8,2	8,2	1245	35
Через 1 ч 20 мин	$L_{\text{п}}, \text{ м.}$	48	32	32	32	5120	80

Оценка силы пожара также представляется достаточно удовлетворительной. Для ее определения была рассчитана интенсивность кромки пожара. В данном случае она составила 80 кВт/м. Следовательно, согласно существующей классификации пожар относится к пожарам средней силы. Высота пламени при этом достигала 1,1 м. В то же время следует признать, что в действительности сила пожара была несколько больше. Это связано с тем, что в данной модели присутствует целый ряд неопределенностей. В частности нуждается в уточнении лесоустроительная информация, требуются более тщательные метеорологические наблюдения непосредственно в районе полигона. Особое внимание следует обратить на состояние почвогрунтов и содержащихся в них нефтепродуктов.

Данные, необходимые для расчета эмиссии поллютантов и тепловой энергии при низовом пожаре, приведены в табл. 6 [10].

Исходные данные для расчета выбросов поллютантов и тепловой энергии

Коэффициенты для эмиссии поллютантов				
Поллютант	K(α) для нефтепродуктов, кг/кг			K(α) для РГМ, кг/кг
	нефть	дизтопливо	бензин	
Диоксид углерода	1,0	1,0	1,0	$1,4 \cdot 10^{-1}$
Формальдегид	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Ультрадисперсные частицы (дым)	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$
Нефтеемкость грунтов, м ³ /м ³				
Наименование	Влажность в % веса			
	20	40	60	80
Супесь, суглинок	0,35	0,28	0,21	0,14
Торфяной грунт	0,50	0,40	0,30	0,20
Скорость выгорания нефтепродуктов				
Наименование	кг/м ² ·сек	кг/м ² ·час	мм/мин	мм/час
Дизтопливо	0,055	198,0	4,18	250,8
Бензин	0,053	190,8	4,54	272,4
Низшая теплота сгорания для некоторых веществ				
вещества	бензин	древесина	дизтопливо	резина
q, МДж/кг	41,87	13,8	48,87	33,52

Из таблицы, в частности, видно, что нефтепродукты являются одним из основных источников поступления диоксида углерода в атмосферу при пожаре. Более детальный анализ позволяет сделать вывод, что максимальная эмиссия поллютантов наблюдается при горении нефти. При этом больше всего в атмосферу выбрасывается оксида углерода, диоксида углерода, оксидов азота, сажа (в пересчете на углерод) и синильная кислота. Вместе с тем видно, что значительное влияние на поступление поллютантов в атмосферу оказывают растительные горючие материалы. При этом определенное влияние на выбросы поллютантов оказывает нефтеемкость грунтов.

Значительное влияние оказывают пожары на термодинамическое состояние приземного и пограничного слоя атмосферы [4]. Сгорание мелкой напочвенной растительности (мелкие кустарники, кустики черники, брусники и т.д.) в пламени основного проводника увеличивает $Q_{ст}$ на $0,5-1,0$ МДж/м². В пределах пламенной кромки успевает сгореть до $0,5$ кг/м² сучьев и мелкого валежника, что добавляет еще $3-3,5$ МДж/м². При этом в атмосфере образуются конвективные колонки, которые при сильных пожарах достигают высоты $200-300$ м. В то же время из табл. 7 следует, что основную роль в тепловом загрязнении атмосферы при пожарах играют содержащиеся в грунтах остатки нефтепродуктов.

Таблица 7

Пример расчета выбросов поллютантов при сжигании дизельного топлива, кг

Время горения	Выбросы от сгорания нефтепродуктов и растительности			
	$M^G(\text{CO}_2)$	$M^G(\text{НСНО})$	$M^P(\text{CO}_2)$	$M^P(\text{НСНО})$
3 мин	32	0,04	8	$3,1 \cdot 10^{-4}$
17 мин	2228	2,7	370+554	$(26,4+39,6) \cdot 10^{-4}$
40 мин	2259	2,7	437+656	$(31,2+46,8) \cdot 10^{-4}$
60 мин	2259	2,7	437+656	$(31,2+46,8) \cdot 10^{-4}$
80 мин	2259	2,7	437+656	$(31,2+46,8) \cdot 10^{-4}$
Всего	9037	13,54	4211	$303,1 \cdot 10^{-4}$

Сумма в столбцах для растительности означает, что растительность горит на площади, пропитанной нефтепродуктами (40 %) и на площади, свободной от нефтепродуктов (60 %). Именно этим обусловлены различия в числовых значениях. Таким образом, эти цифры показывают относительный вклад площадей пропитанных нефтепродуктами в эмиссию поллютантов.

В табл. 8 приведены данные расчета выбросов тепловой энергии при низовых пожарах. Из таблицы видно, что выбросы тепла при сжигании растительности в некоторых случаях сопоставимы с выбросами от сжигания нефтепродуктов. Следует также отметить, что присутствие в почве нефтепродуктов существенно увеличивает интенсивность и силу пожара. В рассматриваемом примере интенсивность кромки пожара ($I_{кр}$), будет равна 120 кВт/м, а высота пламени достигает 1,5 м, т.е. пожар можно расценивать как сильный.

Таблица 8

Выбросы тепловой энергии при сжигании дизельного топлива, кДж

Время горения	$Q^G(\text{CO}_2)$	$Q^G(\text{НСНО})$	$Q^P(\text{CO}_2)$	$Q^P(\text{НСНО})$
3 мин	$0,16 \cdot 10^7$	$1,9 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^5$	4,3
17 мин	$10,89 \cdot 10^7$	$131,9 \cdot 10^3$	$(51,1+76,5) \cdot 10^5$	36,4+54,6
40 мин	$11,04 \cdot 10^7$	$131,9 \cdot 10^3$	$(60,3+90,5) \cdot 10^5$	43,1+64,6
60 мин	$11,04 \cdot 10^7$	$131,9 \cdot 10^3$	$(60,3+90,5) \cdot 10^5$	43,1+64,6
80 мин	$11,04 \cdot 10^7$	$131,9 \cdot 10^3$	$(60,3+90,5) \cdot 10^5$	43,1+64,6
Всего	$44,17 \cdot 10^7$	$529,5 \cdot 10^3$	$581,1 \cdot 10^5$	418,4

Результаты работы указывают на необходимость продолжения исследований по оценке пожароопасности районов утилизации промышленных и бытовых отходов на основе математических моделей, а также позволяют сформулировать ряд требований к программе мониторинга объектов природной среды в этих районах на этапе проектирования, строительства и эксплуатации.

Литература

1. *Амосов Г.А.* Некоторые закономерности развития лесных низовых пожаров. // Возникновение лесных пожаров. — М., 1964, с. 152–183.
2. *Волокитина А.В., Климушин Б.Л., Сафронов М.А.* Технология составления крупномасштабных карт растительных горючих материалов (практические рекомендации). — Красноярск, 1985. — 25 с.
3. *Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.С.* Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы. Под общ. ред. Ю.Л. Воробьева; МЧС России. — М.: ДЭКС ПРЕСС, 2004. — 312 с.
4. *Гаврилов А.С.* Численная модель подъема тепловой струи от лесного пожара с учетом ее взаимодействия с внешним потоком. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 26, с. 130–141.
5. *Гусев В.Г., Корчунова И.Ю.* О методе расчета скорости распространения лесного низового пожара. // Лесные пожары и борьба с ними. — Л.: ЛенНИИЛХ, 1986.
6. *Доррер Г.А.* Динамика лесных пожаров. — Новосибирск: Наука, 2008. — 400 с;
7. *Марова А.В.* Концепция обеспечения безопасного функционирования особого объекта в условиях нестабильной внешней среды. // Экология урбанизированных территорий, 2010, № 1, с. 63–72.
8. Методика расчета выбросов от источников горения при разливе нефти и нефтепродуктов. // Утверждена приказом государственного комитета РФ № 90 от 05.03.1997.
9. *Нестеров В.Г., Гриценко М.В., Шубина Т.А.* Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. — М., 1975. — 18 с.
10. Технический кодекс установившейся практики. // ТКП 17.08-08-2007(02120). Окружающая среда и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов при пожарах. — Минск, 2007. — 53 с.
11. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. — М.: Наука, 1968. — 472 с.