

## МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЕ САМОВОЗГОРАНИЕ КАК ПРИЧИНА ПОЖАРОВ: МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СЛЕДОВАТЕЛЕЙ И ЭКСПЕРТОВ

**И.С. Таубкин**

Федеральное бюджетное учреждение Российский федеральный центр судебной экспертизы при Министерстве юстиции Российской Федерации, Москва, Россия, 109028

**Аннотация.** Сообщается перечень продуктов растительного происхождения, склонных к микробиологическому самонагреванию и самовозгоранию. Рассмотрены условия и признаки возникновения и развития этих процессов в сене и торфе. Приведен пример из экспертной практики пожара скирды сена в результате его микробиологического самовозгорания. Показано, что «сенной клинker» может возникать как при самовозгорании, так и при поджоге сена снаружи; таким образом, он не является дифференцирующим признаком поджога. Приведены зависимости для расчета условий теплового самовозгорания сена и торфа, а также примеры этих расчетов. Сообщаются литературные данные о количестве тепла, выделяемого различными материалами при 20 °С, и их аэрации; сведения, необходимые для анализа версии о причине пожара сена и торфа в результате их микробиологического самовозгорания.

**Ключевые слова:** сено, торф, микроорганизмы, температура, самонагревание, самовозгорание, тление, пламя, пожар

---

## MICROBIOLOGICAL SELF-IGNITION AS A CAUSE OF FIRE: GUIDELINES FOR INVESTIGATORS AND FORENSIC EXAMINERS

**I.S. Taubkin**

Russian Federal Center of Forensic Science of the Ministry of Justice of the Russian Federation, Moscow, Russia, 109028

**Abstract.** The paper presents a list of plant products prone to microbiological self-heating and spontaneous combustion. It examines the conditions and indicators of the emergence and development of these processes in hay and peat. An example from forensic casework describes fire in a haystack resulting from its microbiological spontaneous combustion. It is demonstrated that the “hay clinker” effect may arise both from spontaneous combustion and from an act of arson; therefore, it cannot be used as a differentiating feature of arson. Equations are proposed for the prediction of conditions leading to thermal self-ignition of hay and peat, with examples of calculations. The paper includes previously published data on the emission of heat by various materials at 20 °C, and their aeration, as well as data needed for the analysis of the causes of hay or peat fire resulting from their microbiological self-ignition.

**Keywords:** hay, peat, microorganisms, temperature, self-heating, spontaneous combustion, smoldering, flame, fire

---

К микробиологическому самовозгоранию склонны главным образом продукты растительного происхождения: корма для сельскохозяйственных животных, обладающие повышенной исходной влажностью или увлажнившиеся в процессе хранения от дождя (сено, силос, семена подсолнечника, зерно, солома, травяная мука и др.), торф (фрезерный торф, торфяные плиты), опилки (дубовые, сосновые, еловые) и т.д. [1–9].

Необходимо отметить, что не все виды соломы, которая представляет собой сухие стебли злаковых и бобовых зерновых культур, остающиеся после их обмолота, а также стебли льна, конопли, кенафа и других растений, освобожденные от листьев, соцветий, семян, способны к микробиологическому самовозгоранию. Так, пшеничная солома, имеющая температуру воспламенения 200 °С, температуру тления при самовозгорании – 212 °С, температуру самовоспламенения при самовозгорании – 310 °С и температуру самонагрева – 80 °С, не склонна к микробиологическому самовозгоранию [1, 7]. Этот процесс не наблюдается из-за недостаточного содержания в ней углеводов, являющихся питательной средой для микроорганизмов [7]. Гороховая солома, в противоположность пшеничной, содержащая в своем составе около 20 % углеводов, склонна к микробиологическому самовозгоранию [7]. Необходимо отметить, что пшеничная солома склонна к тепловому самовозгоранию, а также к химическому при действии окислителей [1].

Можно считать склонными к микробиологическому самовозгоранию материалы, которые, во-первых, могут служить питательной средой для микроорганизмов (бактерий, актиномицетов и грибов), а во-вторых, имеют температуру самонагрева не выше 70 °С. Это связано с тем, что в результате жизнедеятельности микроорганизмов температура в материале может повыситься до 70–75 °С. При более высокой температуре микроорганизмы гибнут, поэтому выделение тепла резко сокращается [10]. В работе [11] значение температуры, определяющей порог жизнедеятельности микроорганизмов, указано в 79 °С. По другим источникам температурный предел их биологической активности составляет 85–88 °С [4].

Для оценки возможности микробиологического самовозгорания необходимы сведения о склонности материала к этому процессу и данные о температуре, при которой начинается в нем чисто тепловой процесс [3]. Эту склонность можно установить специальными биологическими исследованиями. Для процесса, связанного с микробиологическим самовозгоранием, характерны две стадии самонагрева. Первичное самонагревание материала происходит за счет тепла, выделяемого термофильными микроорганизмами в процессе их жизнедеятельности, а вызванное им повышение температуры способствует возникновению и ускорению экзотермической реакции, которая может закончиться возникновением горения в самой нагретой части его объема. Температура самонагрева, соответствующая началу второй стадии процесса, равняется примерно 70–75 °С. Спонтанное нагревание материалов может быть ускорено воздействием тепла внешних источников, например паровых труб или других нагревателей, находящихся рядом с ними, а также солнечных лучей.

### Микробиологическое самовозгорание сена

Наиболее типичным продуктом сельскохозяйственного производства, склонным к микробиологическому самовозгоранию, является сено. Согласно справочным данным оно представляет собой легковоспламеняющуюся высушенную траву плотностью 70 кг/м<sup>3</sup> и влажностью 7,3 % (об.). Теплота сгорания ~16652 кДж/кг; легко загорается от искры и пламени; минимальная энергия зажигания 260 мДж [12]. При нагреве сено способно к тепловому самовозгоранию; температура самонагрева 70 °С (при 60 °С не испытывалось). Температура тления и температура самовоспламенения при самовозгорании соответственно равны 204 и 333 °С [1].

Согласно работе [8], микробиологическая активность внутри сена может вызвать в нем повышение температуры свыше 70 °С.

Для расчета условий теплового самовозгорания сена используются следующие зависимости [12]:

$$\lg t_c = 2,103 + 0,109 \cdot \lg S;$$

$$\lg t_c = 2,311 - 0,0581 \cdot \lg \tau,$$

где  $t_c$  – температура среды, при которой происходит самовозгорание;

$S$  – удельная поверхность складочной единицы (копны, стога, скирды) сена, м<sup>-1</sup>;

$\tau$  – время нагревания сена до самовозгорания, ч.

Удельная поверхность вычисляется по формулам:

$$S = F/V; \quad S = 2\left(\frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z}\right),$$

где  $F$  – полная наружная поверхность складочной единицы сена, м<sup>2</sup>;

$V$  – объем складочной единицы сена, м<sup>3</sup>;

$x, y, z$  – размеры складочной единицы сена вдоль соответствующей координатной оси; например, для прямоугольного параллелепипеда:  $x$  – длина,  $y$  – ширина,  $z$  – высота; для цилиндра:  $x = y = D$  – диаметр цилиндра;  $z$  – его высота [10].

В работе [8] приводится теоретическая оценка критического диаметра стога сена, равного 2 м. Такую оценку автор согласует с тем фактом, что сообщений о самовоспламенении сена, уложенного в валки, не поступало.

При действии окислителей сено склонно к химическому самовозгоранию, а при хранении в увлажненном состоянии в больших массах – к микробиологическому самовозгоранию [12]. Минимальные размеры кучи сена, способной к микробиологическому самовозгоранию, можно приблизительно определить по вышеприведенной формуле, приняв  $t_c$  равной температуре его самонагревания, т.е. 70 °С [10].

Необходимо особо отметить, что при микробиологическом самовозгорании существенную роль играет влажность материала, и поэтому качество его сушки до хранения имеет решающее значение. Так, при влажности сена в 30–45 % возникает опасность возникновения этого процесса.

Повышенная влажность способствует активизации жизнедеятельности бактерий и повышению тепловыделения. При влажности 14 % жизнедеятельность бактерий замедлена, при 17 % она увеличивается в 40 раз, а при 20,4 % – в 250 раз [3]. В работе [2] отмечается, что для предотвращения самовозгорания сена его влажность при закладке на хранение не должна превышать 15–17 %. Содержание влаги в круглых и квадратных тюках сена, соответственно, 15–18 % и 20–25%, рассматривается по данным консультативной службы по сельскому хозяйству университета штата Теннесси США как оптимальное до начала его прессования и складирования. По мнению работников этой службы, температура внутри сена не должна превышать 60 °С. Если же содержание влаги или температура превышают эти предельные значения, существует повышенная вероятность самовозгорания сена [13]. В работе [9] указывается, что влажность сена более 20 % усиливает тенденцию собранного сена к самовозгоранию. Согласно п. 1.2.5 ГОСТ 4808-87 [14] в сене из сеяных трав и трав естественных кормовых угодий массовая доля сухого вещества должна составлять не менее 83 % (влаги не более 17 %).

Смоченные водой или водопенными составами (применявшимися для охлаждения очагов горения) растительные горючие материалы нельзя оставлять на хранение в силосах и бункерах более чем на трое суток, поскольку возможен взрыв в результате выделения водорода при их брожении [3]. Так, экспериментальные исследования показали, что даже в условиях нормальной температуры термофильные микроорганизмы способствуют выделению водорода в процессе увлажнения и сверхравновесного смачивания водой этих материалов, что предопределяет возможность газовых взрывов; например, хлопковый шрот в этих условиях выделяет водород до 33 % (об.), а травяная мука и пшеничные отруби – 18,5 % (об.) и 21,0 % (об.) соответственно [15].

Усиливает склонность сена к самовозгоранию избыточное применение искусственных удобрений, наличие большого количества листвы, попадание комьев земли, плотное складирование, большая масса сена на единицу площади, условия хранения, при которых сено соприкасается со стенами. Более склонно к микробиологическому самовозгоранию сено из переудобренных, а также богатых азотом трав (из раннего укоса) или содержащих много бобовых культур [2]. На склонность сена к самовозгоранию влияет также состав растений; например, сено из суданки<sup>1</sup>, люцерны и клевера самовозгоралось соответственно через 73–97, 32–42, и 28–42 дней хранения [2].

<sup>1</sup> Суданка (суданская трава) – однолетняя кормовая культура, высокое (до 3 м) и густо облиственное растение, хорошо приспособлено к жаркому климату [16].

Наиболее опасным временем года в отношении самовозгорания сена считается период с июля по октябрь.

Саморазогрев сена может начаться через 2–3 дня после укладки, угроза же его самовозгорания возникает через 4–12 недель, но может сохраниться и до шести месяцев [3]. По утверждению автора работы [17], спонтанные пожары в складированном сене не происходят ранее 10–14 дней после его укладки, и, как правило, для их возникновения требуется от пяти до десяти недель. В работе [2] отмечается, что пожары в результате микробиологического самовозгорания сена возникают обычно через 6–8 недель после закладки, а по истечении 12 недель возникновение самовозгорания считается невозможным.

Таким образом, данные о периоде времени, прошедшего с момента закладки сена до его самовозгорания, в литературных источниках сильно различаются. Необходимо отметить, что их авторы, указывая этот период времени, не сообщают признаки, которые взяты ими за начало процесса самовозгорания. Процесс самовозгорания дает о себе знать: более или менее сильным гнилостным запахом – запахом прелого сена, парением над стогом (штабелем) сена, обильной конденсацией влаги на сене и строительных конструкциях хранилища [2], образованием воронок на поверхности сена [9], разогреванием сена в отдельных местах, изменением цвета сена (бурое и черное) [2, 9, 17, 18], повышением кислотности сена [17], тлением внутри сена, появлением дыма или пламени. В связи с этим представляют интерес данные о периоде времени, прошедшего с момента закладки сена до его самовозгорания, полученные в результате экспертного анализа случаев пожаров сена.

Пример пожара скирды сена в результате его микробиологического самовозгорания приведен в работе [18].

*Пример из экспертной практики.* Скошенное сено, находившееся длительное время в небольших копнах, было сложено в скирду высотой 3,5 м и размерами в плане 8,5 × 9 м. Через 12 дней около скирды появился запах силоса, а еще через 3–4 дня – запах дыма. При этом скирда в одном месте дала значительную осадку. На 18-й день появился дым, а затем пламя. Горение, которым были объаты верхние слои скирды, ликвидировали. При выяснении причины пожара было установлено, что в день его возникновения на территории сенопункта никаких работ с огнем не проводили. При снятии верхнего слоя сена высотой около 2 м в одном месте скирды был обнаружен очаг с высокой температурой. На глубине 1 м от поверхности температура составляла 90 °С, а на глубинах 1,4, 1,6 и 1,8 м соответственно 120, 210 и 276 °С. При вскрытии очага было обнаружено изменение цвета сена от желтого к темно-коричневому и черному с увеличением глубины слоя. Извлеченное на воздух обугленное сено через 5–6 мин воспламенилось.

Интересны также результаты крупномасштабных экспериментов по изучению самовозгорания сена, приведенные в работе [4]. Для их проведения из травы люцерны влажностью 19–33 % при температуре 20 °С была сформирована куча сена цилиндрической формы диаметром 6,2 м и высотой 7,6 м. Через две недели хранения температура в ней достигла 62 °С. Еще через две недели температура, продолжаясь увеличиваться, выросла до 100 °С и оставалась такой в течение трех недель. На восьмой неделе температура вновь стала увеличиваться, пока к исходу одиннадцатой недели не выросла до 128 °С. Спустя день после этого на боковой поверхности кучи в точке, расположенной на высоте 2,1 м, стал выделяться дым, а еще через два дня на расстоянии 2 м от этой точки появилось пламя. При этом в экспериментах с цилиндрическими образцами сена диаметром 5,6 м и высотой 4 м с содержанием влаги 24–28 % самовозгорания не наблюдалось. Таким образом, в рассмотренном эксперименте сено самовозгорелось примерно через 80 дней после его закладки на хранение.

Анализ результатов экспериментальных исследований процесса самовоспламенения сена позволяет сделать следующие выводы [4]:

- основным фактором, приводящим к его микробиологическому самовозгоранию, является присутствие в нем воды в количестве, при котором выделение тепла микроорганизмами не может быть компенсировано теплопроводностью влажного материала;
- самовозгорание возможно тогда, когда влажность растительного материала находится в достаточно узком, характерном для него диапазоне;

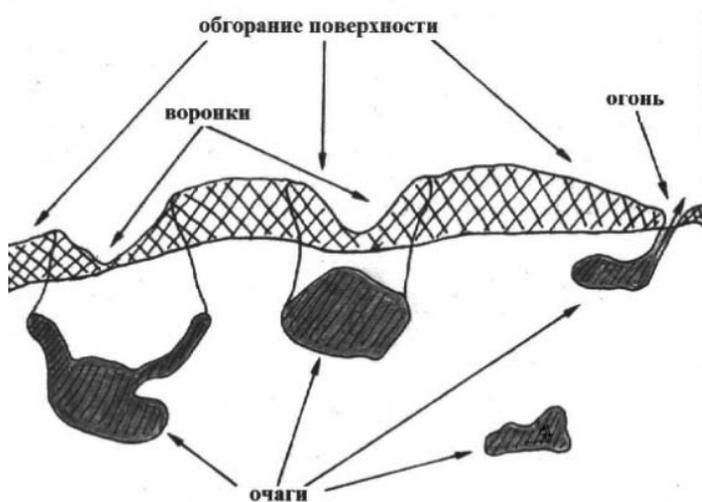
– в зависимости от влажности сена температура микробиологического очага в нем может изменяться от 50 до 75 °С, а в некоторых случаях – до 90 °С;

– хотя жизнедеятельность микроорганизмов и является основной причиной самовозгорания, развитие процесса после их гибели происходит по тепловому механизму.

Время от закладки сена на хранение до его самовозгорания зависит, как отмечалось выше, от наличия целого ряда факторов:

- влажности сена при его закладке на хранение;
- возможности его увлажнения в процессе хранения;
- вентилирования при хранении;
- наличия тепла внешних источников (воздействие солнца, температура воздуха, тепло различных нагревателей) при хранении;
- размеров складочной единицы сена;
- массы сена на единицу площади (плотности складирования);
- вида скошенных растений;
- избыточного применения искусственных удобрений в местах покосов травы;
- большого количества в сене листвы;
- попадания в него комьев земли при уборке.

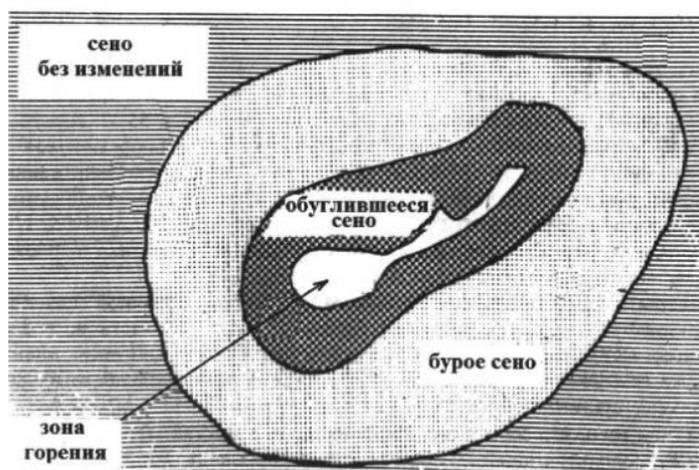
Как отмечалось выше, признаками самонагрева сена, т.е. начала его самовозгорания, является появление за один-два дня до пожара специфического запаха прелости, парения над стогом, обильной конденсации влаги на сене и строительных конструкциях хранилища, а также образование воронок на стоге. В случае хотя бы частичного сохранения сена после самовозгорания под его верхними слоями можно обнаружить внешнюю зону очага самонагрева бурого цвета и далее – зону интенсивного переугливания черного цвета, к которой примыкает зона горения [2, 9].



Наличие на поверхности складочных единиц сена следов горения при отсутствии этих следов внутри них свидетельствует о привнесенном извне источнике зажигания.

Структура различных зон, характерных для процесса самонагрева и самовозгорания сена представлена на рис. 1.

Рис. 1. Вверху – схематическое изображение морфологической характеристики стога сена, в котором идет процесс самонагрева (разрез по вертикальной плоскости); внизу – структура различных зон, характерных для процесса самонагрева, с очагом горения (разрез по горизонтальной плоскости) [9].



В работе [17] сообщалось, что криминалистически значимым признаком при самовозгорании сена является образование внутри его складочной единицы «сенного клинкера» (hay clinker), который обычно находится в очаге самовозгорания, где температура при последующем горении сена была самая высокая (рис. 2).

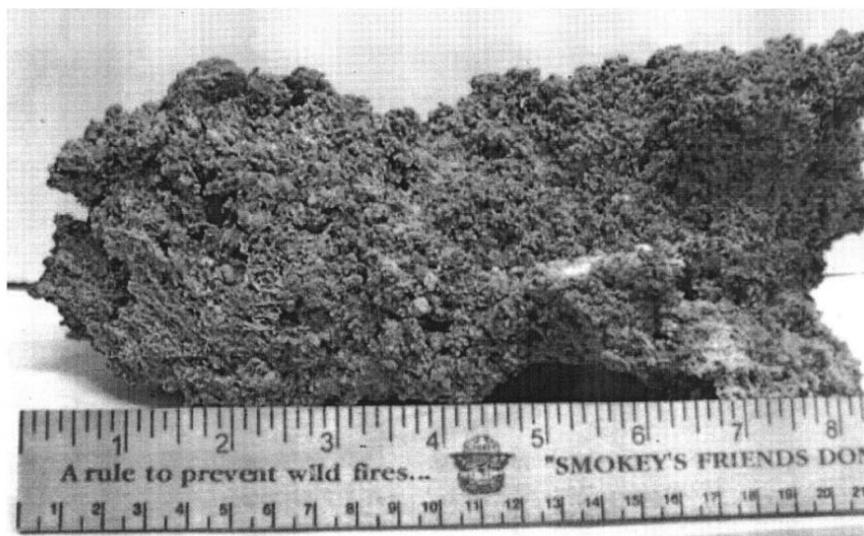


Рис. 2. «Сенной клинкер», возникший в стоге сена в результате его горения [13].

«Клинкер» в Словаре русского языка Ожегова означает «прочный огнеупорный и водонепроницаемый искусственный камень, а также обожженное до спекания цементное сырье» [19]. «Сенной клинкер», в свою очередь, представляет собой стекловидную массу неправильной формы с цветом от серого до зеленого, состоящую из неорганических остатков стеблей растений, включающих кремний, натрий и кальций. Он может быть ошибочно принят за остатки зажигательного устройства [17].

Для оценки достоверности суждения о том, что «сенной клинкер» образуется только при самовозгорании сена, а не в результате его горения от привнесенного снаружи источника зажигания, в штате Теннесси (США) в 2008–2009 годах были проведены специальные натурные исследования горения сена [13]. Запрессованные кипы сена прямоугольной формы складировали на пластиковом поддоне, обычно используемом для хранения сена. В сформированный штабель сена были установлены на различных расстояниях от поддона четыре термодатчика для измерения температуры горения. Штабель сена зажегся как снаружи факелом, так и изнутри – с помощью тлеющих углей. Изменение температуры внутри середины штабеля при его заживании факелом и тлеющими углями показано на рис. 3.

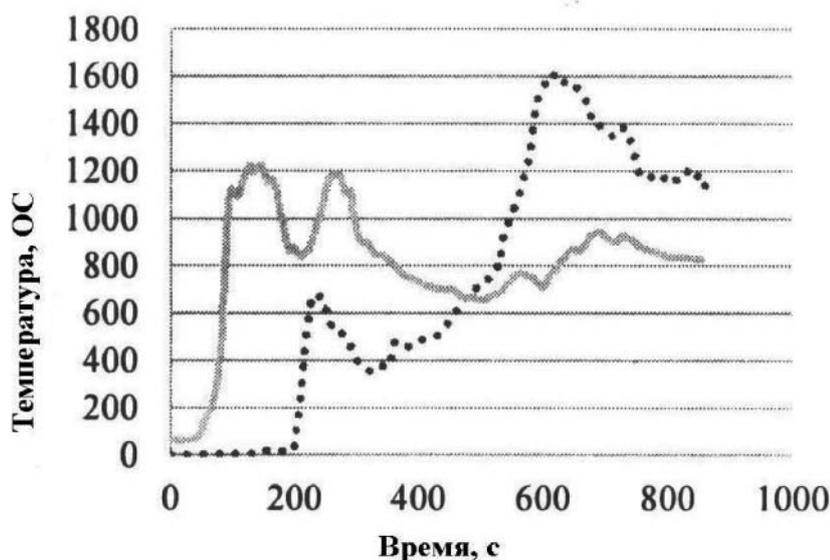


Рис. 3. Изменение температуры в середине штабеля сена. Сплошная линия – заживание внутри штабеля, пунктирная – заживание снаружи.

Эксперименты показали, что «сенной клинкер» может возникать как при самовозгорании, так и при поджоге сена снаружи. Его наличие или отсутствие, по-видимому, связано с химическим составом самого сена и примесей, которые могут попасть в него в процессе уборки и прессования. Все клинкеры, найденные после экспериментального изучения горения сена, различались по размеру, цвету и местоположению. Однако они, как правило, были сосредоточены вблизи центра стогов сена, независимо от расположения источника зажигания. Таким образом, наличие клинкера после горения сена является ненадежным источником информации о причинах происхождения огня [13].

Качество сена в период хранения не остается неизменным и зависит от многих факторов: его влажности при укладке на хранение, технологии приготовления, содержания в нем питательных веществ, плотности укладки, относительной влажности воздуха и др. Кроме того, на сено, хранящееся в скирдах, оказывают воздействие атмосферные осадки, солнечный свет, активная аэрация воздуха, особенно при сильном ветре.

В связи с этим проработке версии о причине пожара сена в результате его микробиологического самовозгорания будут способствовать следующие сведения:

- характеристики сена в соответствии с требованиями ГОСТ 4808-87 [14], паспорт сена;
- виды трав, преобладающих в травостое (ботанический состав сена);
- погодные условия (наличие осадков, их периодичность и длительность, температура воздуха) во время их покоса и последующего хранения;
- влажность сена при его складировании и время закладки;
- возможность подтопления основания складочной единицы сена талыми и дождевыми водами, зависящая от рельефа местности, на которой хранится сено;
- размеры и плотность складочной единицы;
- способ хранения (на открытой местности или в хранилище);
- вид укрытия (навесы; слои соломы или низкокачественного сена, прижатые кольями или жердями; обработка карбамидоформальдегидной смолой, которая полимеризуется в пленку; полиэтиленовое покрытие) складочной единицы сена на открытой местности и дата укрытия;
- тип хранилища (крытые площадки; сенные сараи);
- масса заложенного в хранилище (скирду) сена;
- условия хранения (герметичность крыши, препятствующая попаданию дождевой влаги; наличие установки вентилирования хранилища; контроль температуры в массе сена и др.).

Для анализа версии о возможности самовозгорания сена несомненный интерес будут представлять также данные о содержании влаги, температуре и других проявлениях процесса самонагревания внутри аналогичной складочной единицы сена, складированного примерно в одно и то же время со сгоревшим сеном и хранящегося в аналогичных условиях.

Необходимо отметить, что определение мест разогрева сена термозондом (термостангой), представляющим собой термоэлемент на длинной ручке с милливольтметром, градуированным в градусах Цельсия, доставляет подчас определенные трудности из-за теплоизолирующих свойств сена, обособленного расположения в нем очагов разогрева, занимающих порой незначительный объем [3, 9]. Версию о самовозгорании сена необходимо анализировать при отсутствии признаков другого механизма появления огня.

### **Микробиологическое самовозгорание торфа**

Согласно ГОСТ 21123-85 [20] торф – это порода, образующаяся «в результате отмирания и неполного распада болотных растений в условиях повышенного увлажнения при недостатке кислорода и содержания не более 50 % минеральных компонентов на сухое вещество».

Самовозгоранию торфа всегда предшествует более или менее длительный процесс низкотемпературного окисления и самонагревания, скорость которого определяется химической активностью торфа, условиями притока воздуха и возможностью отдачи тепла в окружающую среду. Процесс самовозгорания торфа вызывается совместным действием целого комплекса биохимических, химических и физических факторов. Склонность торфа к самовозгоранию зависит от его ботанического состава, степени разложения и физико-

химических свойств [21]. В начале процесса самовозгорания медленно происходит самонагревание торфа. За первые 30–40 суток температура в штабеле торфа повышается на 3–5 °С, в последующие 10–30 дней рост температуры ускоряется от 0,5 до 4,5 °С и более в сутки. Самонагревание скоплений торфа при температурах до 60–65 °С происходит преимущественно в результате жизнедеятельности микроорганизмов, а также окисления легко окисляющихся продуктов их жизнедеятельности и восстановленных веществ, которые накапливаются в анаэробных условиях. При температуре выше 60 °С торф в течение нескольких дней превращается в полукокс, способный энергично взаимодействовать с кислородом воздуха. Поэтому дальнейшее повышение температуры торфа происходит преимущественно в результате окисления кислородом и приводит к его самовозгоранию [21].

В работе, посвященной исследованию самонагревания и самовозгорания торфа [22], отмечается следующее: в диапазоне температур 20–65 °С в торфе одновременно протекают биохимические и химические термогенные процессы, но основное количество тепла в указанном диапазоне выделяется за счет жизнедеятельности микроорганизмов. При дальнейшем повышении температуры постепенно начинает преобладать чисто химическое окисление торфа, которое при температурах, превышающих 70–75 °С, становится единственной причиной образования тепла. Химическое окисление имеет важное значение в выделении тепла торфом уже при температуре около 40 °С.

Анализ материалов полевых исследований показал, что в штабеле или караване самонагревающегося торфа развитие микроорганизмов (бактерий, грибов и актиномицетов) происходит во все периоды его хранения. По мере усиления самонагревания интенсивность жизнедеятельности микроорганизмов непрерывно возрастает в зонах, в которых температура находится в пределах, допускающих их развитие (до 68–70 °С).

Наиболее склонен к самовозгоранию фрезерный торф – торфяная крошка различных форм и размеров, получаемая при фрезерном способе добычи [23]. Средневзвешенный диаметр фрезерного торфа в зависимости от назначения варьирует от 5–6 до 25–60 мм. Основные характеристики фрезерного торфа:

- тип (верховой, низинный);
- степень разложения разрабатываемого слоя залежи (при степени свыше 15–20 % разрабатывается на топливо, меньше 15 % – на подстилку, питательные грунты, кормовые добавки и др.);
- содержание влаги, которая в процессе сушки уменьшается от начальной (78–82 %) до конечной (40–60 %);
- зольность (до 15–25 %);
- удельная теплота сгорания рабочего топлива (11 кДж/кг при влажности 40 %);
- засоренность древесиной, кусками очеса и другими посторонними включениями с размером частиц свыше 25 мм (до 8–10 %);
- насыпная плотность (не менее 200 кг/м<sup>3</sup> – для брикетов);
- фракционный состав (содержание мелкой фракции до 1 мм не должно превышать 5–10 %).

Хранится фрезерный торф в полевых складочных единицах – штабелях, где он подвержен намоканию, саморазогреванию и самовозгоранию. В зависимости от назначения фрезерного торфа его характеристики регламентированы стандартами.

По степени эндогенной пожароопасности торф делится на две категории: опасную и малоопасную. К первой относится торф, выработанный на полях первого года эксплуатации, независимо от ботанического состава и степени разложения, а также торф, добытый на полях, эксплуатируемых в течение нескольких лет, при условии, что в предыдущем году в штабелях торфа на этих полях возникали отдельные очаги. В остальных случаях торф относится к малоопасной категории [23]. Согласно же РД 34.44.101-96 [24] фрезерный торф в зависимости от склонности к самовозгоранию делится на две категории: опасную и неопасную. К опасной категории относится торф с площади добычи первого года эксплуатации; второго и последующих лет эксплуатации при появлении на площади добычи отдельных очагов самовозгорания до 1 октября; второго и последующих лет эксплуатации при возникновении очагов самовозгорания более чем на 20 % общего количества штабелей на торфопредприятии до 1 апреля следующего года. К неопасной категории относится торф с влажностью более 55%. При невозможности оценить фактическое поведение торфа из-

за раннего вывоза с площадей разработки за ним сохраняется категория по склонности к самовозгоранию, определенная для прошлого сезона.

Температура подсушенных кусков торфа в солнечные летние дни может повышаться до 30–45 °С, что способствует развитию процесса самовозгорания. Наоборот, укладка штабелей в более прохладное ночное или утреннее время удлиняет инкубационный период самовозгорания торфа до 10–20 суток. Интенсивность окисления торфа увеличивается при повышении влажности до 35–45 %. При более высокой влажности наблюдается торможение процесса самовозгорания торфа.

В справочниках пожарной опасности веществ и материалов приводятся следующие свойства фрезерного торфа. Торф фрезерный, горючая плотная масса бурого цвета. Объемный вес 200 кг/м<sup>3</sup>; теплотворная способность 10454 кДж/кг. В сухом состоянии загорается от искры. Склонен к тепловому самовозгоранию; самонагревание наблюдалось при 70 °С (при 60 °С не испытывался); температура тления 225 °С; формулы для расчета условий самовозгорания:

$$\lg t = 1,781 + 0,264 \cdot \lg S;$$

$$\lg t = 2,396 - 0,18 \cdot \lg t.$$

где  $t$  – температура среды, при которой происходит самовозгорание;

$S$  – удельная поверхность складочной единицы, м<sup>-1</sup>;

$\tau$  – время нагревания торфа до самовозгорания, ч.

Фрезерный торф склонен к химическому самовозгоранию при действии окислителей, а также к микробиологическому самовозгоранию при хранении в караванах во влажном состоянии [1, 25].

Для расчета условий самовозгорания можно использовать также другие уравнения:

$$\lg t = 2,778 - 0,264 \cdot \lg l;$$

$$\lg t = 2,396 - 0,180 \cdot \lg t [1].$$

где  $l$  – линейный размер массы кубической формы ( $l$ , мм).

В соответствии с имеющимися данными [26] в результате деятельности термофильных микроорганизмов температура в массе фрезерного торфа поднимается до 70–75 °С [22]. Выше этой температуры начинаются активные окислительные процессы. Приняв температуру  $t = 70$  °С, при которой возникает тепловое самовозгорание торфа, за критическую, можно на основе зависимости  $\lg t = 2,778 - 0,264 \cdot \lg l$  рассчитать линейный размер массы кубической формы ( $l$ , мм), обуславливающий развитие этого процесса [3]:

$$\lg l = \frac{2,778 - \lg t}{0,264} = \frac{2,778 - 1,845}{0,264} = 3,534.$$

$l = 3419,8$  мм  $\approx 3,42$  м, что соответствует массе торфа объемом 40 м<sup>3</sup>.

Следует отметить, что моделирование складочной единицы хранения торфа, в которой могут начаться процессы самонагревания, удалось с помощью камер, представляющих собой цилиндры из фанеры диаметром и высотой 2 м со специальной тепловой изоляцией. В камерах меньшего объема воспроизвести самонагревание торфа не удалось [22].

Подробное описание методик исследования условий микробиологического самонагревания и самовозгорания торфа приведено в работах [22, 26].

При расследовании возгораний фрезерного торфа в штабелях (рис. 4) необходимо выяснить в первую очередь условия его хранения, определяющие самовозгорание:

- какова была влажность при закладке?
- измерялась ли периодически температура в штабеле торфа с целью своевременного принятия мер против самонагревания?
- была ли покрыта поверхность штабеля торфяной крошкой в целях торможения самонагревания?
- выполнялись ли другие требования нормативных документов по обеспечению пожарной безопасности хранения торфа? [24, 27, 28].



Рис. 4. Штабель торфа в процессе самовозгорания.

Ввиду важности сравнительного изучения самонагрева различных материалов в работе [22] приведены результаты определения тепла, образуемого как торфом, так и другими материалами. В опытах торф и каменный уголь пропускали через сито с диаметром ячеек 3 мм, сено и солому измельчали на отрезки длиной 3–4 см. Почву, обогащенную перегноем, зерно, опилки помещали в сосуды Дьюара без предварительной обработки. Фильтровальную бумагу нарезами полосками шириной 10 мм, складывали в виде пружинок и смачивали средой для аэробных целлюлозных бактерий и взвесью торфа. Определение тепла производили в течение двух-трех дней после начала заметного разложения материала фильтровальной бумаги, опилок – на 12-й день, зерна, сена и соломы – через 5 дней после увлажнения, а торфа – через 5 дней после взятия его из залежи и подсушки. Почву, уголь и навоз анализировали без предварительного выдерживания. Влажность устанавливали близкой к величине, при которой обычно происходит самонагревание материала в складочных единицах (торф, уголь, навоз), или сохраняли естественной (почва). Определение выделяемого тепла осуществляли при температуре 20 °С в аэробных условиях. Основные результаты исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1  
Выделение тепла различными материалами при 20 °С и аэрации [22]

Вид материала	Влажность материала, %	Кол-во тепла на 1 г сухого вещества за сутки, Дж
Сено с преобладанием осоки	65,0	562,73
Навоз конский	71,4	389,81
Зерно (овес)	38,4	147,40
Солома ржаная	44,0	141,38
Фильтровальная бумага	40,0	65,32
Опилки сосновые	40,0	15,95
Торф осоково-сфагновый, степени разложения 10–15 %	40,0	5,53

Вид материала	Влажность материала, %	Кол-во тепла на 1 г сухого вещества за сутки, Дж
Торф гипновый, степени разложения 15 %	40,0	2,01
Торф древесно-осоковый, степени разложения 35 %	40,0	2,09
Торф пушицево-сфагновый, степени разложения 35 %	40,0	1,21
Почва, обогащенная перегноем	19,3	3,18
Уголь бурый подмосковный	21,2	1,29
Уголь каменный длиннопламенный	7,7	1,05
Уголь каменный паровично-жирный	1,4	0,59
Уголь каменный паровично-спекающийся	0,8	0,33

Полученные данные, по мнению авторов работы [22], достаточно определенно показывают место, занимаемое каждым исследованным материалом в отношении интенсивности выделения им тепла. По сравнению с другими самонагревающимися материалами торф при 20 °С выделяет небольшое количество тепла (табл. 1).

Необходимо отметить, что теория процесса микробиологического самовозгорания пока не получила своего окончательного завершения [4].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таубкин С.И., Баратов А.Н., Никитина Н.С. Справочник пожароопасности твердых веществ и материалов. – М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1961. – 148 с.
2. Чирко В.Е., Савандюков М.А., Перцев С.Е., Попов И.А. Расследование пожаров: пособие для работников Госпожнадзора: в 2 ч. – М.: ВНИИПО МВД РФ. – 1993. – Ч. 1 – 176 с.; Ч. 2 – 132 с.
3. Таубкин С.И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. – М.: ВНИИПО МЧС РФ, 1998. – 598 с.
4. Горшков В.И. Самовозгорание веществ и материалов. – М.: ВНИИПО МЧС РФ, 2003. – 446 с.
5. Вогман Л.П., Горшков В.И., Дегтярев А.Г. Пожарная опасность элеваторов. – М.: Стройиздат, 1993. – 288 с.
6. Кольцов К.С., Попов Б.Г. Самовозгорание твердых веществ и материалов и его профилактика. – М.: Химия, 1978. – 160 с.
7. Клубань В.С., Петров А.П., Рябиков В.С. Пожарная безопасность предприятий промышленности и агропромышленного комплекса. – М.: Стройиздат, 1987. – 477 с.
8. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. К.Г. Бомштейна; под ред. Ю.А. Кошмарова, В.Е. Макарова. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
9. Поль К. Дитер. Естественно-научная криминалистика. – М.: Юрид. лит., 1985. – 301 с.
10. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. – М.: Химия, 1972. – 414 с.
11. Arson Detection for the First Responder. – 1st Edition, 2nd Printing-August 2002. – Homeland Security. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.in.gov/dhs/files/adfrstudent.pdf> (дата обращения: 20.06.2016).
12. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ.: в 2 кн. / под ред. А.Н. Баратова, А.Я. Корольченко. – М.: Химия, 1990. – Кн. 1 – 496 с.; Кн. 2 – 384 с.
13. Tinsley A.T., Whaley M., Ilove D.J. Analysis of Hay Clinker as an Indicator of Fire Cause. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arcfireengineering.com/site/wp-content/uploads/2013/07/Hay-Clinker-Formation.pdf> (дата обращения: 20.06.2016).

14. ГОСТ 4808-87. Сено. Технические условия.
15. Зуйков В.А. Газовыделение в процессах самонагревания, самовозгорания и горения растительного сырья: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 1993 – 23 с.
16. Сельскохозяйственный энциклопедический словарь / гл. ред. В.К. Месяц. – М.: Сов. энцикл., 1989. – 656 с.
17. Dehaan J.D. Kirk's Fire Investigation. – 3rd Edition. – New Jersey, 1991. – 416 p.
18. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. – М.: Химия, 1973. – 248 с.
19. Ожегов С.И. Словарь русского языка. – 23-е изд., стер. – М.: Рус. яз., 1990. – 915 с.
20. ГОСТ 21123-85. Торф. Термины и определения.
21. Горная энциклопедия: в 5 т. / гл. ред. Е. А. Козловский. – М.: Сов. энцикл., 1989. – Т. 4. – 623 с.
22. Стрыгин Н.Н. Исследование процессов и факторов самонагревания торфа // Тр. ВНИИТП МЭС СССР. Вып. 16. – Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 240 с.
23. Горная энциклопедия: в 5 т. / гл. ред. Е. А. Козловский. – М.: Сов. энцикл., 1991. – Т. 5. – 541 с.
24. РД 34.44.101-96. Типовая инструкция по хранению углей, горючих сланцев и фрезерного торфа на открытых складах электростанций.
25. Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности: справ. / под общ. ред. И.В. Рябова. – М.: Химия, 1970. – 335 с.
26. Исследование процессов саморазогревания и самовозгорания торфа и других органических веществ // Тр. ВНИИТП МЭС СССР. Вып. 15. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 190 с.
27. ППБО-135-80. Правила пожарной безопасности для предприятий торфяной промышленности.
28. ГОСТ 13674-2013. Торф и продукты его переработки. Правила приемки.

#### REFERENCES

1. Taubkin S.I., Baratov A.N., Nikitina N.S. *Spravochnik pozharoopasnosti tverdykh veshchestv i materialov*. [Reference book of fire-and-explosion hazard of solid substances and materials]. Moscow: MKH RSFSR, 1961. 148 p. (In Russ).
2. Chirko V.E., Savandyukov M.A., Pertsev S.E., Popov I.A. *Rassledovanie pozharov: posobie dlya rabotnikov Gospozhnadzora* [Investigation of the fires]. Two parts. Moscow: VNIPO MVD RF. 1993. (In Russian).
3. Taubkin S.I. *Pozhar i vzryv, osobennosti ikh ekspertizy* [Fire and explosion, features of their examination]. Moscow: VNIPO MChS RF, 1998. 598 p. (In Russian).
4. Gorshkov V.I. *Samovozgoranie veshchestv i materialov* [Self-ignition of substances and materials]. Moscow: VNIPO MChS RF, 2003. 446 p. (In Russian).
5. Vogman L.P., Gorshkov V.I., Degtyarev A.G. *Pozharnaya opasnost' elevatorov* [Fire danger of elevators]. Moscow: Stroizdat, 1993. 288 p. (In Russian).
6. Kol'tsov K.S., Popov B.G. *Samovozgoranie tverdykh veshchestv i materialov i ego profilaktika* [Self-ignition of solid substances and materials and their prevention]. Moscow: Khimiya, 1978. 160 p. (In Russian).
7. Kluban' V.S., Petrov A.P., Ryabikov V.S. *Pozharnaya bezopasnost' predpriyatii promyshlennosti i agropromyshlennogo kompleksa* [Fire safety of the enterprises of the industry and agro-industrial complex]. Moscow: Stroizdat, 1987. 477 p. (In Russian).
8. Draizdeil D. *Vvedenie v dinamiku pozharov* [Introduction to dynamics of the fires]. Moscow: Stroizdat, 1990. 424 p. (In Russian).
9. Pol' K. Diter. *Estestvenno-nauchnaya kriminalistika* [Natural-science criminalistics]. Moscow: Yurid. lit, 1985. 301 p. (In Russian).
10. Monakhov V.T. *Metody issledovaniya pozharnoi opasnosti veshchestv* [Methods of research of fire danger of substances]. Moscow: Khimiya, 1972. 414 p. (In Russian).
11. *Arson Detection for the First Responder*. 1st Edition, 2nd Printing-August 2002. Homeland Security. Available at: <http://www.in.gov/dhs/files/adfrstudent.pdf>. (accessed 20.06.2016).

12. Baratov A.N. Korol'chenko A.Ja (editors). *Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik* [Fire-and-explosion hazard of substances and materials, and means of their suppression. Reference book. 2 Volumes.]. Moscow: Khimiya, 1990. (In Russian).
13. Tinsley A.T., Whaley M., Ilove D. J. *Analysis of Hay Clinker as an Indicator of Fire Cause*. Available at: <http://arcfireengineering.com/site/wp-content/uploads/2013/07/Hay-Clinker-Formation.pdf>. (accessed 20.06.2016).
14. GOST 4808-87. *Seno. Tekhnicheskie usloviya*. [RF State Standard specification 4808-87. Hay. Specifications] (In Russian).
15. Zuikov V.A. *Gazovydelenie v protsessakh samonagrevaniya, samovozgoraniya i goreniya rastitel'nogo syr'ya* [Gas emission in processes of self-heating, self-ignition and burning of vegetable raw materials] avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Abstract of candidate thesis]. Moscow: MITKhT im. M.V. Lomonosova, 1993. 23 p. (In Russian).
16. Mesyats V.K. (editor) *Sel'skokhozyaistvennyi entsiklopedicheskiy slovar'* [Agriculture Encyclopedic dictionary]. Moscow: Sov. entsikl., 1989. 656 p. (In Russian).
17. Dehaan J.D. *Kirk's Fire Investigation*. Third Edition. New Jersey. 1991. 416 p.
18. Demidov P.G., Shandyba V.A., Shcheglov P.P. *Gorenie i svoystva goryuchikh veshchestv*. [Burning and properties of combustible substances]. Moscow: Khimiya, 1973. 248 p. (In Russian).
19. Ozhegov S.I. *Slovar' russkogo yazyka* [Dictionary of Russian]. Moscow: Russkij jazyk, 1990. 917 p. (In Russian).
20. GOST 21123-85. *Torf. Terminy i opredeleniya*. [RF State Standard specification 21123-85. Peat. Terms and definitions] (In Russian).
21. Kozlovskij E.A. (editor) *Gornaya jenciklopedija* [Mountain encyclopedia]. Vol. 4. Moscow: Sovetskaja jenciklopedija, 1989. 623 p. (In Russian).
22. Strygin N.N. *Issledovanie protsessov i faktorov samonagrevaniya torfa* [Research of processes and factors of self-heating of peat]. Tr. VNIITP MES SSSR. Issue 16. Leningrad: Gosenergoizdat, 1958. 240 p. (In Russian).
23. Kozlovskii E.A. (editor) *Gornaya entsiklopediya* [Mountain encyclopedia]. Vol. 5. Moscow: Sov. entsikl., 1991. 541 p. (In Russian).
24. RD 34.44.101-96. *Tipovaya instruktsiya po khraneniyu uglei, goryuchikh slantsev i frezernogo torfa na otkrytykh skladakh elektrostantsii*. [The standard instruction for storage of coals, combustible slates and milling peat on ground storages of power plant] (In Russian).
25. Ryabov I.V. (editor) *Pozharnaya opasnost' veshchestv i materialov, primenyaemykh v khimicheskoi promyshlennosti: spravochnik* [Fire danger of the substances and materials applied in chemical industry. Reference book]. Moscow: Khimiya, 1970. 335 p. (In Russian).
26. *Issledovanie protsessov samorazogrevaniya i samovozgoraniya torfa i drugikh organicheskikh veshchestv* [Research of processes of self-heating and self-ignition of peat and other organic substances]. Tr. VNIITP MES SSSR. Issue. 15. Moscow: Leningrad: Gosenergoizdat, 1957. 190 p. (In Russian).
27. PPBO-135-80. *Pravila pozharnoi bezopasnosti dlya predpriyatii torfyanoi promyshlennosti* [Fire safety regulations for the enterprises of the peat industry]. (In Russian).
28. GOST 13674-2013. *Torf i produkty ego pererabotki. Pravila priemki*. [RF State standard specification 13674-2013. Peat and products of his processing. Acceptance procedures]. (In Russian).

Сведения об авторе:

**Таубкин Игорь Соломонович** - кандидат технических наук, главный научный сотрудник отдела научно-методического обеспечения производства экспертиз ФБУ РФЦСЭ при Минюсте России; e-mail: onmo@sudexpert.ru.