

DOI 10.25741 / 2413-287X-2021-10-2-150

УДК 614.84.664

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ САМОНАГРЕВАНИЯ И САМОВОЗГОРАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Л. ВОГМАН, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, ФГБУ ВНИИПО МЧС России

E-mail: vogmanleo@ya.ru

*Выполнен анализ микробиологических (физиологических) и теплофизических процессов, которые могут приводить к самонагреванию и самовозгоранию растительного сырья и продуктов его переработки, в том числе зерна и комбикормов. Исследованы процессы газообразования при самонагревании и самовозгорании. Представлены схемы образования и развития взрывов в хранилищах. Предложены критерии индикации их состояния по количеству и составу горючих газов и по уровню пожаровзрывоопасности объекта на стадиях самонагревания, самовозгорания и горения растительного сырья.*

Ключевые слова: растительное сырье, зерно, комбикорма, самонагревание, самовозгорание, термическое и термоокислительное разложение, горючие газы, пожары, взрывы.

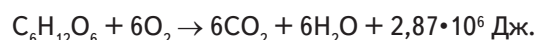
Выделение тепла в том или ином участке хранящегося растительного сырья или продуктов его переработки, превышающее теплоотдачу в окружающую среду, представляет собой типичную картину самонагревания (самосогревания) продукта. Существенную роль в образовании первоначальных очагов самонагревания играют такие свойства сырья, как теплопроводность и способность к самосортированию. Все это служит физической основой самонагревания. Физиологическая же основа — «дыхание» массы зерна, ферментативная деятельность клеток которого усиливается в присутствии микроорганизмов и при ее увлажнении. Однако не всякое повышение температуры следует рассматривать как начало развития процесса самовозгорания. Только тщательное и систематическое наблюдение за температурой и газовым составом в различных слоях насыпи и в свободных объемах хранилищ в сочетании с контролем соблюдения условий хранения может представить объективную картину состояния продукта в хранилище.

При повышении температуры в насыпи растительного сырья происходят ферментативные реакции, например процесс окисления глюкозы, входящей в состав зерна. Данная реакция сопровождается выделением влаги, ее миграцией в слое продукта (мигрирует впереди температурного фронта) и увеличением выхода диоксида углерода. Температура, при которой регистрируется наибольшая скорость реакции, составляет 40–70°C.

*The analysis of microbiological (physiological) and thermophysical processes potentially resulting in self-heating and self-ignition of plant derived raw materials and products including grains and compound feeds was performed. The production of gases during the self-heating and self-ignition was studied. The schemes of the initialization and development of explosions in the store houses are presented. The criteria for the characterization of the amount and composition of combustible gases, hazard of fire and / or explosion at store houses on the stages of self-heating, self-ignition and combustion of plant derived materials are proposed.*


Keywords: plant derived materials, grains, compound feeds, self-heating, self-ignition, thermal and thermooxidative destruction, combustible gases, fires, explosions.

Рассмотрим процесс окисления глюкозы при аэробном «дыхании» зерна [1–4], проходящий с образованием конечных продуктов — воды и диоксида углерода:



«Дыхание» растительного сырья при его длительном хранении без движения способствует повышению влажности, что при снижении содержания кислорода переводит аэробное окисление в анаэробное. Также замедляется окислительно-гидролитический распад липидных фракций. Однако возникает не только спиртовое и молочнокислое брожение ( $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2O_5OH + 2CO_2 + 0,1 \cdot 10^6$  Дж и  $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CHOHCOOH + 0,75 \cdot 10^6$  Дж), но и маслянокислое с превращением глюкозы в масляную кислоту, водород и диоксид углерода ( $C_6H_{12}O_6 \rightarrow C_3H_7COOH + 2CO_2 + 2H_2 + 0,063 \cdot 10^6$  Дж).

Близким к маслянокислому брожению является ацетобутиловое брожение пектиновых веществ и клетчатки. Таким образом, любая форма окисления растительного сырья приводит к его самонагреванию, а в случае анаэробного окисления — и к выделению горючих газов.

В самонагревании растительного сырья при его хранении, помимо «дыхания», большую роль играет также жизнедеятельность микроорганизмов, протекающая в условиях ограниченного теплоотвода, низкой теплопроводности сырья и высокой сорбционной способности. 

В процессе жизнедеятельности микроорганизмы разогревают среду своего обитания до температуры 70–75°C, а по некоторым данным — до 100°C. Такая температура является предельной для существования микроорганизмов, и они погибают. Разогретый продукт после гибели микроорганизмов начинает остывать. Однако при этой температуре в условиях аккумуляции тепла может происходить и разогрев массы продукта.

Кинетика микробиологического самонагрева растительного сырья индивидуальна, она зависит от его вида и вида микроорганизмов. Подробнее данные процессы исследованы для зерновых культур. Процесс самонагрева зерновой массы обычно характеризуется инкубационным периодом (с малой скоростью повышения температуры), продолжающимся от 2 до 25 сут. За ним следует резкое увеличение скорости разогрева массы растительного сырья (в 2–22 раза), как правило, приводящее к максимальной температуре материала. Такое ее повышение может привести к самовозгоранию массы продукта.

### ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ГАЗООБРАЗОВАНИЕ

Были проведены лабораторные и представительные опыты с гранулированной травяной мукой, хранящейся в установке, имитирующей силос объемом 35 м<sup>3</sup>. Исследование изменений температуры при образовании пластового очага самонагрева и его развития в течение 11 суток показали ее монотонный рост [5–8]. Как показано на рисунке 1, с течением времени и при повышении температуры расчетная кривая в очаге самонагрева заметно расходится с экспериментальной. Это является следствием усиления конвекции продуктов разложения сырья при самонагревании, а затем и при самовозгорании.

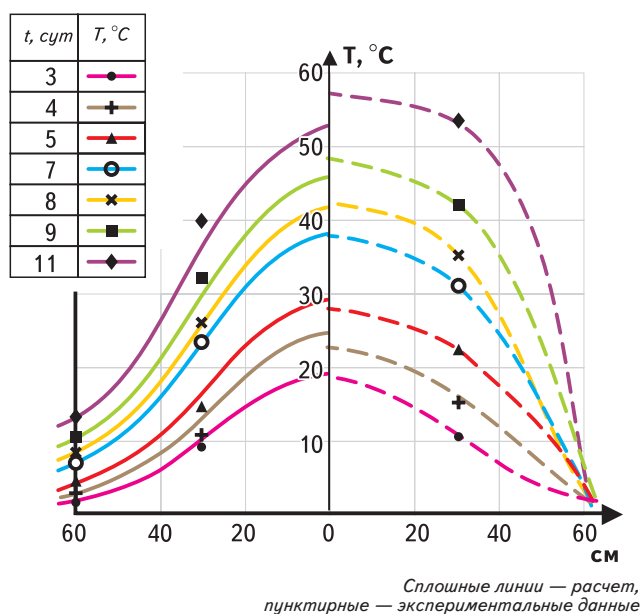


Рис. 1. Температурные поля при пластовом очаге самонагрева

Для зерновой массы максимальная скорость самонагрева составляет 11–24°C в сутки [2–4]. Далее возможен рост температуры за счет поэтапной адсорбции паров и газов, в том числе и горючих (водород, оксид углерода, метан и др.), что может привести к самовозгоранию. Повышение температуры до 100–130°C и далее до 200–220°C связано с происходящими процессами термической и термоокислительной деструкции органической массы. При этом в больших объемах выделяются горючие газы. При 200°C начинаются процессы тления, для поддержания которых достаточно содержания в насыпи кислорода не более 1% об. д. Температура, близкая к максимальной, сохраняется в сырье от 3 до 8 суток. В силу его малой теплопроводности и сорбционных процессов тепло аккумулируется в очаге и при доступе воздуха температура в нем достигает температуры горения (1000°C и выше).

Анализ значительного массива данных газового состава, полученных в лабораторных исследованиях и полигонных опытах, позволяет сделать вывод о том, что при самонагревании индикаторными газами с концентрацией до 1% об. д. могут служить водород и оксид углерода. Если концентрация каждого из них превышает 1% об. д. и при этом еще регистрируется метан, то это означает, что температура очага близка или выше температуры тления (220–250°C) и в насыпи имеется устойчивый очаг самовозгорания.

Таким образом, для обеспечения взрывопожаробезопасности на предприятиях по хранению и переработке растительного сырья, в том числе зерна и комбикормов, особое внимание следует уделять составу газа и концентрации горючих газов.

Результаты газового анализа проведенных представительных опытов с гранулированной травяной мукой в аналогичной установке при развитом очаге горения объемом 15 м<sup>3</sup> (температура ~ 800°C) приведены в таблице.

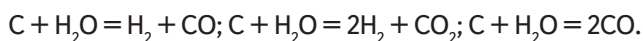
### Концентрация газов при развитии очага горения, % об. д.

Место отбора пробы в установке	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
<i>1 опыт</i>						
Нижняя часть	29,4	7,1	14,0	26,0	0,5	22,0
Средняя часть	17,6	11,0	14,0	35,0	0,4	22,0
Верхняя часть	7,6	8,0	13,0	13,0	0,4	57,0
<i>2 опыт</i>						
Нижняя часть	21,8	11,0	2,8	27,3	0,2	37,0
Средняя часть	9,7	9,0	0,7	20,8	3,2	56,6
Верхняя часть	16,4	6,0	1,3	24,6	2,1	42,2

Примечание. N<sub>2</sub> принимался за 100% об. д.

Как видно из данных таблицы, концентрация горючих газов (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) достигает или превышает значение нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) для них. Высокие значения концентрации горючих

газов зарегистрированы при воздействии на тлеющий или горящий продукт воды или пара, причем выход горючих газов повышается одновременно с ростом температуры в очаге пожара. Например, при горении гранулированной травяной муки (размер очага 3 м<sup>3</sup>, температура более 800°C) концентрация водорода возрастала с 9,9 до 11,6% об. д., оксида углерода — с 9,2 до 11,0% об. д. Более высокая концентрация водорода (до 55% об. д.) была зарегистрирована в полигонной установке в момент подачи и через несколько минут после подачи пара на очаг горения. Это объясняется тем, что при горении растительного сырья образуются полукок и кокс, содержание углерода в которых достигает 82–94%. Выход горючих газов при взаимодействии водяного пара с углеродом при температуре горения углерода связан с протеканием реакций, сопровождающихся выделением водорода и оксида углерода:



Именно воспламенение газозвушных смесей является причиной первичных разрушительных взрывов в силосах и бункерах. При этом вероятность взрывов существенно возрастает при подавлении очагов горения растительного сырья водой, водопенными средствами и паром или в процессе разгрузки при поступлении дополнительного кислорода воздуха.

### СХЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ВЗРЫВОВ В ХРАНИЛИЩАХ

Самонагревание растительного сырья, в том числе зерна, как правило, бывает трех видов: сферическое, пластовое и сплошное.

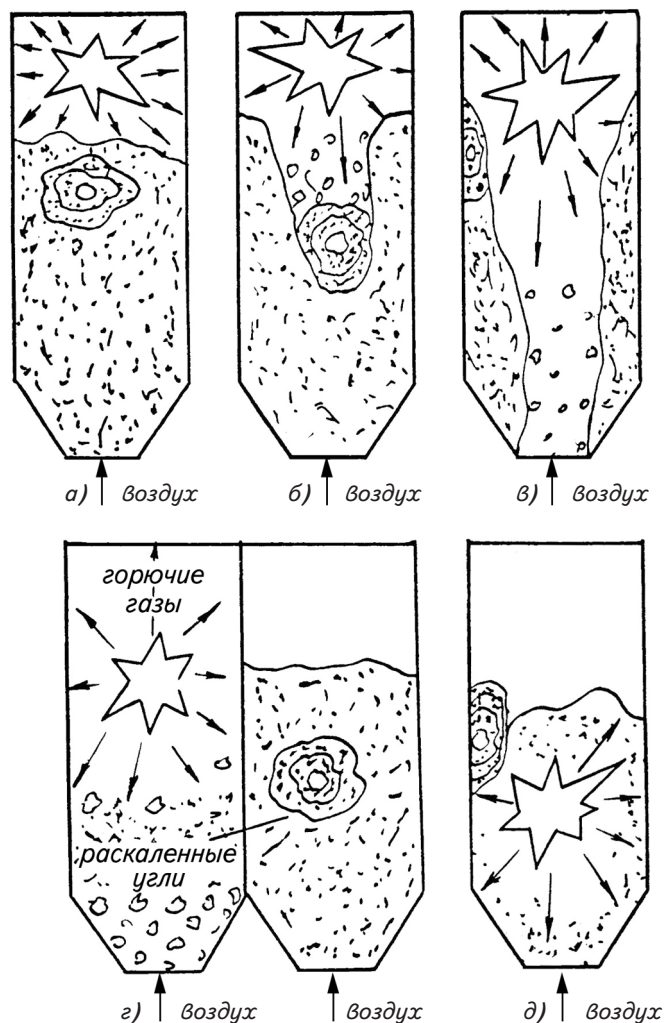
*Сферическое* может возникать в любой части насыпи. Предпосылками для его развития служит следующее: увлажнение какого-либо участка; наличие участков с повышенным содержанием сорной примеси и пылевидных частиц, следовательно, и микроорганизмов; совместное нахождение продуктов с разнородными по составу примесями; скопление насекомых и клещей в одном месте.

*Пластовое* в виде горизонтального или вертикального слоя (шурфа) возникает в верхней (верховое самонагревание), нижней (низовое) или боковой (вертикально-пластовое) частях хранилища. Верховое самонагревание характеризуется появлением греющегося слоя на глубине 70–100 см от поверхности и чаще всего наблюдается поздней весной и осенью, что обусловлено разницей температуры между верхними и средними слоями насыпи продукта и миграцией влаги из теплых слоев к холодным в разное время суток (ночь, день). Низовое самонагревание развивается горизонтальным пластом в нижней части насыпи и является следствием повышенной влажности продукта и вентилирования воздушным потоком. Причина вертикально-пластового самонагревания в несимметричном обогреве или охлаждении стен хранилища, например одной из наружных стен, передаче тепла от соседнего хра-

нилища, залегании продукта на его внутренней стенке в течение длительного периода.

*Сплошное* самонагревание является следствием принятых вовремя мер по устранению одного из перечисленных выше видов самонагревания или загрузки на хранение сырого или влажного растительного сырья, а также содержащего значительное количество сорной примеси и с повышенной жирностью.

На отдельных участках насыпи, где отвод тепла ограничен и обеспечен доступ воздуха, возможно активное горение растительного сырья. В процессе экзотермических реакций и выделения продуктов сухой перегонки органических соединений (альдегиды, кетоны, спирты, масла, смолы) создается газонепроницаемый свод в зоне, расположенной под очагом горения, над ним или вокруг него (рис. 2).



**Рис. 2. Схема возникновения взрыва при хранении в силосе растительного сырья в случае его самонагревания:**

- а — при выходе очага на поверхность сырья;
- б — при обрушении свода над очагом;
- в — при образовании шурфа;
- г — при наличии пустующего смежного силоса;
- д — при обрушении свода над разгрузочным люком.

Свод разделяет весь объем хранилища растительного сырья на части. В очаге скапливаются и застаиваются продукты термической и термоокислительной деструкции, содержащие в своем составе горючие газы, концентрация каждого из которых при развитом очаге горения чаще всего выше НКПР. Эти газы по мере увеличения размеров очага и с течением времени могут диффундировать в свободное пространство хранилища над продуктом или под ним. Поскольку горючие газы легче воздуха и нагреты, они перемещаются в надсводное пространство, через неплотности в соединениях могут проникать в соседние хранилища. Образование сводов способствует распространению горения в нижнюю часть хранилища в зону разгрузочного люка, через который возможен доступ кислорода воздуха.

Таким образом, опыт эксплуатации силосов и бункеров и длительное наблюдение за процессами, протекающими в растительном сырье, в том числе зерне, показывают, что при его слеживании и увлажнении очаг пожара при самовозгорании наиболее часто формируется на высоте, равной примерно трети высоты столба насыпи от разгрузочного люка, где достигается максимальное уплотнение продукта.

#### Литература

1. *Мудрецова-Висс, К. А.* Микробиология / К. А. Мудрецова-Висс. — М. : Экономика, 1985. — 256 с.
2. *Лебедев, С. Н.* Физиология растений / С. Н. Лебедев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Колос, 1982. — 463 с.
3. Хранение комбикормов и их компонентов / А. С. Карецкас [и др.]. — М. : Колос, 1982. — 223 с.
4. *Трисвятский, Л. А.* Хранение зерна / Л. А. Трисвятский. — М. : Агропромиздат, 1986. — 351 с.
5. *Vogman, L. P.* Burning of vegetable raw materials and fire safety of elevators / L. P. Vogman, A. G. Degtyarev, Yu. V. Plushevich // Fire and explosion and venting of deflagrations : fire international seminar. — Moscow, 1995. — P. 483–490.
6. *Вогман, Л. П.* Пожарная безопасность элеваторов / Л. П. Вогман, В. И. Горшков, А. Г. Дегтярев. — М., 1993. — 289 с.
7. *Соколов, Д. Н.* Микробиологическое самовозгорание / Д. Н. Соколов, Л. П. Вогман, В. А. Зуйков // Пожарная безопасность. — 2009. — № 3. — С. 72–77.
8. *Вогман, Л. П.* Пожарная опасность процесса тления горючих органических веществ и материалов / Л. П. Вогман // Пожарная безопасность. — 2018. — № 3. — С. 39–49. ■