
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

Научная статья

УДК 536-34; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-1-32-38

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИ СУШКЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

✉ Кузьмин Анатолий Алексеевич;

Романов Николай Николаевич;

Пермяков Алексей Александрович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ kaa47@mail.ru

Аннотация. Констатировано, что распространенными причинами пожара являются процессы самовозгорания, вызываемые совместным действием комплекса химических, микробиологических и физических факторов, определяющих тепловой баланс между процессами выделения тепловой энергии и ее диссипации в окружающую среду. Проанализирована связь влажности сыпучих материалов с интенсивностью процессов самонагревания и последующего самовозгорания. Выявлена возможность уменьшения интенсивности самонагревания при сушке сыпучих материалов. Установлена взаимосвязь коэффициента теплоотдачи между наружной поверхностью сыпучего материала и агентом сушки в зависимости от его температуры и влагосодержания. Показана возможность уменьшения трудоемкости расчета режима сушки за счет замены критериальных уравнений теории подобия эмпирическими формулами. Предложена структура алгоритма расчета параметров процесса свободной конвекции в процессе сушки сыпучего материала. Экспериментально доказана возможность использования предлагаемых эмпирических выражений в практических расчетах.

Ключевые слова: самовозгорание, самонагревание, сыпучий материал, влажность сыпучего материала, конвективная сушка, коэффициент теплоотдачи

Для цитирования: Кузьмин А.А., Романов Н.Н., Пермяков А.А. Исследование процесса свободной конвекции при сушке сыпучих материалов // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2026. № 1. С. 32–38. DOI: 10.61260/2304-0130-2026-1-32-38

Введение

Достаточно распространенными причинами пожара являются процессы самовозгорания, которые вызываются совместным действием целого комплекса химических, микробиологических и физических факторов, определяющих тепловой баланс между процессами выделения тепловой энергии и ее диссипации в окружающую среду [1].

К микробиологическому самовозгоранию склонны главным образом продукты растительного происхождения, обладающие повышенной исходной влажностью или увлажнившиеся в процессе хранения. Многие из подобных материалов являются сыпучими, структура которых способствует накоплению влаги в процессе перевозки и хранения.

В [2] показано, что наличие влаги является необходимым условием для развития процессов микробиологического самовозгорания, для которых характерны две стадии самонагревания. Температура самонагревания, соответствующая началу второй стадии процесса, равняется примерно 70–75 °С. [3]

Наиболее склонен к самовозгоранию фрезерный торф – торфяная крошка различных форм и размеров, получаемая при фрезерном способе добычи [4].

Теоретические основы и методы расчета

Уменьшение влажности понижает уровень микробиологической активности в сыпучих материалах, поэтому исследование процесса свободной конвекции при их сушке представляется достаточно актуальным.

Известно, что наиболее распространенным способом уменьшения интенсивности самонагревания в сыпучем материале считается конвективная сушка, которая предполагает нагнетание нагретого воздуха, являющегося агентом сушки и свободной циркуляции атмосферного воздуха [5]. Кроме того, воздух является также агентом охлаждения. Эти два агента должны выполнять основные функции: поддержание температуры в пределах установленных норм и удаление испаренной влаги за пределы зоны складирования [6].

Определить необходимую продолжительность процесса сушки и времени охлаждения можно из уравнения теплового баланса, в котором теплоотдача описана законом Ньютона-Рихмана [7]:

$$c \cdot m \cdot \Delta t = \alpha \cdot \tau \cdot F \cdot (t_a - t_o), \quad (1)$$

где c – удельная (массовая) теплоемкость влажного материала, Дж/(кг·°C);

m – масса сыпучего материала, кг;

Δt – перепад температур сыпучего материала в процессе сушки, °C;

α – коэффициент теплоотдачи между наружной поверхностью сыпучего материала и агентом, Вт/(м²·°C);

τ – продолжительность процесса сушки сыпучего материала, с;

F – площадь наружной поверхности сыпучего материала, м²;

t_a – температура нагретого воздуха (агента сушки), °C;

t_o – температура атмосферного воздуха (агента охлаждения), °C.

Поскольку нагретый воздух представляет собой смесь сухого воздуха и насыщенного пара, в уравнении (1) величина коэффициента теплоотдачи α носит интегральный характер и выражается уравнением (2):

$$\alpha \cdot F = \alpha_{cv} \cdot F_{cv} + \alpha_{nn} \cdot F_{nn}, \quad (2)$$

где α_{cv} – коэффициент теплоотдачи сухого воздуха, Вт/(м²·°C);

α_{nn} – коэффициент теплоотдачи насыщенного пара, Вт/(м²·°C);

F_{cv} – площадь теплоотдачи от сухого воздуха, м²;

F_{nn} – площадь теплоотдачи от насыщенного пара, м².

Соотношение площадей теплоотдачи насыщенного пара и сухого воздуха K определяется соотношением плотностей сухого воздуха к насыщенному пару и зависит от температуры [8].

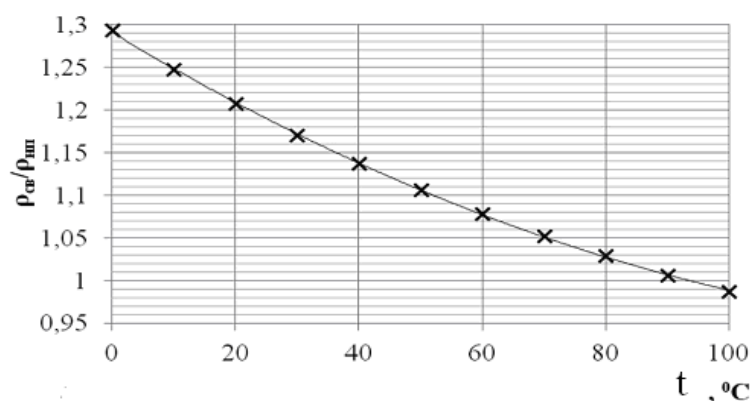


Рис. 1. Температурная зависимость отношения плотности сухого воздуха к плотности насыщенного пара

$$K = \frac{F_{nn}}{F_{cv}} = \frac{F_{nn} \cdot dx}{F_{cv} \cdot dx} = \frac{V_{un}}{V_{cv}} = \frac{m_{nn} \cdot \rho_{cv}}{m_{cv} \cdot \rho_{nn}} = \frac{d}{1000} \cdot \frac{\rho_{cv}}{\rho_{nn}}, \quad (3)$$

где d – величина влагосодержания влажного воздуха, г/кг.

Из рис. 1 следует, что по мере увеличения средней температуры воздуха t изменение отношения плотности сухого воздуха ρ_{cv} к плотности насыщенного пара ρ_{nn} носит нелинейный характер. Эта зависимость может быть представлена следующим эмпирическим выражением:

$$\frac{\rho_{cv}}{\rho_{nn}} = \frac{t^2 \cdot 10^{-5} - 0,0044 \cdot t + 1,2905}{1000}. \quad (4)$$

Отсюда соотношение площадей насыщенного пара и сухого воздуха K можно определить с использованием выражения (5):

$$K = \frac{F_{nn}}{F_{cv}} = d \cdot 10^{-6} \cdot (t^2 \cdot 10^{-5} - 0,0044 \cdot t + 1,2905). \quad (5)$$

Отсюда, выразив величины площадей насыщенного пара F_{nn} и сухого воздуха F_{cv} через выражение (5) и подставив их в уравнение (2), можно определить значение коэффициента теплоотдачи α между наружной поверхностью сыпучего материала и агентом:

$$\alpha \cdot F = \alpha_{cv} \cdot F_{cv} + \alpha_{nn} \cdot F_{nn} = \alpha_{cv} \cdot F \cdot \left(\frac{1}{K} + 1 \right) + \alpha_{nn} \cdot F \cdot \left(1 - \frac{1}{K + 1} \right).$$

Отсюда, после несложных преобразований, выводится уравнение (6), которое устанавливает взаимосвязь коэффициента теплоотдачи между наружной поверхностью сыпучего материала и агентом в зависимости от температуры и влагосодержания воздуха:

$$\alpha = \alpha_{cv} \cdot \left(\frac{1}{K} + 1 \right) + \alpha_{nn} \cdot \left(1 - \frac{1}{K + 1} \right). \quad (6)$$

Если квалифицировать процесс теплообмена между поверхностью сыпучего материала и омывающем ее воздухом при отсутствии принудительной вентиляции как свободную (естественную) конвекцию в большом объеме, то для описания этого процесса можно использовать соответствующее критериальное уравнение:

$$Nu_m = C \cdot Ra_m^n \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

где $Ra = Gr \cdot Pr$ – число Релея;

$Gr = \beta \cdot g \cdot l_o^3 \cdot \Delta t / \nu^2$ – число Грасгофа;

$Pr = \nu / a$ – число Прандля;

ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, m^2/c ;

a – коэффициент температуропроводности воздуха, m^2/c ;

$\beta = 1/T_m$ – коэффициент объемного расширения воздуха, $1/K$;

$T_m = 0,5 \cdot (t_a + t_o) + 273$ – средняя абсолютная температура воздуха, K ;

C, n – постоянные коэффициенты, величина которых зависит от значения числа Релея R_a .

Наличие индекса m предполагает, что значения коэффициент кинематической

вязкости ν и числа Прандтля Pr определяются для средней температуры воздуха T_m .

Отдельной проблемой является нахождение характерного линейного (определяющего) размера l_o . Учитывая зернистую структуру сыпучих материалов, форма отдельных зерен отличается от шаровых, и условно ее можно считать эллипсоидом вращения. В этом случае в качестве характерного линейного (определяющего) размера l_o принимается гидравлический диаметр:

$$l_o = \frac{2 \cdot L \cdot A}{L + A}, \quad (8)$$

где L, A – длина и диаметр зерна соответственно, m .

Заключение

Использование теории подобия предполагает учет зависимости физических свойств воздуха и водяного пара от температуры, что существенно увеличивает трудоемкость подобных расчетов. Решение проблемы предполагает использование метода регрессивного анализа на основе достаточного аналитического массива при формировании эмпирических выражений для коэффициентов теплоотдачи. [9, 10]

Для решения этой задачи был сформирован соответствующий алгоритм, программная реализация которого была произведена на основе использования Visual Basic (макрос расчетного блока) и электронной таблицы Excel (интерфейс, возможности построения регрессии).

Алгоритм расчета параметров процесса свободной конвекции в процессе сушки сыпучего материала представлен на рис. 2.

На основе использования методов регрессивного анализа по результатам расчетов, накопленных в соответствующем массиве, получены следующие эмпирические выражения расчета коэффициента теплоотдачи:

$$\text{– для сухого воздуха } \alpha_{cv} = 1,57 \cdot 10^{-3} \cdot l_o^{-0,625} \cdot B_{cv}, \quad (9)$$

$$\text{где } B_{cv} = 0,46935 \cdot \frac{(t_a - t_o)^{0,125} (0,0148 \cdot t_a + 11,234)}{0,9169 - 6 \cdot 10^{-5} \cdot t_o} \quad (10)$$

$$\text{– для насыщенного пара } \alpha_{nm} = 1,57 \cdot 10^{-3} \cdot l_o^{-0,625} \cdot B_{nm}, \quad (11)$$

$$B_{nm} = \frac{(t_a - t_o)^{0,125} (0,0013 \cdot t_a^3 - 0,272 \cdot t_o^2 + 18,801 \cdot t_a + 1045,3)}{1,8976 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot t_o^2 - 0,0139 \cdot t}. \quad (12)$$

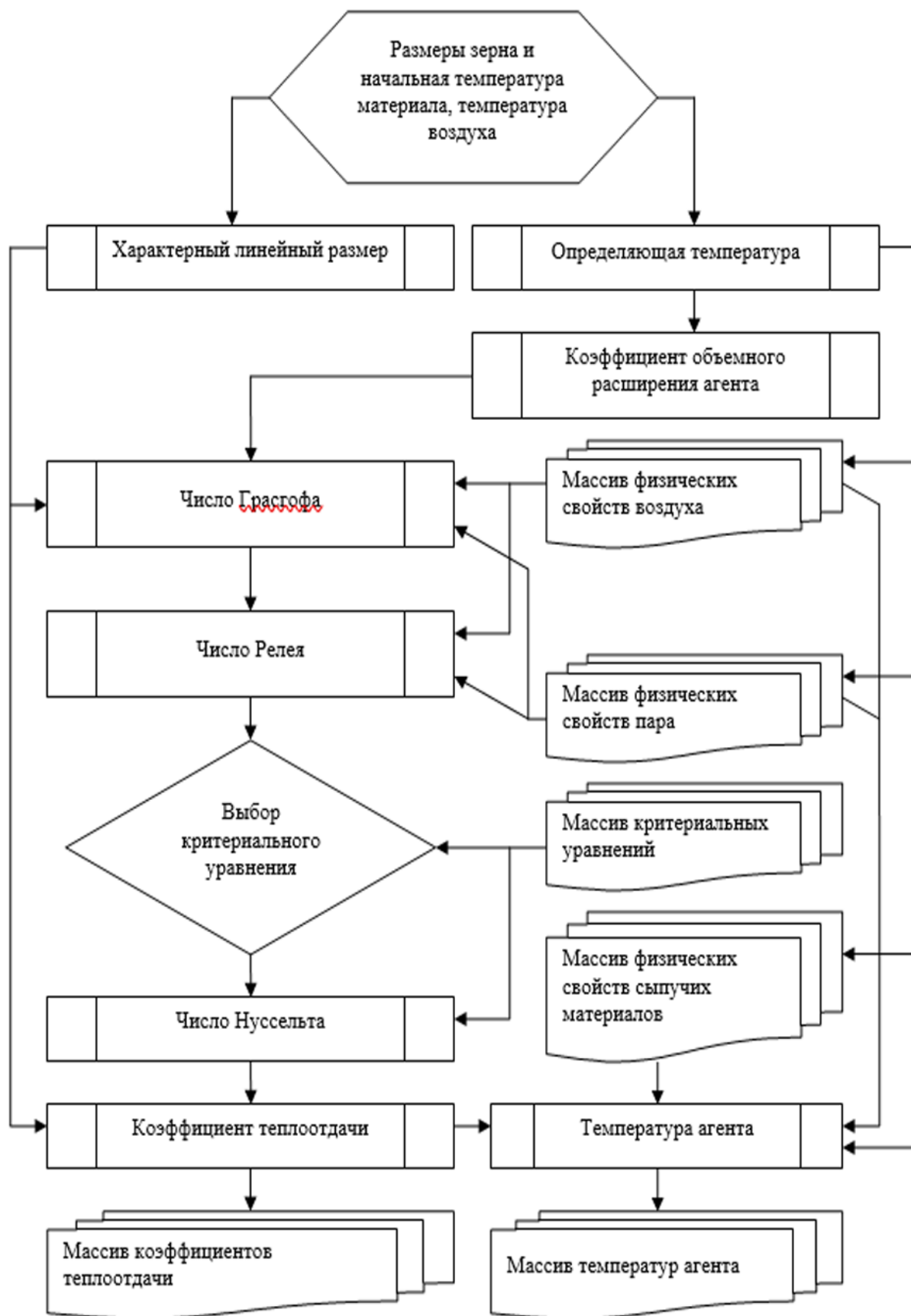


Рис. 2. Алгоритм расчета параметров процесса свободной конвекции в процессе сушки сыпучего материала

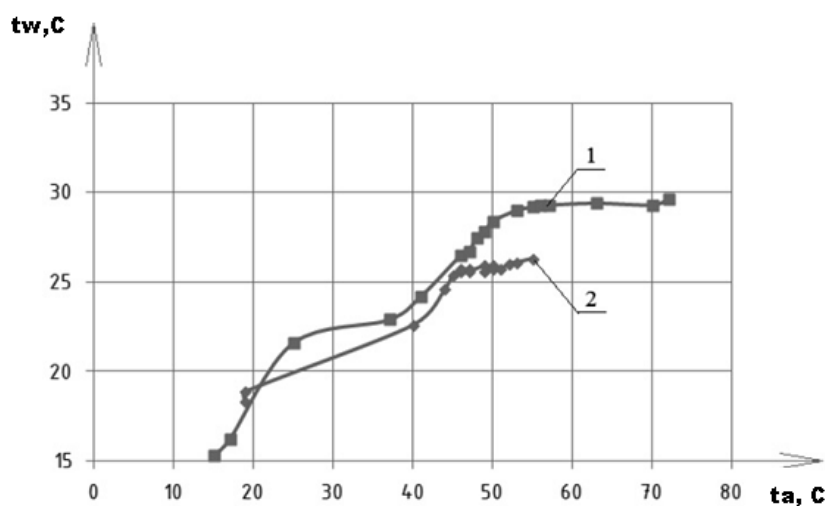


Рис. 3. Зависимость температуры на поверхности сыпучего материала t_w от температуры агента сушки t_a :
1– результаты расчета; 2 – результаты эксперимента

Возможность использования предлагаемых эмпирических выражений в практических расчетах нашло свое подтверждение при сравнении экспериментальных данных, приведенных в [11] и расчетных результатов, представленных на рис. 3.

Список источников

1. Горшков В.И. Самовозгорание веществ и материалов. М.: ВНИИПО МЧС России, 2003. 446 с.
2. Кольцов К.С., Попов Б.Г. Самовозгорание твердых веществ и материалов и его профилактика. М.: Химия, 1978. 160 с.
3. Таубкин С.И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. М.: ВНИИПО МВД России, 1998. 598 с.
4. Расследование пожаров: пособие для работников Госпожнадзора: в 2 ч. / Чирко В.Е. [и др.] М.: ВНИИПО МВД России. 1993. Ч. 1. 176 с.; Ч. 2. 132 с.
5. Аппарат для сушки дисперсных материалов в закрученном потоке теплоносителя с ИК-энергоподводом / Антипов С.Т. [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК-продукты здорового питания. 2017. №5. С. 94-97.
6. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок. Учеб. для ВУЗов. М.: Госэнергоиздат, 1962. 320 с.
7. Замалеев З.Х., Посохин В.Н., Чефанов В.М. Основы гидравлики и теплотехники: учеб. пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2014. 352 с.
8. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства: учеб. пособие. СПб.: СПбГАХИПТ, 1998. 146 с.
9. Теплофизические закономерности развития пожарной опасности на промышленных предприятиях и нефтегазовых объектах: монография / Минкин Д.Ю. [и др.]. СПб.: С.-Петербур. ун-т ГПС МЧС России, 2018. 464 с.
10. Ахмедьянова Е.Н., Редников С.Н. Математическое моделирование процесса сушки древесных отходов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 1 (2). С. 382–384.
11. Вогман Л.П., Горшков В.И., Дегтярев А.Г. Пожарная опасность элеваторов. М.: Стройиздат, 1993. 288 с.

Информация о статье: статья поступила в редакцию: 25.02.2026; принята к публикации: 27.02.2026

Информация об авторах:

Кузьмин Анатолий Алексеевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: kaa47@mail.ru, SPIN-код: 3604-7853

Романов Николай Николаевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: nik57nik@mail.ru, SPIN-код: 4828-4313

Пермяков Алексей Александрович, начальник кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: ftoorb@igps.ru, SPIN-код: 5444-3350