УДК 631.354.2:614.841.1

М. А. БОНДАРЬ, А. П. КРЕМЕНА, Н. Ф. СВИРИДЕНКО

ПОЖАР В ОБМОЛОТОЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА: МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ ВОДОЙ

Разработано методическое обеспечение решения практически важной задачи повышения пожаробезопасности эксплуатации зерноуборочных комбайнов (ЗУК) путем реализации эффективного метода подавления горения, возникшего в обмолоточном пространстве, диспергированной водой. Методическое обеспечение включает математическую модель развития пожара, позволяющую рассчитывать параметры его текущего состояния, и модель тушения в виде соотношения, связывающего параметры и характеристики пожарной нагрузки, пожара, потока диспергированной воды, подаваемой на его тушение, и времени тушения. Достоверность разработанных моделей подтверждена экспериментально, в том числе результатами тушения пожаров в обмолоточном пространстве ЗУК СК-4. Использование разработанного методического обеспечения и рекомендаций позволит обоснованно подходить к выбору параметров диспергированного потока, обеспечивающего подавление пожара в обмолоточном пространстве за заданное время с использованием возимого на ЗУК запаса воды, и создавать активные системы пожаробезопасности ЗУК, характеризующиеся эффективностью, надежностью и технологичностью.

Розроблено методичне забезпечення рішення практично важливої задачі підвищення пожежобезпечності експлуатації зернозбиральних комбайнів (ЗЗК) шляхом реалізації ефективного методу придушення горіння, що виникло в обмолотному просторі, диспергованою водою. Методичне забезпечення включає математичну модель розвитку пожежі, що дозволяє розраховувати параметри її поточного стану, і модель гасіння у вигляді співвідношення, що зв'язує параметри й характеристики пожежного навантаження, пожежі, потоку диспергованої води, що подається на її гасіння, і часу гасіння. Вірогідність розроблених моделей підтверджено експериментально, у тому числі результатами гасіння пожеж в обмолотному просторі ЗЗК СК-4. Використання розробленого методичного забезпечення та рекомендацій дозволить обґрунтовано підходити до вибору параметрів диспергованого потоку, що забезпечує придушення пожежі в обмолотному просторі за заданий час, з використанням запасу води, що возиться на ЗЗК, і створювати активні системи пожежобезпечності ЗЗК, що характеризуються ефективністю, надійністю й технологічністю.

Methodical support for solving the practically significant problem of improvements in fire safety of harvesters is developed using the efficient method for the fire suppression with dispersed water when a fire emerges in the threshing room. This methodical support includes the mathematical model of the fire development for estimating the current fire parameters and that of firefighting as a relation between the parameters and characteristics of the fire load, the fire, the dispersed water stream and the time for firefighting. The validity of the developed models is confirmed by experiments, including the results of firefighting in the threshing room of the SK-4 harvester. These methodical support and recommendations can be used to select the justified parameters of the dispersed water stream for firefighting in the threshing room in a definite time with some water storing in the harvester and to create the active systems of harvester fire safety resulting in the efficiency, the reliability and the adaptability to manufacture.

Ключевые слова: *зерноуборочный комбайн, обмолоточное пространство, грубый ворох, пожар, развитие, тушение, диспергированная вода, параметры потока.*

Пожары на зерноуборочных комбайнах (ЗУК), сопровождающиеся выходом из строя дорогостоящей техники, выгоранием значительных хлебных массивов, выгоранием плодородного слоя почв, наносят значительный народнохозяйственный ущерб.

В настоящее время проблема обеспечения надежной противопожарной защиты ЗУК превратилась в проблемный экономический и социальный фактор для агропромышленного комплекса страны.

Это обусловлено тем, что уже к 2009 г. парк ЗУК сократился до 70 % от технологически необходимого, в связи с чем возросла сезонная нагрузка на каждую машину, увеличились сроки уборки и потери зерна, которые по оценкам ученых-аграриев составляют 8 – 10 млн. тонн в год [1].

© М. А. Бондарь, А. П. Кремена, Н. Ф. Свириденко, 2016

Указанные обстоятельства, наряду с увеличением доли машин, выработавших свой ресурс [2], существенно актуализируют проблему повышения пожаробезопасности эксплуатации ЗУК, в том числе иностранного производства [3, 4].

Общим недостатком используемых и предлагаемых систем обеспечения пожаробезопасности ЗУК является их несоответствие сложности и наукоемкости комбайна и специфике условий его эксплуатации. Это предопределяет низкую результативность известных технических решений и обусловливает необходимость поиска принципиально иного подхода к решению задачи повышения пожаробезопасности эксплуатации ЗУК до уровня, соответствующего современному, и, тем более, перспективному этапу развития зерноуборочной техники.

Фактором, сдерживающим разработку эффективных мероприятий по повышению пожаробезопасности эксплуатации ЗУК, является отсутствие адекватных моделей для прогнозирования основных характеристик наиболее опасных по возможным последствиям пожаров в процессе их развития с учетом специфики горючих веществ, характеристик очага горения и т. п.

Вышеизложенное предопределяет необходимость разработки математических моделей наиболее характерных для ЗУК видов пожаров как основы для создания эффективных методов и средств их тушения.

При разработке математических моделей пожаров на ЗУК целесообразно использовать моделирование на основе усредненных параметров газовой среды в зоне пожара. Этот метод дает возможность получать удовлетворительные, с практической точки зрения, данные о характеристиках пожаров.

Принимая во внимание состав и специфику находящихся на ЗУК горючих веществ, особенности конструкции комбайна и технологического процесса уборки урожая, можно выделить в качестве наиболее опасных по возможным негативным последствиям следующие виды пожаров [2]:

– пожар на поверхности ЗУК в местах скапливания соломистых горючих материалов (половы, сбоины и т. п.), в том числе пропитанных горючими жидкостями при наличии их проливов и утечек;

– пожар пролива горючей жидкости, образующегося при разрушении емкостей для их хранения или соответствующих магистралей;

– пожар в обмолоточном пространстве (ОП), характеризующемся значительным количеством пожарной нагрузки (ПН) в виде равномерно распределенного вороха и малой проемностью.

Первые два вида пожаров возникают на наружных поверхностях ЗУК, в связи с чем обнаруживаются на самом начальном этапе своего развития и, как правило, успешно подавляются с использованием находящихся на борту первичных средств тушения (огнетушители, кошмы и т. п.) [4, 5].

Наибольшую опасность представляет пожар, возникающий в обмолоточном пространстве. Это обусловлено тем, что обмолоточное пространство современного ЗУК представляет собой замкнутый объем ($V_{\text{оп}} \approx 9-10\ \text{м}^3$), ограниченный металлическими поверхностями с незначительной проемностью (< 25%), в котором горючий материал в виде зерно-соломистой массы распределяется в процессе обмолота практически равномерно на площади $S_{\text{пн}} = 6 \div 7\ \text{м}^2$. Это обусловливает быстрое, с линейной скоростью $V_{\text{о}} < 0{,}02-0{,}06\ \text{м/с}$ [6], распространение возникшего по той или иной причине горения по всей пожарной нагрузке с последующим переходом пожара к моменту его обнаружения в развитый объемный [7], который не может быть подавлен теми первичными средствами пожаротушения, которыми комплектуется каждый ЗУК.

Существенный прогресс в этом направлении может быть достигнут путем создания активной системы тушения пожара в ОП, характеризующейся мобильностью, эксплуатационной надежностью и высокой полнотой использования пожаротушащего потенциала ограниченного количества возимого на ЗУК пожаротушащего средства. Успешное решение такой задачи предполагает необходимость разработки научно-методического обеспечения, включающего математические модели пожара в обмолоточном пространстве ЗУК и его тушения выбранным пожаротушащим средством как условия перехода к качественно новому этапу создания систем обеспечения пожаробезопасности (СПБ) эксплуатации ЗУК.

При построении математической модели пожара в ОП примем следующие допущения:

– происходит полное сгорание пожарной нагрузки, находящейся в ОП;

– теплота сгорания соломистых горючих материалов равна теплоте сгорания стандартной древесины;

– температура газовой среды в ОП в процессе развития пожара распределена равномерно;

– для всей внутренней поверхности ОП может быть использовано единое значение коэффициента поверхностной теплоотдачи от газовой среды.

Пожар в ОП проходит в своем развитии, как и любой другой пожар, три стадии:

– начальную стадию, продолжающуюся вплоть до полного охвата ОП пламенем;

– стадию полностью развитого пожара, когда пламя охватывает весь объем ОП, при этом скорость сгорания, тепловыделение и температура газового объема максимальны;

– стадию затухания.

Продолжительность начальной стадии $^{2}{}_{\text{нсп}}$ составляет несколько десятков секунд и может быть оценена по соотношению [7]

$$\tau_{\text{нсп}} = \frac{1}{V_0}\sqrt{\frac{S_{\text{пн}}}{\pi}}\text{, с.} \qquad (1)$$

Масса пожарной нагрузки, возгорание которой обеспечивает переход возникшего в ОП пожара в объемный, составляет [7]:

$$G_{\text{пн}} \geq \pi \cdot \frac{\dot{m}_{\text{сг}}}{S_{\text{пн}}} \cdot V_0^2 \cdot \tau_{\text{нсп}}^3 \text{, кг,} \qquad (2)$$

где $\dot{m}_{\text{сг}}$ – скорость выгорания пожарной нагрузки, кг/с.

Полному охвату пламенем ОП, т. е. началу развитой стадии объемного пожара, соответствует величина теплового потока излучения пламени на уровне пола ОП $q_{\Sigma} \geq 20$ кВт/м^2, при этом температура потолка достигает (для характерной геометрии ОП) значения $t_n \approx 500\,^0$С, а интенсивность тепловыделения составляет [8]

$$\dot{Q}_{\text{нсп}} = 600\left(\frac{\lambda}{\delta_{\text{ст}}} \cdot F_{\Sigma}^{\text{оп}} \cdot F_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}^{0,5}\right)^{0,5}, \text{ кДж/с,} \qquad (3)$$

где λ – теплопроводность конструкционного материала потолка ОП, Вт/(м·К); $\delta_{\text{ст}}$ – толщина потолка, м; $F_{\Sigma}^{\text{оп}}$ – суммарная площадь ограничивающих ОП поверхностей, м^2; $F_{\text{п}}$ – площадь вентиляционного проема, м^2; $h_{\text{п}}$ – высота вентиляционного проема, м; $F_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}^{0,5}$ – параметр вентиляции.

При этом скорость выгорания пожарной нагрузки определится выражением

$$\dot{m}_{\text{сг}} = \frac{\dot{Q}_{\text{нсп}}}{Q_{\text{д}}} = 0{,}0435\left(\frac{\lambda}{\delta_{\text{ст}}} \cdot F_{\Sigma}^{\text{оп}} \cdot F_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}^{0,5}\right)^{0,5}, \text{ кг/с,} \qquad (4)$$

где $Q_{\text{д}} = 13800$ кДж/кг – теплота сгорания пожарной нагрузки (стандартной древесины) [8].

При наличии в ограждении нескольких вентиляционных проемов параметр вентиляции может быть определен как

$$\left(F_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}^{0,5}\right)_{\Sigma} = \sum_{i} F_{\text{пi}} \cdot \bar{h}_{\text{п}}^{0,5}, \qquad (5)$$

где $\bar{h}_{\text{п}} = \dfrac{\sum_{i} F_{\text{пi}} \cdot h_{\text{п}}^{0,5}}{\sum_{i} F_{\text{пi}}}$, $i = 1,\ldots,n$ – количество вентиляционных проемов.

При проведении оценочных расчетов можно использовать также приведенные в [8] соотношения для определения скорости выгорания пожарной нагрузки, соответствующей полному охвату пламенем ОП, т. е. окончанию начальной и началу развитой стадии пожара:

– для пожара, регулируемого вентиляцией (ПРВ)

$$\dot{m}_{\text{сг}} = 0{,}05 + 0{,}0333 F_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}^{0,5}, \text{ кг/с;} \qquad (6)$$

– для пожара, регулируемого нагрузкой (ПРН)

$$\dot{m}_{\text{сг}} \geq 0{,}08, \text{ кг/с.} \qquad (7)$$

Вид пожара, протекающего в развитой стадии в ОП, определяется соотношением между параметром вентиляции и площадью поверхности горения пожарной нагрузки [5].

При

$$\frac{\rho_m \cdot F_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}^{0,5}}{F_{\text{пг}}} < 0{,}075, \qquad (8)$$

где ρ_m – плотность газа в ОП, кг/м^3; $F_{\text{пг}}$ – площадь поверхности горения, м^2, в ОП развивается пожар, регулируемый вентиляцией, а при

$$\frac{\rho_m \cdot F_{п} \cdot h_{п}^{0,5}}{F_{пг}} > 0{,}0923 \qquad (9)$$

в ОП развивается пожар, регулируемый пожарной нагрузкой.

Площадь поверхности горения может быть оценена из следующих соображений.

Суммарная длина стеблей соломы в одном погонном метре скошенного валка составляет ~ 700 – 800 м [9].

Общая длина стеблей в ОП

$$L_{\Sigma}^{c} \cong 750 \cdot l_{оп}\text{, м,} \qquad (10)$$

где $l_{оп}$ – длина ОП, м, а площадь их поверхности

$$F_{пг} \cong 2{,}4 \cdot 10^{3} \cdot l_{оп} \cdot d_{ст}\text{, м}^{2}, \qquad (11)$$

где $d_{ст}$ – диаметр стебля соломы, м.

Соотношения (8) – (11) позволяют определить вид пожара, развивающегося в ОП в зависимости от конструктивных параметров ЗУК и характеристик стеблей соломы.

Отметим, что ввиду малой проемности современных ЗУК (<25 %) в них развивается, как правило, пожар, регулируемый вентиляцией.

При горении целлюлозосодержащих продуктов максимальная скорость их выгорания определяется выражением [7, 8]

$$\dot{m}_{сг}^{\max} = 0{,}092 \cdot F_{п} \cdot h_{п}^{0,5}\text{, кг/с.} \qquad (12)$$

Текущая скорость выгорания в момент времени τ определяется соотношением

$$\dot{m}_{сг\tau} = \eta_{т}(\tau_{п}) \cdot \dot{m}_{сг}^{\max}\text{, кг/с,} \qquad (13)$$

где $\eta_{т}(\tau_{п})$ – коэффициент интенсивности тепловыделения; $\tau_{п}$ – продолжительность пожара до момента наступления затухающей стадии, когда скорость выгорания начинает уменьшаться

$$\tau_{п} = 10^{-5}\,\frac{G_{пн} \cdot Q_{д}}{\left(F_{п} \cdot h_{п}^{0,5}\right)_{\Sigma}}\text{, мин.} \qquad (14)$$

Зависимость коэффициента интенсивности тепловыделения от времени τ для характерных для наиболее распространенных классов ЗУК значений массы пожарной нагрузки $G_{пн}$, проемности и $\tau_{п}$ в обмолоточном пространстве ЗУК может быть представлена в виде удобных для расчета кусочных функций [7]:

– для $\tau_{п}$ =10 мин:

$$\eta_{п} = 0{,}173 \cdot \tau, \quad \tau \le 5{,}78 \text{ мин;}$$
$$\eta_{п} = 1{,}0, \quad 5{,}78 < \tau \le 7{,}05 \text{ мин;}$$
$$\eta_{п} = 0{,}5 + 0{,}085(12{,}94 - \tau), \quad 7{,}05 < \tau \le 12{,}94 \text{ мин;}$$
$$\eta_{п} = 0{,}2 + 0{,}0319(22{,}35 - \tau), \quad 12{,}94 < \tau \le 22{,}35 \text{ мин;}$$

– для $\tau_п = 24$ мин: (15)

$$\eta_п = 0{,}173 \cdot \tau, \quad \tau \le 3{,}45 \text{ мин};$$
$$\eta_п = 0{,}6 + 0{,}053(\tau - 3{,}45), \quad 3{,}45 < \tau \le 7{,}8 \text{ мин};$$
$$\eta_п = 0{,}83 + 0{,}028(\tau - 7{,}8), \quad 7{,}8 < \tau \le 13{,}8 \text{ мин};$$
$$\eta_п = 1{,}0, \quad 13{,}8 < \tau \le 20 \text{ мин};$$
$$\eta_п = 0{,}5 + 0{,}035(34{,}1 - \tau), \quad 20 < \tau \le 34{,}1 \text{ мин}.$$

Интенсивность тепловыделения при пожаре определяется выражением

$$\dot{Q}(\tau) = \eta_{сг} \cdot \dot{m}_{сг\tau} \cdot Q_д, \text{ кВт}, \quad (16)$$

где $\eta_{сг}$ – коэффициент полноты сгорания при ПРВ.

Коэффициент полноты сгорания при ПРВ в развитой его стадии при горении целлюлозосодержащей пожарной нагрузки зависит от концентрации кислорода в ОП, и его значения аппроксимируются зависимостью [7]

$$\eta_{сг} = 0{,}63 + 0{,}2 \cdot X_{1m}, \quad (17)$$

где X_{1m} – среднеобъемная концентрация кислорода в ОП, выраженная в долях единицы.

Для определения значения X_{1m} необходимо сопоставлять расходы продуктов сгорания, покидающих ОП в процессе пожара, и приходящего извне воздуха, зависящие от расположения плоскости равных давлений (нейтральной плоскости).

Многочисленными экспериментами показано [7, 8], что распределение по высоте давления в ОП при объемном пожаре на всех его стадиях может быть принято линейным. При этом высота расположения плоскости равных давлений (нейтральной плоскости) над очагом горения определяется формулой

$$Y_{нп} = \frac{H_{ОП}}{2}\left(1 - \frac{2\Delta P_m}{\rho_a g H_{ОП}} \cdot \frac{T_m}{T_m - T_{om}}\right), \quad (18)$$

где $H_{ОП}$ – высота ОП, м; ΔP_m – среднее избыточное давление в ОП, Па; T_m – среднеобъемная температура газа в ОП, К; T_{om} – температура газа в ОП перед пожаром, К; ρ_a – плотность наружного воздуха, кг/м^3, $g = 9{,}81$ м/с^2.

Характеристики газовой среды в ОП, где развивается объемный пожар, определяются соотношениями:

$$P_m = \rho_m \frac{RT_m}{\mu_{пс}}, \text{ Па}, \quad (19)$$

где R – универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К); $\mu_{пс}$ – молекулярная масса продуктов сгорания пожарной нагрузки, кг/кмоль [7, 8];

$$\Delta P_m = P_m - P_a, \text{ Па}, \quad (20)$$

где P_a – давление в окружающей среде, Па.

В соответствии с высотой расположения нейтральной плоскости в ОП вентиляционные проемы на ограждающих поверхностях делятся на три вида:

– проемы, расположенные ниже нейтральной плоскости, через которые поступает воздух из окружающей среды в ОП;

– проемы, расположенные выше нейтральной плоскости, через которые продукты сгорания (ПС) покидают ОП;

– проемы, разделенные нейтральной плоскостью на две части, через которые осуществляется одновременный выход продуктов сгорания из ОП и поступление в него воздуха.

Выражения для определения расходов воздуха и ПС через соответствующие вентиляционные проемы имеют вид [8]:

$$\dot{m}_{\text{возд}} = \frac{2}{3} \cdot \varsigma_{\text{в}} \left(F_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}^{0,5}\right)_{\Sigma\text{вх}} \cdot \rho_0 \left(2g\,\frac{\rho_0 - \rho_m}{\rho_0}\right) + \dot{m}_{\text{ст.ист}}^{\text{в}}, \text{ кг/с}, \tag{21}$$

$$\dot{m}_{\text{пс}} = \frac{2}{3} \cdot \varsigma_{\text{пс}} \left(F_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}^{0,5}\right)_{\Sigma\text{вых}} \cdot \rho_m \left(2g\,\frac{\rho_0 - \rho_m}{\rho_0}\right), \text{ кг/с}, \tag{22}$$

где ς – расходный коэффициент вентиляционных проемов, ($\varsigma_{\text{в}} = \varsigma_{\text{пс}} \approx 0{,}8$ [4]); $\left(F_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}^{0,5}\right)_{\Sigma\text{вх}}$ – суммарный параметр вентиляции проемов, работающих на подачу воздуха в ОП; $\left(F_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}^{0,5}\right)_{\Sigma\text{вых}}$ – суммарный параметр вентиляции проемов, работающих на выход ПС из ОП; $\dot{m}_{\text{ст.ист}}^{\text{в}}$ – расход воздуха, подаваемого в ОП сторонним источником, например работающим вентилятором очистки и т. п.

По полученным значениям расходов ПС и воздуха через вентиляционные проемы по (17) и (16) уточняются коэффициенты полноты сгорания, интенсивность тепловыделения и параметры газа в ОП в процессе развития в нем объемного пожара.

Изменение среднеобъемной T_m и максимальной $T_m^{\max}$ (при $\tau = \tau_{\text{п}}$) температур газовой среды во времени при ПРВ, развивающемся в ОП, определяется с погрешностью < 10 % соотношениями, полученными при исследовании температурного режима газовой среды при пожарах, регулируемых вентиляцией, происходивших в помещениях объемом 1,73 – 216 м^3 с отношением площадей вентиляционных проемов к площади пола П = 4,5 – 25 % и удельной пожарной нагрузкой в виде древесных отходов влажностью 16 – 18 %, изменяющейся в диапазоне $q_{\text{пн}} = 0{,}8 - 14$ кг/м^2 [7], которые имеют вид

$$\frac{T_m - T_0}{T_m^{\max} - T_0} = 115{,}6 \left(\frac{2}{2_{\text{п}}}\right)^{4,75} \cdot e^{-4,75\frac{2}{2_{\text{п}}}}, \tag{23}$$

$$T_m^{\max} = T_0 + 320 q_{\text{пн}}^{0,528} (1{,}08 - 9 \cdot 10^{-3} \cdot \text{П}), \tag{24}$$

где T_0 – начальная температура газовой среды в ОП.

Эти соотношения могут быть использованы для определения времени подачи управляющего сигнала на включение системы тушения пожара в ОП по срабатыванию тепловых пожарных извещателей [10] и текущих параметров пожара на этот момент времени: скорости выгорания (13), интенсивности тепловыделения (16) и коэффициента теплоотдачи α от газа к ограничивающим ОП поверхностям.

Выражение для определения α имеет вид [7]

$$\alpha = 11{,}63 \cdot e^{0{,}0023(T_m - T_0)}. \tag{25}$$

В целом соотношения (1) – (25) представляют собой математическую модель ПРВ, развивающегося в обмолоточном пространстве ЗУК, и позволяют определять его основные параметры на момент начала подачи в зону горения огнетушащего средства, в качестве которого целесообразно использовать диспергированную воду, характеризующуюся высокой пожаротушащей эффективностью и экологичностью.

Следует, однако, иметь в виду, что высокая пожаротушащая эффективность диспергированной воды достигается в том случае, когда параметры ее потока (интенсивность подачи, характеристики дисперсности и скорость движения потока) согласованы с видом пожарной нагрузки и параметрами пожара. Это обусловлено тем, что каждому виду пожара соответствует вполне определенный диапазон размеров капель диспергированной воды и скорость их движения, определяющие не только прогрев капель на пути движения к пожарной нагрузке и интенсивность смачивания грубого вороха в ОП, но и интенсивность подачи, обеспечивающую подавление горения за минимальное время при наименьшем расходе воды.

Для построения математической модели (ММ) процесса тушения пожара в ОП потоком диспергированной воды целесообразно использовать результаты экспериментального определения времени подавления горения волокнистой пожарной нагрузки в широком диапазоне изменения ее удельной величины (кг/м^2), времени полного выгорания ($\tau_{\Pi\Sigma}$) при свободном горении, интенсивностей выделения тепла ($\dot{Q}_{\text{выд}}$, кВт) и его отвода испаряющимся на поверхности ПН диспергированным потоком воды ($\dot{Q}_{\text{отв}}$, кВт) [11].

Правомерность использования этих результатов обусловлена методикой проведения экспериментов, акцентированной на подавление горения за счет охлаждения ПН полностью испаряющимися на ее поверхности каплями воды.

Обработкой указанных экспериментальных данных в [12] получена регрессионная зависимость, адекватно ($R^2 = 0{,}97$) описывающая процесс тушения в виде соотношения

$$\tau_T = 0{,}0124 \cdot \tau_{\Pi\Sigma} \left(\frac{\dot{Q}_{\text{отв}}}{\dot{Q}_{\text{выд}}} \right)^{1{,}204}, \tag{26}$$

где τ_T – время тушения, мин; $\tau_{\Pi\Sigma}$ – продолжительность пожара в ОП при отсутствии тушения, мин.

В (26) интенсивность отвода тепла от горящей в ОП пожарной нагрузки определяется выражением

$$\dot{Q}_{\text{отв}} = I \cdot r \cdot S_{\Pi}, \tag{27}$$

где I – интенсивность подачи диспергированной воды в ОП, кг/(с·м^2); r – теплота испарения, кДж/кг; $S_{\text{пн}}$ – площадь поверхности, на которой лежит грубый ворох, м^2, а его интенсивность выделения тепла при пожаре в ОП –

выражениями (16), (12) – (15), (17).

Учитывая, что $Q_{д} = 13800$ кДж/кг, а полная продолжительность пожара при свободном выгорании всей ПН в ОП составляет $^{2}{}_{п\Sigma}$ = (2,0 – 3,5) $\tau_{п}$, соотношение (26) после указанных подстановок и соответствующих преобразований может быть приведено к виду, определяющему интенсивность подачи диспергированной воды, обеспечивающей подавление горения в ОП за время τ_{T}, мин,

$$I = 0,06 K_{З} \frac{\left(F \cdot h_{п}^{0,5}\right)_{\Sigma}^{0,17}}{S_{П}} \cdot \eta_{T}(\tau_{п})(0,69 + 0,2 X_{1m}) \cdot \left(\frac{G_{пн}}{\tau_{T}}\right)^{0,83}, \text{ кг/(с·м}^{2}\text{)}, \quad (28)$$

где $K_{З}$ – коэффициент запаса, назначаемый по рекомендациям [13] или по результатам экспериментов.

Соотношение (28), определяющее интенсивность подачи воды, обеспечивающую подавление горения в ОП за время τ_{T}, получено для случая полного испарения капель диспергированного потока на поверхности горящей ПН, соответствующего максимальной интенсивности ее охлаждения. Это, в свою очередь, означает, что скорость движения диспергированного потока, подаваемого в ОП, и диаметр его капель должны выбираться из условия, что время движения капель к ПН не должно превышать время, необходимое для их прогрева до температуры кипения воды.

Время прогрева капли воды диаметром $d_{к}$, движущейся в газовой среде ОП, до температуры кипения воды определяется выражением [14]

$$\tau_{пр} = \frac{d_{к}^{2} \cdot c_{рв} \cdot \rho_{в}}{12 \lambda_{г}} \cdot \ln \frac{T_{m} - T_{ов}}{373 - T_{ов}}, \text{ с}, \quad (29)$$

где $c_{рв}$ – теплоемкость воды, кДж/(кг·К); $\rho_{в}$ – плотность воды, кг/м^{3}; $\lambda_{г}$ – теплопроводность газа в ОП, кДж/(с·м·К); $T_{ов}$ – начальная температура воды в капле, К.

Время перемещения капли от входа в ОП до поверхности ПН

$$\tau_{пер} = \frac{L_{max}}{V_{к}}, \text{ с}, \quad (30)$$

где L_{max} – максимальное расстояние от входа диспергированного потока в ОП до ПН, м; $V_{к}$ – скорость движения капли, м/с.

Из (29), (30) следует, что начальные параметры капель, обеспечивающие их полное испарение на поверхности элементов грузового вороха в ОП, должны удовлетворять условию $\tau_{пр} \geq \tau_{пер}$, т. е.

$$d_{к_{0}}^{2} \cdot V_{к_{0}} \geq 0,029 \cdot \frac{L_{max} \cdot \lambda_{г}}{\ln \frac{T_{m} - T_{ов}}{T_{m} - 373}}. \quad (31)$$

Возможность получения высокоскоростного потока диспергированной жидкости с указанными характеристиками обеспечивает гидроимпульсное диспергирование, позволяющее управлять дисперсностью и интенсивностью распада струи (шириной факела) при фиксированном расходе воды и установленном нагнетательном напоре путем изменения частоты генерируемых пульсаций давления в потоке жидкости [15]. Кроме того, геометрические характеристики факела гидроимпульсной струи позволяют осуществлять единовременное накрытие всей зоны пожара в ОП минимальным количеством отдельных потоков диспергированной пожаротушащей жидкости (воды).

Гидроимпульсное диспергирование является комбинацией гидравлического и импульсного способов, при котором пульсации давлений в потоке, наиболее существенно влияющие на дисперсность, параметры и характеристики его факела, генерируются за счет энергии самого потока при фиксированном питательном напоре ($H_п$).

Соотношения для определения основных параметров и характеристик факела гидроимпульсной струи в зависимости от частоты пульсаций давления имеют вид [16]:

– медианный диаметр капель

$$d_м = 0{,}05kf\,\frac{(1-kf)H_п^{0,5}H_и^{0,5}+kfH_и}{\left[(1-kf)H_п-kfH_и\right]^2}+0{,}01\frac{(1-kf)H_п^{0,5}-kfH_и^{0,5}}{(1-kf)H_п+kfH_и},\ м, \qquad (32)$$

где f – частота, Гц; $H_п$ – питательный напор, м; $H_и$ – напор в импульсе, м; k – коэффициент заполнения импульса (k = 0,0025);

– начальный диаметр факела

$$d_{ф_0} = 4{,}2\sqrt[3]{d_0^2 H_и^{0,5}\cdot k},\ м, \qquad (33)$$

где d_0 – диаметр выходного отверстия форсунки, м;

– угол раскрытия факела

$$\beta_ф \approx 1{,}1\bar{\beta}_{стр},\ град, \qquad (34)$$

где $\bar{\beta}_{стр}$ – угол раскрытия сплошной струи, град;

– начальная скорость движения капель

$$V_{к_0} = 4{,}2\frac{kfH_п+(1-kf)H_и}{kfH_п^{0,5}+(1-kf)H_и^{0,5}},\ м/с; \qquad (35)$$

– дальнобойность струи

$$L_{max} \approx 0{,}9\bar{L}_{max},\ м, \qquad (36)$$

где $\bar{L}_{max}$ – дальнобойность сплошной струи, соответствующая заданным значениям $H_п$ и d_0, м [17];

– накрываемая площадь

$$S_н = L_{max}\left(d_{ф_0}+L_{max}\,\mathrm{tg}\frac{\beta_ф}{2}\right),\ м^2; \qquad (37)$$

– интенсивность подачи

$$I = 4\cdot 10^{-3}\,\frac{d_0^2 H_п^{0,5}}{S},\ кг/(с\cdot м^2). \qquad (38)$$

Для оценки эффективности предлагаемого подхода к решению задачи повышения пожаробезопасности эксплуатации ЗУК были проведены эксперименты по подавлению горения соломы в обмолоточном пространстве комбайна СК-4 с площадью соломотряса, на котором укладывалась пожарная нагрузка, $S_{п}$ = 6 м^2 и показателем проемности ($F_{п} \cdot h_{п}^{0,5}$) = 1,95. Масса пожарной нагрузки, загружавшейся в ОП, составляла $G_{п}$ = 35 кг.

Тушение пожара осуществлялось по сигналу от датчика извещателя пожара DS1820, подававшего при достижении температурой газовой среды в ОП значения $T_m \geq 400$ К команду на включение системы тушения пожара потоком диспергированной воды с параметрами $d_{кп} \approx 1{,}5$ мм, $V_{к_0} \approx 45$ м/с, соответствующими полному испарению капель на ПН.

Указанные параметры гидроимпульсного потока обеспечивались устройством [15] при $H_{п}$ = 80 м, $H_{и}$ = 300 м и f = 35 Гц. Изменение интенсивности подачи воды в зону пожара осуществлялось изменением количества подающих воду в ОП форсунок.

Результаты огневых экспериментов подтвердили эффективность предлагаемого подхода: развитый пожар в ОП ЗУК был подавлен за 3 мин 45 сек при интенсивности подачи воды $I = 0{,}05$ кг/(с·м^2) и за 2 мин при подаче воды с интенсивностью $I = 0{,}075$ кг/(с·м^2). Суммарный расход воды на тушение не превысил 60 – 70 кг. Расчетные значения пожаротушащей интенсивности подачи воды на тушение пожара в ОП, определенные по (28), составили 0,034 и 0,06 кг/(с·м^2) соответственно, что позволяет рекомендовать применение соотношения (28) с коэффициентом запаса $K_3 = 1{,}5$.

Таким образом, предложенный подход, разработанное научно-методическое обеспечение и средства его реализации могут быть, при соответствующем выборе их параметров и характеристик, рациональным решением технически сложной, разноплановой и актуальной задачи повышения пожаробезопасности эксплуатации зерноуборочных комбайнов с использованием возимого на комбайне запаса воды [18].

1. *Бондар М.* Степови кораблі - на мілини / *М. Бондар* // Сільські вісті. – 2009. – № 143 (18429). – С. 3.
2. *Бондарь М.* Повышение пожаробезопасности эксплуатации зерноуборочного комбайна: концепция и пути ее реализации / *М. Бондарь, А. Заволока, Н. Свириденко* // Техніка і технології АПК. – 2010. – № 8 (11). – С. 12 – 16.
3. *Козлов Д.* Пожежна небезпека зернозбиральних комбайнів іноземного виробництва / *Д. Козлов, Ю. Смирнов* // Бюлетень пожежної безпеки. – 2001. – № 1 (3). – С. 49 – 51.
4. Внимание! Горят комбайны // Зарубежное аграрное обозрение. – 1997. – № 8. – С. 3.
5. Flame Arrester Evolution for E-Diesel Fuel Tanks : report NREL / SR-540-34301 / Southwest Research Institute / – San Antonio, Texas, 2003. – 27 p.
6. *Григорович М. Л.* Практикум по решению пожарно-технических задач / *М. Л. Григорович, В. К. Воробьев, Ю. Г. Тумарович.* – Минск : Дизайн ПРО, 1997. – 176 с.
7. Термогазодинамика пожаров в помещениях / *В. М. Астапенко, Ю. А. Комаров, И. С. Молчадский, А. Н. Шевлянов.* – М. : Стройиздат, 1988. – 448 с.
8. *Драйздейл Д.* Введение в динамику пожаров / *Д. Драйздейл.* – М. : Стройиздат, 1990. – 424 с.
9. *Портнов М. Н.* Зерновые комбайны / *М. Н. Портнов.* – М. : Высшая школа, 1971. – 256 с.
10. *Паршуто Н.* Интеллектуальные системы пожарной безопасности / *Н. Паршуто* // Бюлетень пожежної безпеки. – 2000. – № 1. – С. 56 – 57.
11. *Повзик Я. С.* Зависимость эффективности тушения электрокабелей тонкораспыленной водой от соотношения интенсивностей теплоотвода и тепловыделения / *Я. С. Повзик, В. Е. Макаров, Ю. Г. Журавлев* // Динамика пожаров и их тушения : Сб. Науч. Трудов ВИПТШ МВД СССР. – М., 1987. – С. 60 – 69.
12. *Кремена А. П.* Определение пожаротушащей интенсивности полидисперсного потока жидкости / *А. П. Кремена* // Теория и практика металлургии. – 2003. – № 4. – С. 63 – 68.
13. *Иванников В. П.* Справочник руководителя тушения пожара / *В. П. Иванников, П. П. Клюс.* – М. : Стройиздат, 1987. – 288 с.

14. Основы практической теории горения / Под ред. *В. В. Померанцева.* – Л. : Энергия, 1973. – 264 с.
15. Патент на изобретение 2140333 РФ, МПК B05B 1/08. Способ и устройство для получения струи жидкости с управляемой дисперсностью капель / *Свириденко Н. Ф., Нода А. А.* и др. : заявители и патентообладатели *Свириденко Н. Ф., Нода А. А.* ; заявл. 24.09.97, опубл. 27.10.99, Бюл. № 30.
16. *Бабенко В. С.* Гидроимпульсная струя: теория и характеристики диспергированного потока / *В. С. Бабенко, А. П. Кремена* // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 5 / 7 (65). – С. 48 – 54.
17. *Вильнер Я. М.* Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / *Я. М. Вильнер, Я. Т. Ковалев, Б. Б. Некрасов.* – Минск : Вышейш. школа, 1976. – 416 с.
18. Патент на винахід № 27645UA, МПК A01D41/12, Зернозбиральний комбайн / *Бондар М .А., Бабенко В. С., Свириденко М. Ф.* ; заявл. 30.04.98, опубл. 15.09.00, Бюл. № 4.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепропетровск

Получено 25.01.2016,
в окончательном варианте 23.02.2016

Государственное предприятие
«Конструкторское бюро
«Южное» им. М. К. Янгеля»,
Днепропетровск