Численное моделирование обратного конического пламени

А. И. Крикунова[1,2]
[1] Московский физико-технический институт (государственный университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный 141701, Россия
[2] Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: krikunovaai@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2018 г.

Аннотация. Работа посвящена численному моделированию процессов горения при помощи программного пакета FlowVision. Рассматривалось обратное коническое пламя, которое формировалось путем стабилизации нормального конического пламени внешним стабилизатором — тонким цилиндром (проволокой), размещенным перпендикулярно основному потоку. При использовании такого типа стабилизатора пламя принимает форму V или M в зависимости от совокупности факторов: скорости потока, коэффициента избытка горючего, гравитационных сил. Результаты численного моделирования показывают соответствие геометрии факела с экспериментальными данными. Проведенные расчеты показали возможность использования численного моделирования на основе пакета FlowVision для исследования динамики пламени сложной геометрической формы. https://doi.org/10.33849/2018119

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос стабилизации пламени и влияния различных внешних факторов на устойчивость пламени является важным с точки зрения фундаментальных вопросов и не менее актуальным в вопросах практического применения [1–3]. Устойчивость пламени может быть предсказана и описана на основании знаний о природе процессов, происходящих при горении. Знание условий устойчивого горения и условий, приводящих к потере устойчивости горения, т.е. погасанию, срывам и уносам пламени, позволяет создавать конструкции газотурбинных двигателей максимальной эффективности, форсажных камер сгорания, а также обеспечивать высокоэффективные режимы работы промышленных котельных установок.

Суть стабилизации пламени заключается в расширении диапазонов скорости потока и коэффициента избытка горючего (для предварительно перемешанных смесей горючего и окислителя), при которых будет существовать устойчивое пламя (особенно важно для практического применения расширение в область бедных смесей). Один из эффективных методов стабилизации заключается в создании возвратной вихревой зоны, в которой происходит задержка горячих продуктов сгорания, которые таким образом подогревают реагенты, упрощая воспламенение, и соответственно стабилизируя процесс горения [4–6]. Примером такого способа расширения пределов устойчивого горения является использование в качестве стабилизирующего тела тонкого цилиндра (проволоки), установленного поперек потока горючей смеси. В работе [7] экспериментально была показана эффективность использования тонкого цилиндра для стабилизации открытого метано-воздушного пламени в широком диапазоне коэффициента избытка горючего. Потребность в рассмотрении при проектировании конкретных технических устройств большого количества вариантов реализации стабилизаторов приводит к необходимости применять для этого аппарат методов вычислительной гидродинамики [8, 9].

В настоящей работе представлено численное моделирование метано-воздушного пламени, стабилизированное внешним цилиндрическим стабилизатором. Показана возможность получения результатов, совпадающих с экспериментальными данными. Дальнейшая работа будет посвящена детальной оценке основных характеристик пламени, стабилизированных таким образом, изучению влияния характеристик стабилизатора. Параметры анализируемого эксперимента описаны в [7]. Геометрические параметры расчетной модели сопла и стабилизатора соответствовала экспериментальной.

2. ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Подробное численное моделирование проводилось методом конечных элементов при помощи программного комплекса FlowVision [10]. Поток формировался в горелке, которая представляла собой сопло, позволяющее получить прямоугольный профиль скорости на выходе. Выходной диаметр сопла составлял 15 мм. На расстоянии 3 мм от входа, перпендикулярно потоку устанавливался тонкий цилиндрический стабилизатор диаметром 2 мм. Его края были достаточно удалены от оси сопла, чтобы не вносить нежелательные возмущения в поток. Область расчета выбиралась достаточно большой, чтобы избежать влияния стенок на исследуемые процессы. Она представляла собой цилиндр высотой 130 мм и диаметром 55 мм.

Моделировался нестационарный по времени процесс продолжительностью 0.25 с. Моделировалось течение трёх веществ: воздуха, метана, и газовой смеси продуктов сгорания метана и воздуха [11, 12]. На входе в сопло устанавливалась массовая скорость 0.21 кг/(м$^{-2}$ с), начальная температура 298 °C, коэффициент избытка горючего в смеси 0.055 и 0.04 для $\varphi = 1.0$ и $\varphi = 0.7$ соответственно (φ рассчитывалось как отношение мольной доли горючего в эксперименте к этой величине в стехиометрической смеси).

Для обеспечения максимально схожих условий с экспериментами расчетная область была заполнена воздухом с температурой и давлением, соответствующими н.у. Геометрическая модель расчетной области с указанием типов граничных условий представлена на рисунке 1. Стенки сопла, стабилизатора, нижняя и боковая границы расчетной области представляли собой твердую адиабатическую стенку без проскальзывания.

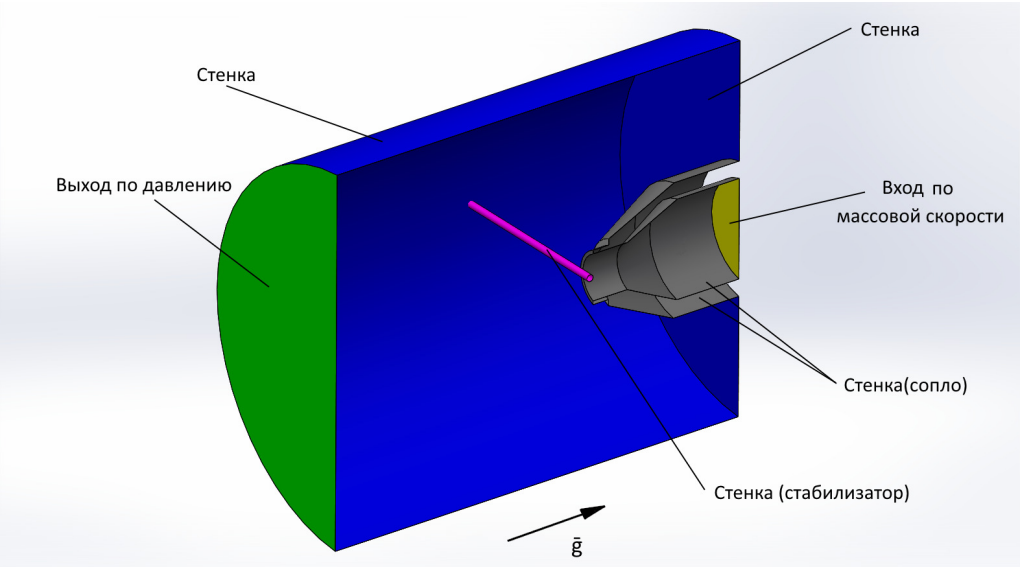

Рисунок 1. Расчетная область.

Верхняя границы расчетной области задавалась как свободный выход по давлению, соответствующему н.у. Сила тяжести направлена противоположно течению в сопле. Расчетная область равномерно разбивалась сеткой на $21 \times 16 \times 16$ ячеек. Для разрешения резких градиентов переменных поля использовалась пристеночная аппроксимация сетки (вплоть до 6 порядка) на стенках сопла и стабилизатора, аппроксимация в областях за стабилизатором, около края горелки, в зоне протекания реакций. В итоге расчетная сетка состояла из ≈ 2.6 млн. ячеек. Моделировалась полная система уравнений Навье-Стокса для вязкого сжимаемого газа. Решение проводилось с использованием модели RANS $k-\omega$ SST для всей расчетной области на протяжении всего расчетного времени. Уравнения состояния компонентов соответствовало модели идеального газа. Для решения системы линейных алгебраических уравнений использовалась неявная численная схема второго порядка точности без ограничителей. В систему уравнений включена одноступенчатая глобальная модель реакции горения метана. Рассматривалось уравнение реакции

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O.$$

Однако, при рассмотрении указанной реакции, как реакции горения двух моделируемых компонентов: воздуха и метана с одним газообразным продуктом реакции (смесью продуктов сгорания метана и воздуха), стехиометрический коэффициент при горючем принимался равным 1, при окислителе — 17.167, при продукте — 18.167. Температура воспламенения смеси принималась равной 923 K. Нижнее допустимое значение избытка окислителя принималось равным 0.6, верхнее — 1.8. Значение A в константе скорости реакции (Аррениус) $AT^n exp(-B/T)$ принималось равным 10^{10}, значение n — 0, значение B — 18400. Показатель степени массовой доли горючего и окислителя в эффективной кинетической скорости реакции горения равны 1. Значение C в константе скорости реакции (Магнуссен) $C(\mu e/(\rho k^2))^{0.25} e/k$ равно 23.6. Для формирования картины развитого течения на начальном этапе устанавливался шаг по времени, соответствующий числу Куранта 50, для исследования формирования вихревой зоны за стабилизирующим телом шаг по времени выбирался из условия CFL$\leq$10. После установления картины течения, соответствующей реальной, производился поджиг горючей смеси путем локального повышения температуры в группе ячеек на выходе из сопла на несколько расчетных шагов. Причем шаг по времени повышался до CFL = 50. После устранения принудительного повышения температуры шаг снижался до CFL$\leq$20 и после установления нормального режима горения оценивались полученные данные.

В расчетах оценивалась целесообразность сеточной аппроксимации в области зоны реакции. На рисунке 2 представлены результаты сравнения для случая использования аппроксимации сетки 6 и 7 порядков и без аппроксимации — профили скорости и температуры вдоль радиуса сопла на расстоянии 2.4 мм от кромки сопла вниз по потоку (перед стабилизатором). Режим пламени соответствует числу Рейнольдса потока 1000 (рассчитывался по объемному расходу воздуха и его свойствам при н.у.) и $\varphi = 1.0$. (Для наглядности на рисунке 3 обозначено положение контрольного сечения). Видно, что скорость потока отличается на 8%, а температура — на $\approx 7\%$, при аппроксимации 6 порядка. В случае уменьшения размеров ячейки при аппроксимации 7 порядка результаты отличаются незначительно: 3% по скорости и 3.5% по температуре, тогда как количество ячеек повышается до 8.9 млн, а время расчета увеличивается в 3 раза. Приведенные результаты показывают существенную зависимость параметров течения от размеров ячеек расчетной сетки в зоне фронта горения и подтверждают необходимость измельчения сетки в данной области. Параметры расчетной сетки выбраны из оценки оптимального соотношения точности решения и времени расчета.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенный численный эксперимент позволил оценить динамику фронта пламени во времени. Для потока, соответствующего числу Re = 1000, для бедного

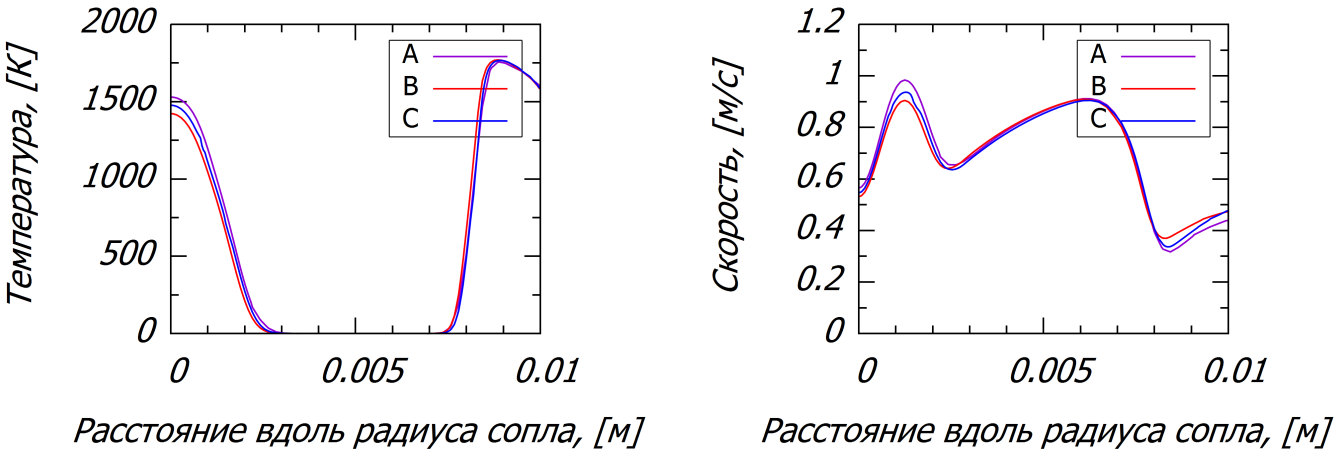

Рисунок 2. Профили температуры (верхний ряд) и скорости (нижний ряд) в контрольном сечении для случая без аппроксимации расчетной сетки в области зоны реакции (A), с аппроксимацией 6 порядка (B) и с аппроксимацией 7 порядка (C).

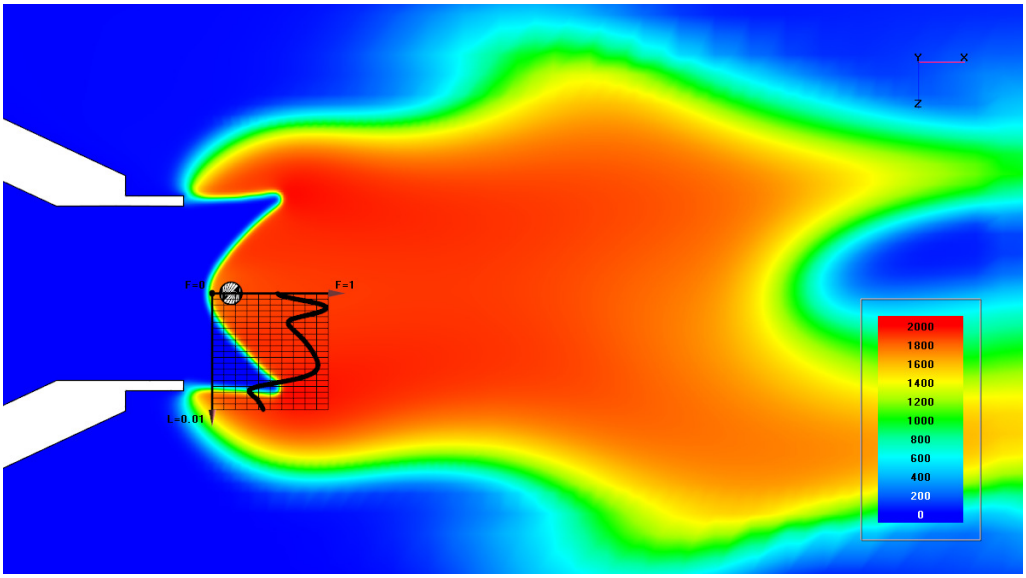

Рисунок 3. Поле температур для режима Re = 1000 $\varphi = 1.0$ с указанием контрольного сечения и профиля скорости.

пламени ($\varphi = 0.7$) и стехиометрического ($\varphi = 1.0$) представлена динамика поля температур, показано сравнение с экспериментальными данными (рисунок 4, легенда аналогична представленной ни рисунке 3). Шаг по времени между представленными изображениями 5 мс. Видно достаточно хорошее совпадение результатов численных расчетов с экспериментальными данными. Представленные пламена имеют различную форму: M — для случая стехиометрической смеси и V — при горении обедненной метано-воздушной смеси, рассчитанные поля температур показывают соответствующие формы. Наблюдаемая на изображениях температурных полей асимметрия течения обуславливается нестационарной динамикой фронта между продуктами сгорания и окружающим воздухом, что обеспечивается возникновением неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, которая сопровождается продвижением вихрей вдоль границы раздела вниз по потоку. Для наглядной демонстрации данного процесса удобным является визуализация поля скоростей в пламени и окружающем воздухе. Экспериментальное определение таких параметров достижимо лишь с использованием сложных и дорогостоящих систем визуализации (например, методы Particle Image Velocimetry и Particle Tracking Velocimetry). Формирование и продвижение таких вихрей представлено на рисунке 5.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика проведения численного эксперимента для моделирования процессов пассивной стабилизации метано-воздушного пламени. Выполнено численное моделирование эволюции обратного конического пламени с применением стабилизатора в виде тонкого цилиндра, перпендикулярного потоку. Проверена адекватность созданной компьютерной модели на собственных экспериментальных данных. Модель исследована на сеточную сходимость. Модель позволяет полу-

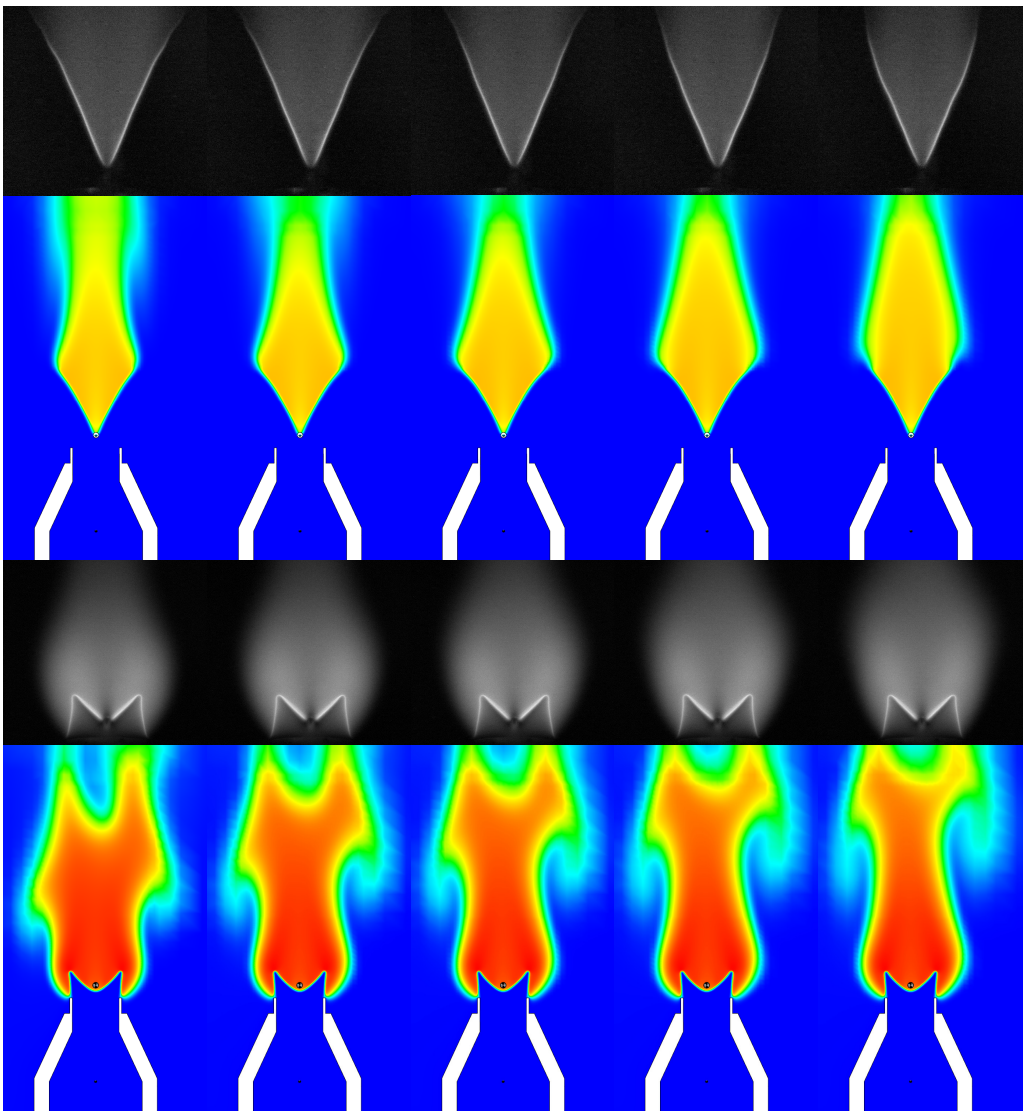

Рисунок 4. Поля температур и кадры видео-съемки хемолюминесценции пламени для режимов потока Re = 1000 $\varphi = 0.7$ (верхний ряд) и $\varphi = 1.0$ (нижний ряд). Легенда совпадает с легендой на рисунке 3. Шаг по времени 5 мс.

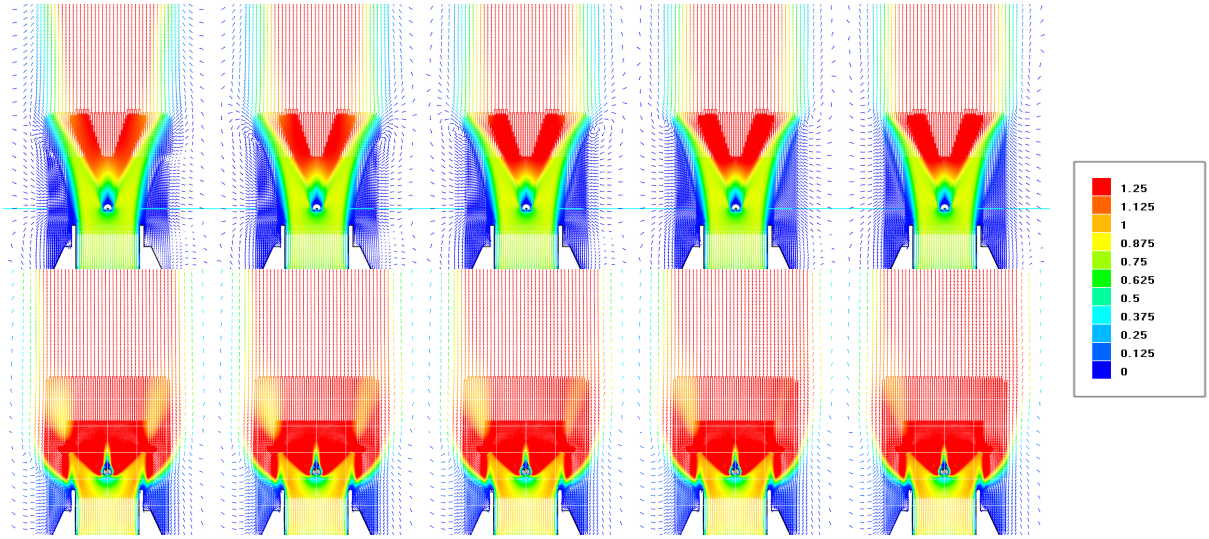

Рисунок 5. Поля векторов скорости для режимов потока Re = 1000 $\varphi = 0.7$ (верхний ряд) и $\varphi = 1.0$ (нижний ряд). Шаг по времени 5 мс.

чать информацию по динамике фронта пламени, обусловленной возникновением и развитием неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. Модель показывает хороший результат в широком диапазоне концентраций горючего в смеси: как для стехиометрической смеси, так и для бедной метано-воздушной смеси. Проведенные расчеты показали возможность использования численного моделирования для исследования динамики пламени сложной геометрической формы, в том числе с использованием стабилизаторов. Однако, поскольку в расчетах использована редуцированная кинетическая схема горения метано-воздушной смеси, то валидация расчета не может проводиться по такому параметру, как скорость распространения фронта пламени. Дальнейшие исследования будут посвящены расширению кинетической схемы, используемой при решении подобных задач при помощи FlowVision, что позволит проводить сравнения с экспериментальными данными по большему количеству параметров.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00462.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu Y 2010 *Handbook of Combustion: Online* 121–40
2. Lyons K M 2007 *Prog. Energy Combust. Sci.* **33** 211–31
3. Zhang L, Liang J, Sun M and Wang H 2018 *Proc. Inst. Mech. Eng., Part G* **232** 1853–63
4. Chaparro A A and Cetegen B M 2006 *Combust. Flame* **144** 318–35
5. Colorado A and McDonell V 2017 *Combust. Sci. Technol.* **189** 2115–34
6. Krikunova A I, Son E E and Saveliev A S 2016 **774** 012087
7. Krikunova A I 2019 *High Temp.* **(in print)**
8. Kuznetsov V, Chernetskaya N and Chernetskiy M 2016 **754** 112006
9. Barot M C, Kolhar S S and Tripathi A M 2013 *International Journal of Engineering* **2**
10. Аксёнов А А 2017 *Компьютерные исследования и моделирование* **9** 5–20
11. Маркова Т В и Жлуктов С В 2012 Развитие моделей горения в ПК flowvision *Инженерные системы-2012: Труды Международного форума* (Москва: М.: МАКС Пресс) с. 89–95
12. Лисаков С А, Сыпин Е В, Павлов А Н и Галенко Ю А 2018 *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности* 40–53