**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ И ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕТА ВОДЯНОЙ СТРУИ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРА**

Е.В. Борисова1, Э.Д. Королькова2

1профессор кафедры высшей математики ТвГТУ,

170024 г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22, elenborisov@mail.ru

2студентка 4 курса ТвГТУ группа С.НТС.ЧС-18.09,

170024 г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22, elonakorolkova@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются отдельные аспекты использования воды для тушения пожаров, обусловленные комплексом ее особых физико-химических свойств. Исследована форма и параметры полета водяной струи. Проведены вычислительные эксперименты по сравнению результатов, полученных для построенной теоретической модели и по эмпирическим формулам. В ходе решения междисциплинарной задачи использованы элементы законов физики, векторной алгебры, аналитической геометрии, математического анализа. Полученные результаты не противоречат литературным источникам и практическим разработкам.

**Ключевые слова**: математическое моделирование, пожаротушение, водяная струя, дальность полета, вычислительный эксперимент, напор, скорость, угол наклона.

**ВВЕДЕНИЕ.**

Автор статьи – студентка, обучающаяся по специальности «Наземные транспортно-технологические средства в чрезвычайных ситуациях». Согласно характеристикам образовательной программы по данной специальности, в курсах фундаментальных дисциплин, таких как математика, физика у обучающихся формируется способность к самообразованию и использованию в практической деятельности новых знаний и умений, в том числе в областях знаний, непосредственно связанных с профессиональной деятельностью. Целью данной статьи является представление результатов исследовательской работы, состоящей в постановке и исследовании задачи прикладного характера. Элементы научно-технического творчества с использованием знаний и умений, приобретенных в рамках изучения фундаментальных дисциплин, являются необходимым условием формирования профессиональных компетенций, начиная с первых лет обучения в вузе. Относительно такой чрезвычайной ситуации, как пожар, рассматривается задача об исследовании модели, формы и параметров полета водяной струи при его тушении.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.**

На поисковом этапе проведен анализ специальной литературы и определены необходимые разделы курса высшей математики. В ходе решения поставленной задачи использованы элементы векторной алгебры, аналитической геометрии, математического анализа. Для подтверждения теоретических результатов применялся вычислительный эксперимент. Полученные результаты не противоречат литературным источникам и практическим разработкам.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**.

Ежегодно в России происходит в среднем 579 пожаров, при которых погибают 44 человека и 37 получают травмы. Огнём уничтожаются 160 строений, 24 единиц автотракторной техники и 8 голов скота. Ежедневный материальный ущерб составляет 3.4 млн. рублей. На города РФ приходится 65.4% от общего количества пожаров, 5.51% числа погибших и 0.5% травмированных при пожарах людей, 60.3% материального ущерба. Больше всего пожаров регистрируется в жилом секторе. Их доля от общего числа составила 71%, а материальный ущерб от таких пожаров составляет 49.6%. В результате неосторожного обращения с огнём происходит 44.28% пожаров, которые причинили 22.1% материального ущерба от общего количества. Нарушение правил устройства и эксплуатации электрооборудования стало причиной каждого пятого пожара (19.3%), а доля ущерба от них составила 25%. [4]

В литературных источниках и на практике пожар определяется как неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства. Для ликвидации очага возгорания существуют разные способы:

- охлаждения (сплошными струями воды; распыленными струями воды; перемешиванием горящих веществ);

- изоляции (слоем пен; слоем продуктов взрыва взрывчатых веществ; созданием разрывов в горящем веществе; слоем огнетушащего порошка; огнезащитными полосами);

- разбавления (струями тонкораспыленной воды; газоводяными струями от автомобиля газоводяного тушения; негорючими парами и газами; горючих жидкостей водой);

- химического торможения (огнетушащим порошком; галоидоуглеводородами).

При выборе средств тушения пожара следует исходить из возможности получения максимального эффекта при минимальных затратах. Вода является наиболее широко применяемым средством тушения при горении веществ в различных агрегатных состояниях. Эффективность и масштабы использования воды для тушения пожаров обусловлены комплексом ее особых физико-химических свойств и в первую очередь высокой, в сравнении с другими жидкостями, энергоемкостью испарения и нагревания паров воды [1]. Так, на испарение одного килограмма воды и нагревание паров до температуры 1000 К необходимо затратить около 3100 кДж/кг, тогда как аналогичный процесс с органическими жидкостями требует не более 300 кДж/кг, т.е. энергоемкость фазового превращения воды и нагревания ее паров в 10 раз выше, чем в среднем для любой другой жидкости. При этом теплопроводность воды и ее паров почти на порядок выше, чем для других жидкостей [7].

Одно из важных достоинств воды, как средства огнетушения — наличие ее в любой местности практически в неограниченном количестве. Кроме того, факторами, обусловливающими достоинства воды, помимо доступности и дешевизны, являются подвижность, химическая нейтральность и отсутствие ядовитости. Эти свойства воды обеспечивают эффективное охлаждение не только горящих объектов, но и объектов, расположенных вблизи очага горения, что позволяет предотвратить разрушение, взрыв и загорание последних. Хорошая подвижность обеспечивает легкость транспортировки и доставки воды (в виде сплошных струй) в удаленные и труднодоступные места. Эффективность воды резко повышается при подаче ее в зону горения в виде распыленных струй (диаметр капель от 0,3 до 0,8 мм) [5]. При этом орошается большая поверхность, расход воды снижается, а ее охлаждающее действие значительно повышается. Малая вязкость и не сжимаемость воды позволяют подавать ее по рукавам на значительные расстояния и под большим давлением.

Однако, вода обладает и рядом недостатков, которые сужают область ее использования в пожаротушении. Основной недостаток заключается в том, что из-за высокого поверхностного натяжения вода плохо смачивает твердые материалы и особенно волокнистые вещества. Другими недостатками являются: замерзание воды при 0°С, что снижает транспортабельность воды при низких температурах; электропроводность, приводящая к невозможности тушения водой электроустановок. Из-за высокой плотности при тушении легких горящих жидкостей вода не ограничивает доступ воздуха в зону горения, а, растекаясь, способствует еще большему распространению огня. Большое количество используемой воды может нанести значительный ущерб материальным ценностям, иногда не меньше, чем сам пожар.

При тушении наружных, открытых или развившихся внутренних пожаров, используют сплошные струи, обеспечивающие такие условия тушения, когда необходимо подать большое количество воды; необходимо придать струе воды ударную силу; к очагу близко подойти не представляется возможным; требуется охлаждение с больших расстояний соседних объектов, конструкций. Этот способ тушения является наиболее простым и распространенным. Вместе с тем, сплошные струи нельзя применять там, где может быть мучная, угольная и другая пыль, способная образовывать взрывоопасные концентрации [6].

Основные приспособления для подачи струй воды при пожаротушении:

– ручные стволы, предназначенные для создания и направления на очаг горения сплошной компактной или распыленной струи воды, а также создания водяной завесы;

– лафетные стволы, стационарные и переносные, предназначенные для формирования и направления на очаг пожара сплошной струи воды или воздушно-химической пены;

– пожарные роботы, разработанные на базе лафетных стволов.

Неоднозначный, зависящий от множества факторов, характер взаимодействия горящих материалов с водой затрудняет принятие оптимальных и оперативных решений в чрезвычайных ситуациях. При тушении пожаров на открытом пространстве происходит передача лучистой энергии от пламени, которое препятствует действиям личного состава пожарных подразделений без специальных средств защиты. Это приводит к необходимости подачи мощных компактных струй воды с больших расстояний [7]. Для оценки применимости водных средств пожаротушения построим теоретическую модель движения струи воды, определим оптимальные параметры ее подачи и сопоставим полученные результаты с эмпирическими расчетами.

Математическая модель полета сплошной струи воды при тушении очага возгорания, основана на законах физики, с элементами векторной алгебры. Исключая влияние сопротивления воздуха, рассмотрим идеальный полет водяной струи, как движение материальной точки, брошенной под углом к горизонту с некоторой начальной скоростью. Таким образом, горизонтальная дальность полета струи может определяться по закону полета материальной точки. В системе координат XOY построим модельную траекторию движения частицы воды (Рис.1).

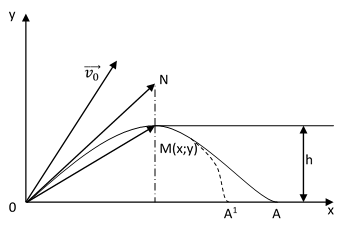


Рис.1. Траектория движения выделенной частицы в струе воды

Выделим в струе материальную точку - частицу воды единичной массы. Если бы на нее не действовала сила тяжести, то за время t она прошла бы путь, равный модулю вектора , где и - начальная скорость частицы. Однако, под действием силы тяжести выделенная частица пройдет путь, равный длине вектора . Поскольку сила тяжести направлена вертикально вниз, то радиус-вектор движения частицы вдоль оси *OX* будет иметь такую же проекцию, как и вектор (Рис.1). Поэтому , а проекция на ось *Oy* будет на меньше, т.е. . Получим систему уравнений, которая является параметрическими уравнениями траектории полет частицы и, следовательно, всей струи:

Найдем выражение для параметра и исключим его из системы, получим:

,

обозначим и , тогда уравнение примет вил параболической кривой: . Тем самым построена теоретическая модель траектории движения выделенной частицы, а значит всей струи, которая описывает дугу параболы.

Как видно из полученного уравнения, траектория движения выделенной частицы, а значит, вся струя будет иметь форму дуги параболы. Реальный полет водяной струи происходит в атмосфере, и, следовательно, будет иметь место отклонение от указанного выше закона. При малых давлениях у ствола, которым соответствуют малые скорости , отклонение полета струи от указанного закона будет незначительным, но с увеличением давления, а, следовательно, и отклонение увеличивается. Пренебрегая сопротивлением воздуха, найдем выражение для расчета. начальной скорости частицы:

,

где *Н* – напор в метрах водяного столба, – безразмерный коэффициент, зависящий от формы насадки (для конических сходящихся насадок предполагают ).

Таблица 1.

Расчет зависимости начальной скорости частицы от напора водяного столба

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *H* | 75 | 70 | 65 | 60 | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 |
|  | 36,44 | 35,21 | 33,93 | 32,59 | 31,21 | 29,75 | 28,23 | 26,61 | 24,89 |

Полученные расчетные значения подтверждают вывод: снижение напора водяного столба, уменьшает начальную скорость частицы.

Как следует из полученных проекций векторов (Рис.1), описывающих траекторию движения частиц в струе, ее горизонтальная дальность полета определяется наклоном ствола к горизонту, то есть углом α; начальной скоростью струи при выходе из спрыска ствола (м/с). Положим в уравнении траектории движения струи , найдем выражение для теоретической дальности полета и проведем вычислительный эксперимент, результаты которого сведены в табл.2:

Таблица 2.

Результаты вычислительного эксперимента зависимости теоретической дальности полета струи от изменения начальной скорости частицы воды и угла .

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | *36,44* | *35,21* | *33,93* | *32,59* | *31,21* | *29,75* | *28,23* | *26,61* |
| *25* | 103,70 | 96,79 | 89,88 | 82,96 | 76,05 | 69,14 | 62,22 | 55,31 |
| *35* | 127,21 | 118,73 | 110,25 | 101,77 | 93,29 | 84,81 | 76,33 | 67,85 |
| *45* | **135,38** | **126,35** | **117,33** | **108,3** | **99,28** | **90,25** | **81,22** | **72,20** |
| *55* | 127,21 | 118,73 | 110,25 | 101,7 | 93,29 | 84,81 | 76,33 | 67,85 |
| *65* | 103,70 | 96,79 | 89,88 | 82,96 | 76,05 | 69,14 | 62,22 | 55,31 |

По результатам вычислительного эксперимента (табл. 2) можно сделать вывод, что при любом напоре и начальной скорости частицы воды дальность полета будет достигать своего наибольшего значения при значении угла . Соответствующая строка табл.2 выделена полужирным шрифтом. Докажем эмпирически полученное значение средствами математического анализа. Исследуем функцию, описывающую дальность полета струи, на наличие экстремума. Найдем производную от функции дальности полета струи по переменной :

где ,

Приравняем производную к нулю, получим простейшее тригонометрическое уравнение: решением которого является значение Таким образом, получено теоретическое подтверждение величины оптимального угла наклона ствола к горизонту, совпадающее с эмпирическими данными.

Экспериментальными исследованиями и практическими разработками установлено, что напор водяной струи напрямую зависит от размера диаметра выходного отверстия, расположенного на насадке-распределителя [2]. Для получения высокодисперсной струи воды, как правило, требуется высокое давление, но и при этом дальность подачи распыленной воды ограничена малой дистанцией. Наибольшая дальность полета струи может быть вычислена по эмпирической формуле:

где – диаметр выходного сечения насадка в метрах [3].

В табл. 3 приведены результаты вычислительного эксперимента по расчету дальности полета струи, выполненные по эмпирической формуле. Из результатов вычислительного эксперимента следует, что дальность полета увеличивается с ростом напора и увеличением диаметра сечения насадка (в табл.3. выделено значение в правом верхнем углу).

Данное утверждение не противоречит свойствам линейной возрастающей функции, которая описывает эмпирическую дальность полета струи воды.

Таблица 3.

Результаты вычислительного эксперимента зависимости эмпирической дальности полета струи от изменения *H* напора и диаметра выходного сечения насадка.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *d*  *H* | *0,023* | *0,024* | *0,025* | *0,026* | *0,027* | *0,028* | *0,029* | *0,031* |
| *75* | 54,5 | 55,5 | 56,5 | 57,5 | 58,5 | 59,5 | 60,5 | **62,5** |
| *70* | 52,4 | 53,4 | 47,01 | 55,4 | 56,4 | 57,4 | 58,4 | 60,4 |
| *65* | 50,3 | 51,3 | 46,13 | 53,3 | 54,3 | 55,3 | 56,3 | 58,3 |
| *60* | 48,2 | 49,2 | 45,24 | 51,2 | 52,2 | 53,2 | 54,2 | 56,2 |
| *55* | 46,1 | 47,1 | 44,36 | 49,1 | 50,1 | 51,1 | 52,1 | 54,1 |
| *50* | 44 | 45 | 43,48 | 47 | 48 | 49 | 50 | 52 |
| *45* | 41,9 | 42,9 | 42,60 | 44,9 | 45,9 | 46,9 | 47,9 | 49,9 |
| *40* | 39,8 | 40,8 | 41,72 | 42,8 | 43,8 | 44,8 | 45,8 | 47,8 |
| *35* | 37,7 | 38,7 | 40,83 | 40,7 | 41,7 | 42,7 | 43,7 | 45,7 |

Сравним результаты численных экспериментов для теоретической и эмпирической формул, получим: Таким образом установлено, что теоретическая дальность полета струи воды в два раза больше, чем эмпирическая. Это можно объяснить тем, что на реальную струю воды оказывают воздействия внешние силы: сопротивление с воздухом, порывы ветра и т.д., что существенно изменяет угол наклона ствола при подаче воды. Исключение этого параметра из эмпирической формулы заменено введением переменных *H* напор и диаметр выходного сечения. В практических руководствах по тушению пожаров отмечается, что экспериментально установленная максимальная дальность полета струи воды наблюдается при углах наклона ствола к горизонту α = 30÷350 т.е. подачу воды на максимальное расстояние можно осуществить только при использовании навесных пожарных струй [3]. Интуитивно понятно, что большое влияние на длину и дальность компактной струи оказывает ветер. При боковом и, особенно, встречном ветре длина компактной струи значительно уменьшается [8]. Ветер и воздушный поток в процессе тушения очага горения должны быть направлены в спину. При этом расстояние от устройства огнетушения до очага пожара должно быть не меньшим длины огнетушительной струи. Во-вторых, в процессе тушения следует учитывать тот фактор, что ветер способен сносить с очага возгорания огнетушительные струи, это также может мешать тушению и увеличивать горение.

Важным параметром для модели полета водяной струи является высота подъема ее над уровнем земли, иначе достижение точки максимума. Из уравнения траектории движения струи (параболы) получим формулу для вычисления высоты подъема струи для точки экстремума . Высота подъема струи воды, согласно построенной математической модели, определяется формулой: . При постоянном напоре, равном в вычислительно эксперименте 55м.вод.ст. и, как следствие, постоянной начальной скорости, высота подъема струи также определяется наклоном ствола к горизонту, то есть углом α, и растет с его увеличением до значения α=900.

При оптимальном, для дальности, значении угла α=450 и средней величине напора Н=55м.вод.ст. высота подъема струи равна h=24.79 м, что составляет ровно половину от теоретически максимального, значения высоты при данных начальных условиях.

Подводя итог, можно утверждать, что теоретическая модель полета водяной струи является в большой степени идеализированной и учет разных факторов, влияющих на ее параметры существенно изменяет их расчетные величины. В реальности, например, вследствие сопротивления воздуха частицы воды фактически движутся не по параболе, а по произвольной траектории, (см. рис.1) кривая показана пунктиром. В выборе средств и способов пожаротушения определенную роль играет возможность избирательности, то есть для различных параметров пожара подбирается наиболее оптимальная система защиты объекта. При этом наиболее важным становится эффективность и минимизация подачи огнетушащих средств при безусловной ликвидации пожара.

Тактические возможности лафетных пожарных стволов ограничиваются дальностью, создаваемой ими струи. Для лафетных стволов с расходом более 20 л/с дальность подачи воды в различных конструкциях составляет от 43м до 55м. Увеличение дальности струи традиционно достигается увеличением производительности ствола, что, в свою очередь, значительно повышает требования к подводящим сетям водоснабжения. В результате существенно усложняется конструкция комплексов пожаротушения и возрастает их стоимость. Решить эту проблему помогает создание специальных насадков, которые позволяют формировать максимально длинную сплошную струю. Так по данным научно-исследовательского института пожарной охраны эффективная дальность струи воды из ствола с условным проходным диаметром 50мм составляет 5м, а из ствола с условным проходным диаметром 70мм до 10м [5].

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.**

1. Проведенным анализом литературных источников установлены важные достоинства и существенные недостатки воды, как средства пожаротушения.

2. Построена математическая модель траектории движения выделенной частицы, описывающая форму полета струи воды, как дуги параболы

3. Рассчитана теоретическая и эмпирическая дальность полета струи воды, при фиксированных начальных условиях, установлено, что они различаются в два раза.

4. Получены расчетные формулы отдельных параметров полета струи воды и проведен сравнительный анализ: зависимость дальности полета при изменении начальной скорости частицы воды и угла ; зависимость начальной скорости частицы от напора водяного столба; зависимость высоты подъема струи воды от напора и угла наклона ствола к горизонту.

5. Выполнен вычислительный эксперимент и получено теоретическое подтверждение оптимального угла наклона ствола к горизонту.

6. Проведено сравнение результатов вычислительных экспериментов для различных параметров построенной модели.

Использование эффективных способов подачи воды или другого огнетушащего c оптимальными параметрами, обеспечит понижение интенсивности излучения пламени пожара путем направленной сплошной водяной струи, что позволяет приблизиться к фронту или очагу пожара на малое расстояние.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физикохимические основы развития и тушения пожаров. ВИПТШ МВД СССР. М, 1980. 184с.

2. АмельчуговС**.,** ГорностаевР**.,** ЛёвинС*.*Новая технология построения систем защиты от пожара на базе роботизированных комплексов пожаротушения // *Технологии защиты*. 2007. №5 С.83-91

3. Антонов Н.М. Характеристика пожарных ручных стволов типа ПС50, ПС70, КРБ и РСБ и водоизмерительных приборов. Информационный сборник. Пожарная техника. ГУПО ЦНИИПО. М, 1958. 45с.

4. Белов С.В., Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность) : учебник для бакалавров / С. В. Белов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт ; ИД Юрайт, 2013. — 682 с. — Серия : Бакалавр. Базовый курс.

5. Дымов С.М., Цариченко С.Г., Былинкин В.А. Применение тонкораспыленной воды в практике пожаротушения. Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков // Материалы XV научнопрактической конференции. Часть 1. ВНИИПО МВД РФ. М. 1999. 268с.

6. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2-х ч. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Пожнаука, 2004. - Ч.1 - 713с.

7. Теребнев В.В. Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений. - М.: Пожнаука, 2004. - 248с.

8. Ходаков В.Ф. Специальный противопожарный водопровод с лафетными установками. Высшая школа МООП СССР. М, 1968. 19с.

**RESEARCH OF THE FORM AND PARAMETERS OF THE FLIGHT OF A WATER JET AT FIRE EXTINGUISHING**

**Е.V. Borisova, Gorchenkov K.S., Korolkova E.D.**

Tver State Technical University, Tver

**Annotation.** The article discusses certain aspects of the use of water to extinguish fires due to the complex of its special physicochemical properties. The form and parameters of the water jet flight were investigated. Computational experiments were carried out comparing the results obtained for the theoretical model constructed and using empirical formulas. In the course of solving the interdisciplinary problem, elements of the laws of physics, elements of vector algebra, analytical geometry, and mathematical analysis were used. The results do not contradict literary sources and practical developments.

**Keywords**: mathematical modeling, fire extinguishing, water jet, flight range, computational experiment, head, speed, angle of inclination.

*Об авторах:*

БОРИСОВА Елена Владимировна – доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры высшей математики ТвГТУ, e-mail: *elenborisov@mail.ru*

Borisova Elena Vladimirovna, Doctor of Pedagogical Sciences, certified professor, Professor of Subdepartment of Mathematics of Tver State Technical University.

КОРОЛЬКОВА Элона Денисовна – студентка 4 курса ТвГТУ факультета природопользования и инженерной экологии, группа С.НТС.ЧС-18.09, e-mail: *elonakorolkova@yandex.ru*

KOROLKOVA Elona Denisovna – 4 year student of Tver state technical University, faculty of nature management and engineering ecology, group NTS-18.09.