

В соответствии с предложенной схемой, воспламенение титана в потоке окислительной среды высокого давления обусловливается возгоранием образующейся ювенильной поверхности металла. Поэтому можно предположить, что при повышении температуры потока до уровня, достаточного для воспламенения ювенильной поверхности других металлических материалов (например, до 1300 К для нержавеющей стали [10]), конструкции из указанных материалов при обдуве также будут воспламеняться. Вследствие практической важности обеспечения безопасной эксплуатации оборудования, контактирующего с окислительными средами высокого давления, данный вопрос требует дальнейшего изучения.

Автор выражает благодарность А. А. Прокофьеву и А. Н. Кольцову за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисова Е. А., Барданов К. В. О загорании титановых сплавов в кислородсодержащих средах // Цветная металлургия.— 1963.— № 2.— С. 47—48.
2. Борисова Е. А., Барданов К. В. Загорание титановых сплавов в кислородсодержащих средах // Металловедение и термическая обработка металлов.— 1963.— № 2.— С. 37—40.
3. Littman F. E., Church F. M., Kinderman E. M. The spontaneous ignition of titanium // J. of the Less-Common Metals.— 1961.— N 3.— P. 367—378.
4. Дерябина В. И., Колготин П. Н., Лукьянов О. П. и др. Возгорание низколегированного титанового сплава при разрыве в кислородсодержащих газах // Физико-химическая механика материалов.— 1971.— № 1.— С. 16—19.
5. Болобов В. И., Макаров К. М., Прокофьев А. А. О возгорании титана в кислороде при различной скорости появления ювенильной поверхности металла // ИФЖ.— 1992.— 62, № 3.— С. 443—445.
6. Бепер Ж. Окисление металлов.— М.: Металлургия, 1968.— Т. 1.
7. Николаев С. А., Запихина Т. П. О загорании титана при повышенных давлениях кислорода // Цветные металлы.— 1964.— № 1.— С. 54—55.
8. Попов Б. Г., Веревкин В. Н., Бондарь В. А. и др. Статическое электричество в химической промышленности.— Л.: Химия, 1971.
9. Розловский А. И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами.— М.: Химия, 1980.
10. Болобов В. И., Березин А. Ю., Дрожжин П. Ф. и др. Воспламенение компактных образцов нержавеющей стали в кислороде высокого давления // ФГВ.— 1985.— 27, № 3.— С. 3—7.

г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 18/VI 1992

УДК 541.182.45 + 614.841.12

В. В. Замашников, И. А. Какуткина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГОРЕНИЯ ВОДОСНОВНЫХ ПЕН, ЗАПОЛНЕННЫХ ГОРЮЧИМИ ГАЗАМИ

Экспериментально исследованы скорости горения водосновных пен в зависимости от их кратности, дисперсности, типа и состава горючей газовой смеси, заполняющей пузырьки пены, состава жидкой фазы пены. Показано, что в общем случае скорость горения пен есть немонотонная функция кратности.

Пены представляют собой разновидность двухфазных газожидкостных систем. Горючей в пенах может быть газовая фаза, жидкая или обе вместе. Образование стабильных пен с горючей жидкой фазой затруднено из-за отсутствия поверхностно-активных веществ, сильно понижающих поверхностное натяжение органических жидкостей [1]. Водосновные пены с горючей газовой фазой достаточно стабильны и могут образовываться в различных технологических процессах. Поэтому необходимо знание горючих свойств таких пен.

© В. В. Замашников, И. А. Какуткина, 1993.

Пузырьки горючего газа в водоосновных пенах разделены инертными жидкими перегородками. Горючесть таких систем обусловлена способностью пламени разрушать жидкие пленки. В [2, 3] показано, что при определенных условиях распространение пламени в таких системах возможно. В [4] измерены скорости горения водоосновных пен со стехиометрической метановоздушной смесью. Зависимость скорости горения S от кратности пены K , представляющей собой величину, обратную объемной доле жидкости в пене, оказалась немонотонной. С уменьшением K (т. е. с увеличением содержания жидкости в пене) от 2000 до 300 скорость, как и ожидалось, падает. Однако дальнейшее увеличение количества жидкости в пене приводит к росту S . Такое же anomальное поведение скорости горения обнаружено для пен с бедными метановоздушными смесями [5]. С повышением начального давления p_n характер зависимости $S(K)$ не меняется, однако скорость слабее зависит от кратности, а при $p_n = 6$ атм вовсе перестает зависеть от K [5]. В [6] исследовалась скорость распространения детонационных волн в водоосновных пенах с этиленкислородными смесями. Немонотонной зависимости $S(K)$ не замечено.

Перечисленные работы [1—5] не позволяют сформулировать основные закономерности горения пен. В связи с этим в настоящей работе предприняты систематические исследования закономерностей горения водоосновных пен при изменении в широком диапазоне их характеристик: кратности, типа и состава наполняющего пену горючего газа, состава жидкой фазы и дисперсности пены.

Методика эксперимента

Пену получали в барботажном пеногенераторе путем пропускания горючей газовой смеси через сетку с налитым на нее пенообразующим раствором (водные растворы сульфанола различной концентрации). Горючие газовые смеси готовили предварительно в смесителе СГ-15/50.

Характеристики горения пен измеряли в стеклянной горизонтальной трубе, в которую пена подавалась из пеногенератора через трехходовой кран. Для выяснения влияния размеров трубы использовалось две трубы: диаметром $d = 105$ и длиной $l = 2750$ мм и с $d = 55$ и $l = 520$ мм. Для предотвращения вытекания жидкости из пены реакционную трубу вращали с частотой 1 Гц. Поджигали пену с открытого конца электрическим разрядом или открытым пламенем. В экспериментах регистрировали координату фронта пламени как функцию времени. Подробное описание установки и методики измерений дано в [4]. Основные структурные характеристики пены — кратность и дисперсность. Средний размер пузырьков пены измеряли по отпечаткам, оставленным пеной на специальной фиксирующей подложке (стеклянная пластина с нанесенным водным раствором желатина, подкрашенным родамином). Средний размер пузырьков пены ($2 \div 4$ мм) зависел от размера отверстий в сетке пеногенератора. Кратность пены, равную отношению объема пены к объему содержащейся в ней жидкости, измеряли взвешиванием известного объема пены на аналитических весах. На выходе из пеногенератора кратность пены была обычно одинакова (~ 1600). Изменяли величину k дозированным вливанием в пену пенообразующего раствора на входе в горизонтальную трубу перистальтическим насосом. Скорость вливания раствора варьировалась, что позволяло менять кратность от 30 до 1600.

Экспериментальные результаты

На рис. 1 приведены зависимости $S(K)$ для пен с различными горючими смесями в качестве газов-наполнителей. Состав жидкой фазы пены в этой серии экспериментов — 3%-й водный раствор сульфанола. Видно, что при переходе от кривой 7 к кривой 1 характер рассматриваемой зависимости меняется. Кривая 4 содержит все характерные особенности

Рис. 1. Зависимости скорости горения пен с водородом- (1—4) и метановоздушными смесями (5—7) от кратности.

Водород, %: 1 — 15, 2 — 13, 3 — 11,6, 4 — 10; метан, %: 5 — 9,5, 6 — 8, 7 — 7.

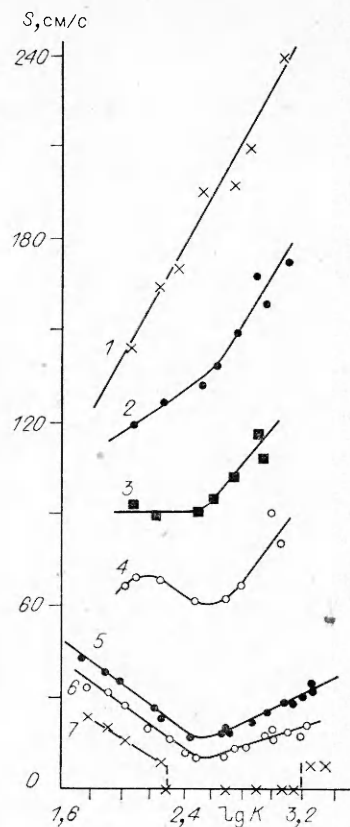
остальных кривых, поэтому остановимся на ней подробнее. Здесь можно выделить три характерных участка. На первом (высокократном) снижении K приводит к уменьшению скорости горения, что вполне естественно, так как увеличение доли жидкости в пене должно приводить к росту теплоотвер при распространении пламени. Однако, начиная с некоторого значения K_1 , зависимость становится аномальной: уменьшение кратности приводит к повышению скорости горения (второй участок). На третьем участке, начиная со значения K_2 , скорость горения снова падает с уменьшением K .

На остальных линиях, представленных на рис. 1, некоторые из описанных участков отсутствуют или видоизменяются. На кривых 5—7 отсутствует третий участок. Это, однако, не означает, что его нет вообще, поскольку очевидно, что S не может бесконечно расти по мере увеличения доли жидкости в пене. В отличие от водородовоздушных смесей этот участок смещен в более низкократную область, в которой эксперименты не проводились.

Интересна особенность зависимостей $S(K)$ — наличие аномального участка роста скорости с уменьшением кратности. Этот участок закономерно меняется при переходе от кривой 7 к кривой 1. Для рассматриваемых пен повышение реакционной способности газовой смеси приводит к тому, что этот участок становится менее выраженным. При содержании водорода 11,6 % второй участок вырождается в «полочку», при 13 % на его месте кривая лишь немного меняет наклон, оставаясь монотонной, а при 15 % водорода характер зависимости одинаков во всем диапазоне K . Важно отметить, что положение минимума в зависимости $S(K)$, соответствующее началу второго участка, практически не изменилось при смене горючего газа и изменении реакционной способности смеси. В целом можно сказать, что аномальный второй участок характерен для пен с медленно горящими газовыми смесями и вырождается по мере увеличения скорости горения смеси.

Значение S возрастает с увеличением скорости горения газа-наполнителя (см. рис. 1). При этом для всех пен в определенном диапазоне кратностей скорость горения пены превышает нормальную скорость горения соответствующей газовой смеси. Однако, если для метановоздушных пен это превышение незначительно, то, например для пен с 15%-й водородовоздушной смесью, скорость горения высокократных пен уже более, чем в 2 раза превышает нормальную скорость горения газа-наполнителя.

Рис. 2 демонстрирует влияние состава жидкой фазы на закономерности горения пен. Концентрация пенообразующего вещества влияет на стабильность пен. Для сульфанола наиболее стабильные пены получаются при 3%-м содержании пенообразующего вещества в воде. Поэтому предполагалось, что для менее стабильных пен с малым содержанием сульфанола скорость горения должна возрастать, так как облегчается разрушение пленок пены и освобождение горючего газа из пузырьков. Набор кривых на рис. 2, а, показывает обратный эффект: величина S



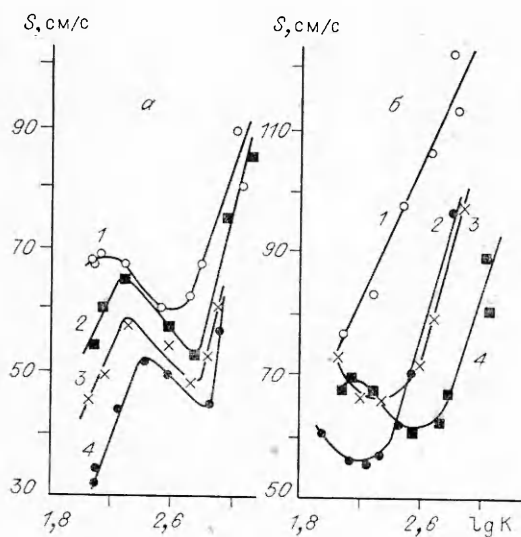


Рис. 2. Зависимости скорости горения пен с 10%-й водородовоздушной смесью (а) и при добавках глицерина в пенообразующий раствор (б) от кратности.

а — содержание сульфонола в пенообразующем растворе, %: 1—3, 2—1, 3—0,5, 4—0,2; б — глицерин, %: 1—30, 2—15, 3—7,5, 4—0.

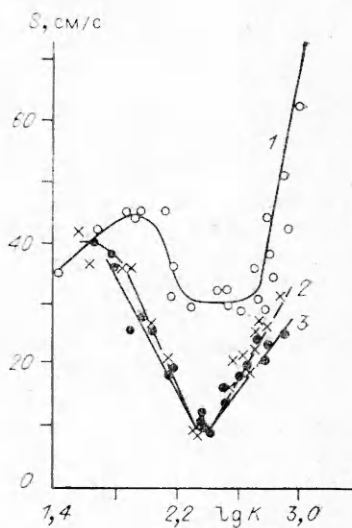


Рис. 3. Зависимости скорости горения пен разной дисперсности с 9,5%-й метановоздушной смесью от кратности.

d_{cp} , мм: 1—1, 2—2,5, 3—2.

падает при снижении концентрации раствора. Пены с содержанием сульфонола 0,2% были настолько нестабильны, что часто самопроизвольно разрушались в испытательной трубе до эксперимента. Тем не менее именно эти пены медленнее всего горели.

Постепенное снижение концентрации сульфонола приводит к закономерной трансформации экспериментальных кривых. С уменьшением концентрации положение минимума в зависимостях $S(K)$ заметно смещается в высокочастотную область. Параллельно минимуму смещается и положение максимума, соответствующее переходу к участку спада скорости горения. Таким образом, изменение концентрации поверхностно-активного вещества в пенообразующей жидкости не приводит к изменению характера зависимости $S(K)$, а лишь к уменьшению абсолютных величин скорости и смещению всех особенностей кривой в высокочастотную область.

Данные, представленные на рис. 1, 2, получены в испытательной трубе с $d = 105$ мм. Чтобы выяснить влияние размеров установки на наблюдаемые закономерности горения пен, измерения скорости горения пен с различными концентрациями сульфонола проводились также на малой трубе ($d = 55$ мм). Эксперименты показали, что кривые, полученные на двух различных трубах, идентичны за исключением низкочастотной области. На малой трубе переход к третьему участку кривой происходит при более низких кратностях. Соответственно аномальный второй участок оказывается более длинным. В таблице приведены значения K ,

при которых наблюдаются минимум и максимум кривых зависимостей $S(K)$ в двух трубах.

Помимо изменения концентрации сульфонола состав жидкой фазы меняли, добавляя к пенообразующему раствору глицерин, который увеличивает вязкость пенообразующего раствора. Ожидалось, что эти добавки приведут к уменьшению S из-за увеличивающихся трудностей разрыва пленок пены. Однако эффект ока-

Содержание сульфонола, %	Труба			
	$d_{cp} = 105$ мм		$d_{cp} = 55$ мм	
	K_{min}	K_{max}	K_{min}	K_{max}
3,0	360	130	360	60
1,0	560	190	520	110
0,5	600	210	630	150

залеся более сложным (см. рис. 2, б). Малые добавки глицерина приводят к росту скорости горения и смещению минимума в низкократную область. При добавлении глицерина до 15 % высокократная часть кривой не меняется, а минимум продолжает смещаться в сторону низких кратностей. Значения S в низкократной области оказываются ниже, чем при 7,5 % глицерина, а при 30 % значительно повышается скорость горения пен и полностью исчезает минимум в исследуемой области кратностей.

Рис. 3 иллюстрирует влияние дисперсности пены на $S(K)$. Небольшое изменение среднего размера пузырьков пены $d_{ср}$ от 2 до 2,5 мм практически не сказывается на виде этой зависимости. Увеличение $d_{ср}$ до 4 мм приводит к существенному росту S во всем диапазоне K . При этом минимум в зависимости $S(K)$ становится менее глубоким: если для пен с дисперсностью 2 мм аномальный рост скорости при уменьшении кратности составляет 30 см/с, то при дисперсности 4 мм — всего 15 см/с. Кроме того, для более крупнокапельных пен максимум скорости, соответствующий началу третьего участка, смещается в высокократную область.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что характер зависимости скорости горения водогорючих пен от кратности меняется при изменении характеристик пен и условий проведения эксперимента. Коротко обнаруженные закономерности можно суммировать в следующих положениях.

1. Скорость горения пен в общем случае есть монотонная функция кратности: при высоких и низких кратностях скорость горения падает с уменьшением K , а в промежуточной области растет. С увеличением реакционной способности газовой смеси, заполняющей пену, промежуточный участок вырождается, и скорость горения монотонно падает со снижением K .

2. Уменьшение концентрации поверхностно-активного вещества в пенообразующем растворе приводит к падению скорости горения и смещению ее максимума и минимума в высокократную область. Характер зависимости $S(K)$ не меняется.

3. Добавление глицерина к пенообразующему раствору приводит к смещению минимума скорости в низкократную область и, как правило, росту скорости горения.

4. С увеличением среднего размера пузырьков пены скорость горения пен возрастает, а глубина минимума в зависимости $S(K)$ уменьшается.

5. Изменение размера реакционной трубы сказывается на скорости горения только низкократных пен: в трубах меньшего диаметра низкократные пены горят быстрее.

Таким образом, обнаруженная ранее аномальная зависимость $S(K)$ не является уникальным свойством метановоздушных пен, для которых оно впервые получено [4, 5], а присуще вообще пенам с медленно горящими газовыми смесями независимо от типа горючего. С другой стороны, эти результаты позволяют объяснить отсутствие аномалии, зарегистрированное в работах [3, 6]. В обеих этих работах исследовались пены с быстро горящими смесями, для которых, как показывают результаты настоящих исследований, скорость горения монотонно падает с уменьшением K .

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что результаты измерения величины S в трубах разного диаметра различаются только в низкократной области: в большой трубе при более высоких кратностях начинается спад скорости горения после аномального участка роста S . Этот эффект может быть объяснен следующим образом. При низких кратностях фронт пламени в трубе часто не вертикален, а имеет заметный наклон к оси трубы [4] таким образом, что верхние слои пены сгорают чуть раньше нижних. Жидкость, истекающая при сгорании

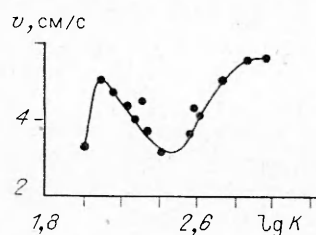


Рис. 4. Зависимость скорости теплового разрушения водовоздушной пены от кратности.

верхнего слоя пены, сливается на нижние, еще не сгоревшие слои, снижая скорость распространения пламени. Чем больше диаметр трубы, тем сильнее при постоянном наклоне фронта пламени разнесение верхней и нижней координат фронта в трубе и тем больше различаются кратности в верхней и нижней частях трубы. Поэтому в трубах большого диаметра спад скорости начинается при более высоких кратностях. С этой точки зрения измерения величины S в трубах меньшего диаметра более корректны, так как в них наклон фронта пламени оказывает меньшее влияние на результаты измерений.

Пузырьки горючего газа в пене разделены жидкими перегородками. Естественно ожидать, что скорость горения пены должна определяться прочностью пленок. Обсудим полученные результаты с этой точки зрения. Увеличение концентрации сульфанола и добавки глицерина к пенообразующему раствору повышают механическую прочность пены. Однако, как уже отмечалось, вместо ожидаемого снижения скорости горения это, наоборот, ускоряет горение пен. Увеличение $d_{ср}$ при постоянной K должно сопровождаться утолщением жидких пленок и, следовательно, уменьшением скорости горения. Однако и здесь наблюдается противоположный эффект — более крупные пены горят быстрее. Наконец, с уменьшением K монотонно должна увеличиваться толщина пленок пен [7] и, следовательно, падать скорость их горения. Эксперимент показывает в общем случае немонотонную зависимость $S(K)$. Таким образом, экспериментальные данные показывают отсутствие корреляции между скоростью горения и прочностью пены.

Распространяющийся фронт пламени «чувствует» только ближайшие к нему поверхностные пленки пены, толщина которых может отличаться от толщины пленок в объеме пены. Кроме того, в процессе горения при разрыве крайних пленок пены часть жидкости из разрушенной пленки может всасываться в соседние пленки и капалы Плато. Согласно [8], характерное время перетекания жидкости между элементами пены сопоставимо с интервалом времени между разрушением соседних пузырьков в процессе горения. Поэтому характеристики близких к фронту пленок могут не достигать равновесных значений в процессе горения и не коррелировать с объемными свойствами пены. Это может служить причиной отсутствия корреляций между толщиной пленок пены и скоростью ее горения. В частности, немонотонная зависимость $S(K)$ может быть обусловлена немонотонной зависимостью от кратности толщины крайних пленок пены, непосредственно взаимодействующих с фронтом пламени. Чтобы проверить это, измерялось рассеяние света лазером границей пены в процессе горения. В [8] показано, что величина рассеяния света пеной коррелирует с толщиной пленок. Проведенные эксперименты показали, что рассеяние света на краю пены, а следовательно, и толщина крайних пленок пены в процессе горения монотонно меняются с кратностью. Таким образом, отсутствие корреляций между толщиной пленок пены и скоростью ее горения не связано с отличием характеристик поверхностных и объемных пленок пены. Это заставляет предположить, что скорость горения пен не лимитируется разрывом жидких пленок.

В общем случае процесс горения пены распадается на две стадии: разрушение пузырьков пены и сгорание освобожденного газа. Важно выделить, какая из них определяет закономерности горения пен. С этой целью стадия сгорания газа устранялась заменой горючего газа в пене

воздухом. Такую водовоздушную пену разрушали фронтально потоком горячих продуктов сгорания, полученных от газовой горелки, регистрируя скорость разрушения пены в зависимости от ее кратности. Полученная зависимость оказалась аналогичной зависимости $S(K)$ (рис. 4): она немонотонна, причем минимум в зависимости скорости разрушения пены наблюдался при той же кратности, что и при горении пены.

Эти эксперименты убеждают в том, что закономерности горения пены определяются не химическими реакциями, а процессом теплового разрушения пены.

Скорость теплового разрушения пены должна определяться не только прочностными характеристиками пены, такими, как толщина пленок, но и тепловым потоком в пену от сгоревшего газа, зависящим от теплопотерь. При разрушении пены большая часть содержащейся в ней жидкости диспергируется. Поток горячего газа, разрушающего пену, может эффективно охлаждаться каплями диспергированной жидкости. Согласно [2], средний размер капель, получающихся при разрушении пены, растет с повышением кратности. В некотором диапазоне K это может привести к уменьшению удельной поверхности аэрозоля, образующегося при разрушении пены и как следствие, к уменьшению охлаждения продуктов сгорания и увеличению скорости горения. Проверка этой гипотезы требует дальнейших исследований горения пен, в частности, исследований диспергирования пен в процессе горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамзон А. А. Поверхностно-активные вещества.— Л.: Химия, 1981.
2. Burgoyne J. H., Steel A. J. Flammability of methane-air mixtures in water-base foams // Fire Research Abstracts and Reviews.— 1962.— 4, N 1.— P. 2.
3. Цап В. Н., Шароварников А. Ф., Корольченко А. Я. и др. Влияние структуры пен на горючесть газа-наполнителя // Коллоидный журнал.— 1982.— № 2.— С. 384.
4. Замащиков В. В., Бабкин В. С., Тихомолов Е. М. и др. Экспериментальные исследования горения водогорючих пен // ФГВ.— 1988.— 24, № 4.— С. 35.
5. Замащиков В. В., Какуткина Н. А., Плеслов А. А. и др. Закономерности горения водогорючих пен при повышенных давлениях // Проблемы горения и взрыва: Материалы 9 Всесоюз. симп. по горению и взрыву, 1989.— С. 62.
6. Segev G., Hasson A., Siman M. et al. Detonation waves through foam // Abstracts of 22th Symp. (Int.) on Combust.— 1988.— P. 56.
7. Тихомиров В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения.— М.: Химия, 1975.
8. Замащиков В. В., Какуткина Н. А. Структурные изменения в пене под действием звука // Коллоидный журнал.— 1992.— 54, № 2.— С. 64.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 10/VI 1992

УДК 622.278

Е. В. Крейнин, Е. И. Шифрин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ В КАНАЛЕ ПОДЗЕМНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

Рассматриваются горение и газификация угля в канале подземного газогенератора на той стадии, когда процесс можно приближенно считать установившимся. Размеры канала (площадь сечения, доли поверхности, занимаемые углем и породами) предполагаются известными и определяются процессами обрушения горного массива. Также известным предполагается водопиток в канал газификации. Задача заключается в том, чтобы по составу дутья, его расходу, температуре и давлению на входе в канал определить изменение этих характеристик вдоль канала, в том числе на выходе из него. Разработана математическая модель рассматриваемого процесса. Составлена программа для ЭВМ, реализующая разработанную модель. Проведены расчеты, иллюстрирующие соответствие модели исследуемому процессу.

© Е. В. Крейнин, Е. И. Шифрин, 1993.