

STELMASHUK S.S., VODCHITS N.N. Technical and economic estimation of the technological circuits of a lay-out at melioration finelyput peat cutter Byelorussian Polesia

The following points are discussed and studied in this paper: technical possibility and economical advisability of use of mineral soil sropping out to the surface for sanding-up of surrounding pit bods, general planning of drained bog ground and possibility of use of mineral soil sropping out to the surface for planning of lowered elements of relief.

УДК 662.76

Северянин В.С., Ракецкий В.М., Павленко С.Н.

ИСПАРЯЮЩАЯСЯ ЧАСТИЦА В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

Введение. Имеется ряд технологий, включающий термовлажностную обработку различных объектов, где требуется водяной пар невысоких параметров (давление приблизительно атмосферное, температуры порядка 100...200 °С.). В частности, предлагаются так называемые парогазогенераторы [1...4], выдающие смесь водяного пара и чистых продуктов сгорания. В этом случае теплота продуктов сгорания передается воде, как через стенку газового тракта, так и непосредственным контактом газа и воды. Интенсифицировать теплоотдачу через стенку и в особенности конвективный теплоперенос целесообразно путем организации пульсаций потока газа [5]. Эта физическая задача востребована при конструировании соответствующих аппаратов, например, при определении размеров объема для испарения воды, находящейся в каплевидном состоянии в корпусе устройства.

В данной работе рассмотрены физические особенности поведения частицы в пульсирующем газовом потоке, математические выкладки, необходимые для последующего экспериментального описания процесса. Ввиду сложности явлений принимаются некоторые допущения, основанные на физических представлениях. Конкретные допущения указаны по тексту.

Постановка задачи исследования. На рис. 1 показана расчетная схема воздействия потоком и состояние частицы, где обозначено: 1 – генератор пульсирующего газового потока (например, это выхлоп резонансной трубы камеры пульсирующего горения), 2 – частица (капля) испаряющейся жидкости, 3 – траектория движения частицы, 4 – график изменения размера частицы, 5 – среднерасходная скорость газа, 6 – пульсирующая составляющая скорости газа, x – осевое расстояние, y – отклонение от оси, τ – время.

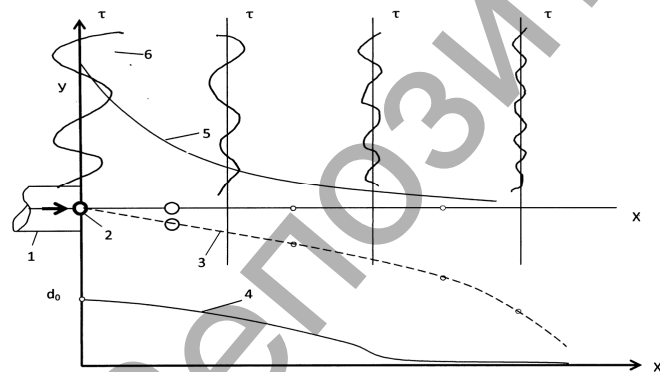


Рис. 1. Расчётная схема

На частицу слева действует динамическая сила потока, движущего со скоростью (W), и сила тяжести ($m g$), где m – масса частицы.

$$W = W_{cp} \pm W_a \cdot \sin \omega \cdot \tau \quad (1)$$

где W_{cp} – среднерасходная скорость;

W_a – амплитуда пульсации скорости;

ω – угловая частота пульсаций.

Скорость частицы в пульсирующем потоке обусловлена так называемым параметром увлечения [4]

$$A = \frac{45 \cdot \rho_r \cdot T \cdot \nu}{4 \cdot \pi \cdot \rho_c \cdot r^2}, \quad (2)$$

который характеризует метод обдувания частицы при помощи пульсаций (в стационарном потоке скорость частицы быстро сравнивается со скоростью потока, и обдувание практически исчезает).

В (2) ρ_r , ρ_c – плотности газа и частицы, T – период колебаний, r – радиус частицы, ν – коэффициент кинематической вязкости газа. При пульсациях от КПГ:

$$T = \frac{4 \cdot L}{c}, \quad (3)$$

где L – длина КПГ, c – скорость звука в газе.

Скорость газового потока w , скорость частицы v , скорость обдувания частицы потоком Z

$$Z = W - v \quad (4)$$

можно представить векторной диаграммой на рис. 2.

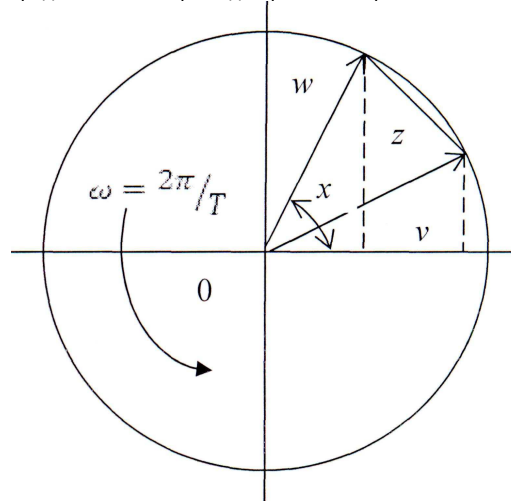


Рис. 2. Векторная диаграмма скоростей газа, частицы, обдувания

Мгновенное значение w , v , Z – это проекции векторов на горизонтальную ось, т.е. проекции сторон треугольника w , v , Z вращающегося вокруг «0» со скоростью

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

Северянин Виталий Степанович, д.т.н., профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Брестского государственного технического университета.

Ракецкий Валерий Михайлович, к.мат.н., декан факультета ФЭИС Брестского государственного технического университета.

Павленко Сергей Николаевич, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология

повернутого на угол

$$Z = \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T},$$

где τ – время.

На движение и испарение капли в основном влияет скорость обдувания Z , для анализа удобнее использовать относительную скорость обдувания [5]:

$$\tilde{Z} = \frac{W - Z}{W_a} = \frac{1}{(1 + A^2)} [\sin \cdot x + A \cdot \cos \cdot x - A \cdot \exp(-A \cdot x)]. \quad (5)$$

Среднее значение величины обдувания синусоидальным потоком:

$$W_{\text{ср}} = \frac{W_a}{\sqrt{2}} \cdot \tilde{Z}.$$

Если колебания создаются пульсациями давления, то амплитуда пульсирующей скорости равна:

$$W_a = \frac{P}{\rho \cdot C_{3a}},$$

где $P = Q_H^p \cdot B / (4v \cdot f)$ (Q_H^p – низшая теплота сгорания топлива, B – его расход, v – объем КПГ, f – частота пульсаций)

$$f = \frac{c}{4 \cdot L}, \quad [5].$$

Влияние начальных условий характеризуется так называемым коэффициентом ослабления начальной скорости частицы [5]:

$$\lambda = \frac{V_0 - (W_{cp})_n}{n \cdot V_0},$$

где V_0 – сумма начальной скорости частицы и постоянной составляющей скорости потока, $(W_{cp})_n$ – постоянная составляющая скорости частицы в n периоде.

Если в n -ном периоде постоянной составляющей в скорости частицы нет, то $\lambda = \frac{1}{n_0}$, где n_0 – номер этого периода. Время пере-

ходного режима равно $\frac{T}{\lambda}$ или $\frac{1}{f \cdot \lambda}$, т.е. $\lambda = 2 \cdot \pi \cdot A / 3$ – чем

больше параметр увлечения (A), тем короче переходной процесс. С учетом этого:

$$Z_{\text{эфф}} = \frac{1}{2} \cdot V_0 \cdot \frac{1}{f \lambda \tau} + \frac{W_a}{\sqrt{2}} \cdot \tilde{Z}. \quad (6)$$

При больших частотах первым слагаемым уравнения (6) можно пренебречь.

Среднерасходная скорость для нашего случая: $W_{cp} = \frac{B \cdot V_f}{F}$,

где V_f – объем продуктов сгорания, F – поперечное сечение выхода КПГ.

По мере удаления от источника пульсаций скорость (W_{cp}) падает. Примем экспоненциальную зависимость этого снижения. Такие же условия примем и для (W_a), что отражается линиями 5 и 6 (рис. 1) (последние развернуты по линиям (τ) для разных мест X):

$$W_{cp} = W_{cp}^0 e^{-ax};$$

$$W_a = W_a^0 e^{-bx},$$

где W_a^0 – амплитуда пульсирующей скорости;

W_{cp}^0 – среднерасходная скорость на выходе из КПГ;

a, b – эмпирические коэффициенты, здесь $a=b=1$.

Основные зависимости процесса. Система дифференциальных уравнений поведения частицы с начальным радиусом d_0 (принимается сферическая частица) включает в себя зависимости:

- движение частицы переменной массы (формула Мещерского);
- уменьшение диаметра испаряющейся капли (формула Срезневского);
- прогрев частицы за счет теплообмена с газовым потоком (движение частицы в двумерном пространстве).

Уравнение движения частицы переменной массы (уравнение Мещерского)

$$m \frac{dv}{d\tau} = \sum F_i - \frac{dm}{d\tau} (v - W'). \quad (7)$$

При равномерном выходе с поверхности отделяющихся масс $W' = 0$, как результирующая всех направлений.

Уравнение Срезневского [6]:

$$\tau = \frac{d_0^2 - d^2}{K}, \quad (8)$$

где τ – время уменьшения диаметра с начального d_0 до текущего d , K – опытный коэффициент, зависящий в основном от режима обтекания капли потоком газа, мм²/сек.

Принимаем линейную зависимость:

$$K = Z \cdot \frac{k'}{1,2},$$

где k' – значение K для $Z = 1,2$ [6], $k' = 1$ мм²/с [6]

По (8) меняющийся диаметр:

$$\frac{d(d)}{d\tau} = - \frac{K}{2 \cdot d}.$$

Формула Мещерского для горизонтального X и вертикального Y направления:

$$m \cdot \frac{dv^X}{d\tau} = F_g - \frac{dm}{d\tau} \cdot v^X;$$

$$m \cdot \frac{dv^Y}{d\tau} = F_T - \frac{dm}{d\tau} \cdot v^Y,$$

где F_g – динамическое действие потока,

F_T – сила тяжести.

Координаты движущейся частицы:

$$x_{(\tau)} = v^X \cdot \tau \int_0^{\tau} v_i^X \Delta\tau;$$

$$y_{(\tau)} = v^Y \cdot \tau \int_0^{\tau} v_i^Y \Delta\tau,$$

где $v^i \cdot \tau$ – отрезок, пройденный частицей за шаг интегрирования $\Delta\tau$,

$$\tau = \sum_0^i \Delta\tau.$$

Масса частицы изменяется следующим образом:

$$\rho_c \cdot \frac{dv}{dt} = \rho_c \cdot \frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\pi}{6} \cdot d^3 \right) = \frac{\pi}{2} \cdot \rho_c \cdot d^2 \frac{d(d)}{dt}. \quad (9)$$

Уравнение теплового баланса:

$$m \cdot c \cdot (T_c - T_0) = \alpha \cdot F \cdot (T_f - T_c), \quad (10)$$

где c – удельная теплоёмкость вещества частицы, α – коэффициент теплоотдачи от газа к поверхности частицы;

T_c, T_0, T_f – температуры: частицы, начальная, пара;

F – поверхность частицы.

Для определения траектории времени существования испаряющихся капель необходимо решить следующую систему дифференциальных уравнений, являющихся физико-математической моделью на основании указанных выше зависимостей (5...10):

$$\begin{cases} m \frac{dv^x}{d\tau} = [(w_{op} \pm w_a \sin x) - v]^2 \frac{C}{2\rho_r} \cdot v - \frac{dm}{d\tau} \cdot v^x; \\ m \frac{dv^y}{d\tau} = m \cdot g - \frac{dm}{d\tau} w^y; \\ \frac{dm}{d\tau} = \frac{\pi}{2} \cdot \rho_u \cdot d^2 \cdot \frac{d(d)}{d\tau}; \\ \frac{d(d)}{d\tau} = -\frac{K}{2 \cdot d}; \\ \frac{dx}{d\tau} = v^x(\tau); \\ \frac{dy}{d\tau} = v^y(\tau); \\ \frac{\pi}{3} \cdot c \cdot \rho_u \cdot (T_u - T_0) = \frac{\alpha}{2} \cdot (T_r - T_u). \end{cases}$$

Результаты численных экспериментов и их обсуждение.

Расчеты проводились при следующих (если не указано иное) параметрах:

- плотность пара $\rho_r = 0,6 \text{ кг/м}^3$;
- коэффициент кинематической вязкости $\nu = 130 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$;
- коэффициент аэродинамического сопротивления шара $K_{ac} = 0,47$;
- удельная теплоемкость газа $c = 0,51 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$;
- коэффициент передачи тепла от газа к капле $\alpha = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

На рис. 3 показан ряд полученных зависимостей.

Из рис. 3а видно, что капля набирает большую горизонтальную скорость (около 80 м/сек), что существенно больше максимальной скорости потока (50 м/сек), но затем теряет её. Объяснение этого факта, видимо, следующее: первоначально капля имеет большой диаметр и мощно увлекается потоком, сохраняя набранную скорость за счет массы. При уменьшении диаметра капли она теряет массу (инерционность) и колебания потока оказывают уже тормозящее влияние, скорость падает и становится меньше средней скорости потока. В силу малой массы капля начинает колебаться совместно с потоком, однако из-за сохраняющейся инерционности (хоть и уменьшающейся) амплитуда этих колебаний меньше амплитуды колебаний потока.

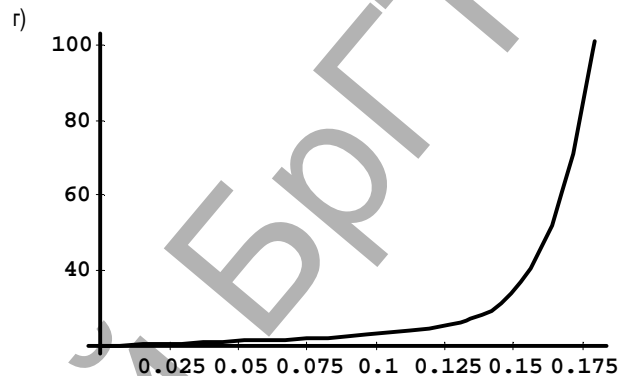
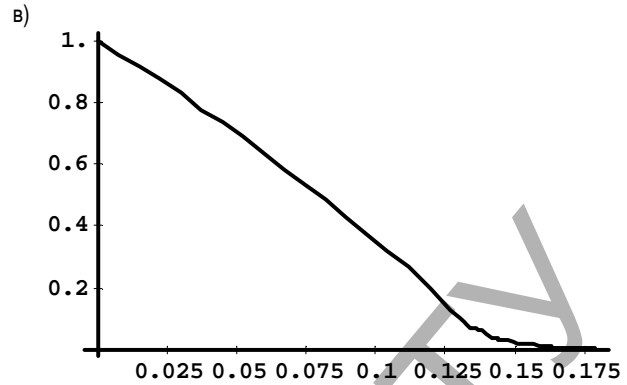
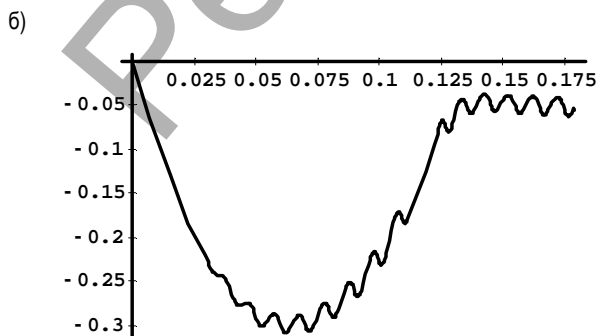
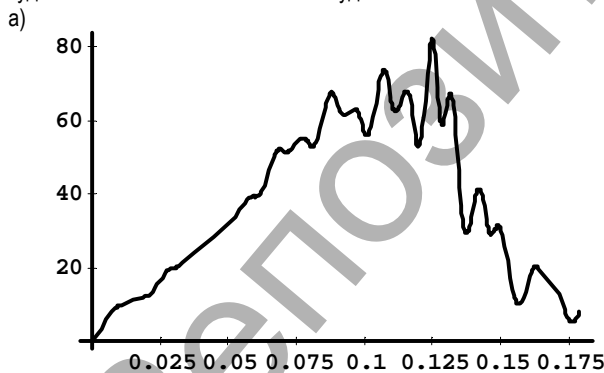


Рис. 3. Изменение характеристик движения капли с течением времени:

- а) горизонтальная составляющая скорости; м/с
- б) вертикальная составляющая скорости; м/с;
- в) относительный диаметр капли; доли;
- г) температура капли, °С

Вертикальная скорость в начале процесса растет (доминирующее воздействие оказывает масса), затем, наоборот, начинает падать, пока не входит в фазу стабилизации (решающее влияние оказывает поток, а не масса), несколько колеблясь под воздействием пульсаций.

Диаметр капли большую часть времени уменьшается почти линейно, но в конце периода существования капли кривая зависимости становится существенно нелинейной. На рис. 4 этот фрагмент зависимости показан под «увеличением».

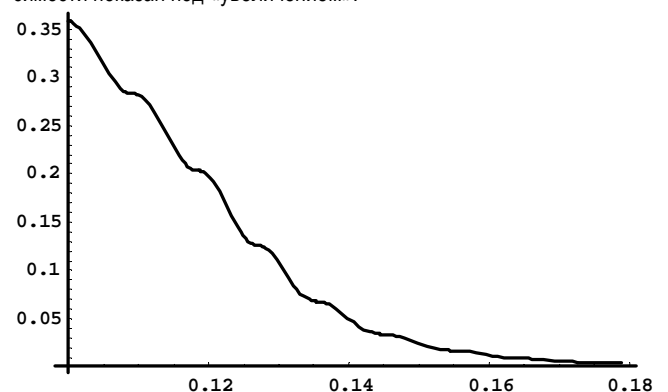


Рис. 4. Заключительный фрагмент кривой изменения относительно диаметра капли

Объяснение такому поведению может быть таким: из-за уменьшения диаметра капли, её поверхности, обдувающее воздействие пульсирующего потока существенно уменьшается. Капля начинает испаряться все медленнее и медленнее. В то же время из рисунка хорошо видно, что скорость испарения тоже подвержена колебаниям под воздействием пульсаций потока. Впрочем, это пульсирующее воздействие имеется и на «линейном» участке зависимости, что подтверждает её фрагмент, представленный на рис. 5.

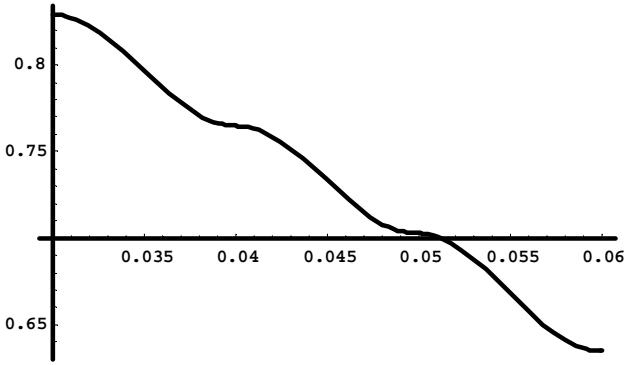


Рис. 5. Фрагмент «линейного» участка кривой изменения относительного диаметра капли

На рис. 3г представлена кривая изменения температуры капли. Ведет себя она вполне предсказуемо: чем меньше диаметр капли, тем скорее растет ее температура. Следует заметить, что если температура газа выше 100°C, то капля никогда не испарится за счет обдува, т.е. её диаметр никогда не достигнет нуля. По понятным причинам всегда наступит момент, что её температура достигнет 100°C и капля перестанет существовать из-за закипания. Это замечание подтверждается результатами численных экспериментов №№4,5.

Численный эксперимент №1. Исследование зависимости изменения диаметра капли и время её существования t_{kr} от частоты пульсации (см. рис. 6, 7).

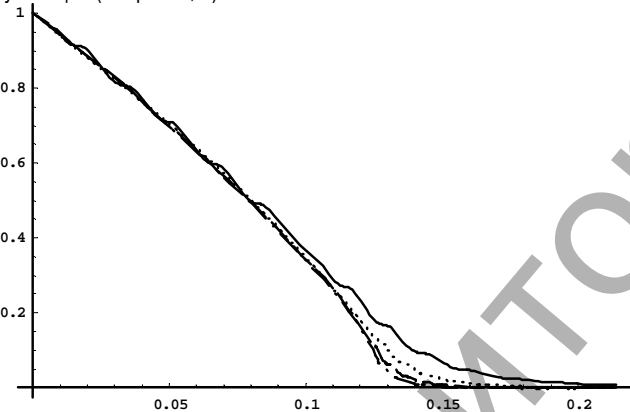


Рис. 6. Зависимость диаметра капли от частоты пульсации f :
 $f = 30$ – сплошная линия ($t_{kr} = 0,214$);
 $f = 50$ – пунктирная линия ($t_{kr} = 0,179$);
 $f = 75$ – штриховая линия ($t_{kr} = 0,161$);
 $f = 100$ – штрих-пунктирная линия ($t_{kr} = 0,152$);
 начальный диаметр капли $d_0 = 1$ мм;
 температура газа $T_r = 500$ °C

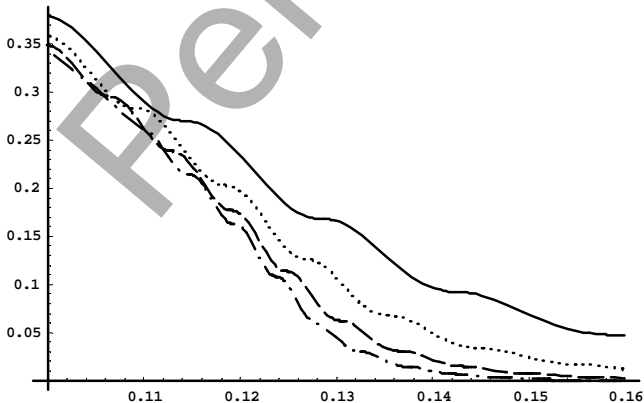


Рис. 7. То же, что и на рис. 6 только при $0,1 \leq t_{kr} \leq 0,16$

Численный эксперимент №2. Исследование зависимости изменения диаметра капли и времени её существования от средней скорости потока (амплитуда колебаний составляет 2/3 от средней скорости) (см. рис. 8).

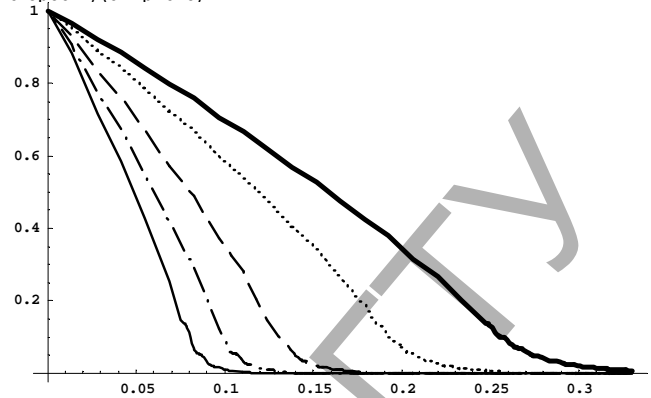


Рис. 8. Зависимость диаметра капли от частоты средней скорости потока W_{cp} при частоте колебаний $f = 50$ сек⁻¹
 $W_{cp} = 15$ – сплошная толстая линия ($t_{kr} = 0,33$);
 $W_{cp} = 20$ – пунктирная линия ($t_{kr} = 0,256$);
 $W_{cp} = 30$ – штриховая линия ($t_{kr} = 0,179$);
 $W_{cp} = 40$ – штрих-пунктирная линия ($t_{kr} = 0,139$);
 $W_{cp} = 50$ – сплошная тонкая линия ($t_{kr} = 0,114$)

Численный эксперимент №3. Исследование зависимости изменения диаметра капли и время её существования от амплитуды колебаний w_a (рис. 9).

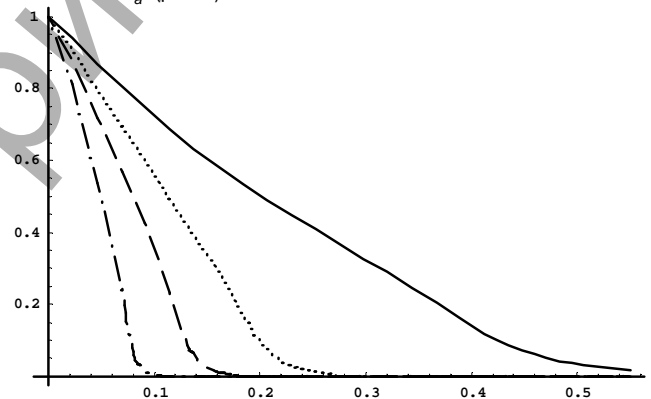


Рис. 9. Зависимость диаметра капли от амплитуды колебаний w_a :
 $w_a = 10$ – сплошная линия ($t_{kr} = 0,55$);
 $w_a = 15$ – пунктирная линия ($t_{kr} = 0,271$);
 $w_a = 20$ – штриховая линия ($t_{kr} = 0,179$);
 $w_a = 30$ – штрих-пунктирная линия ($t_{kr} = 0,107$);
 частота колебаний $f = 50$ сек⁻¹

Численный эксперимент №4. Исследование зависимости времени существования капли от температуры газа. Время существования – это промежуток времени от ввода частицы в поток до достижения момента, при котором $d_0 = 0$ (рис. 10).
 В таблице 1 приведены результаты расчета.

Таблица 1

Температура газа °C	Время существования капли, сек	Относительный диаметр капли в момент достижения температуры 100°C
250	0,192	0,0014
500	0,179	0,0036
750	0,172	0,0052
1000	0,167	0,0081
1250	0,163	0,0091

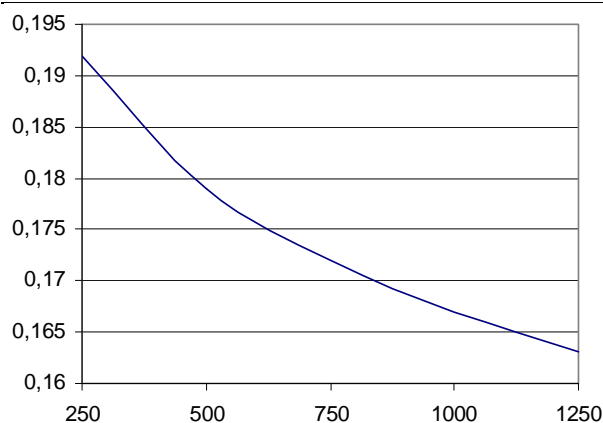


Рис. 10. Зависимость времени существования капли от температуры газа:

начальный диаметр капли $d_0 = 1\text{мм}$;
частота колебаний $f = 50\text{ сек}^{-1}$;
средняя скорость потока $w_{cp} = 30\text{ м/сек}$

Численный эксперимент №5. Исследование зависимости времени существования капли от начальной температуры воды. В таблице 2 приведены результаты расчета: (начальный диаметр капли $d_0 = 1\text{мм}$, частота колебаний $f = 50\text{ сек}^{-1}$, средняя скорость потока $w_{cp} = 30\text{ м/сек}$).

Таблица 2

Температура воды °С	Время существования капли, сек	Относительный диаметр капли в момент достижения температуры 100 °С
20	0,192	0,0036
40	0,179	0,0044
60	0,169	0,0068
80	0,158	0,0146
90	0,146	0,0331
95	0,130	0,1073
99	0,051	0,7001

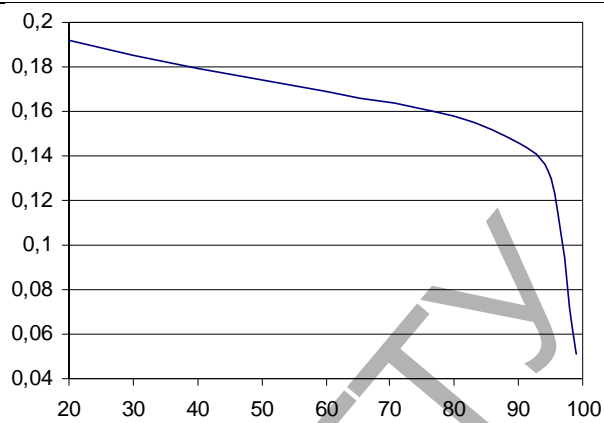


Рис. 11. Зависимость времени существования капли от температуры воды

Заключение

1. Составлена физико-математическая модель поведения испаряющейся капли в пульсирующем газовом потоке, проведены численные эксперименты.
2. Показано интенсифицирующее влияние пульсаций газового потока на процесс испарения капли.
3. Результаты расчета можно использовать при конструировании парогазогенератора, т.е. определять геометрию сепарационного устройства этого теплотехнического аппарата и газоходов, содержащих капельную взвешенную фазу.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Северянин, В.С. Парогазогенератор с пульсирующим горением / В.С. Северянин, Ю.П. Дьяконов, С.Н. Павленко // Инженер-механик. – №1(38). – 2008. – 31 с.
2. Парогазогенератор: патент РБ № 5854 / Северянин В.С., Павленко С.Н., Тромза Е.Н., Партин В.С. – F 22 В 1/00, 2009.
3. Парогазогенератор: патент РБ № 4935 / Северянин В.С., Дьяконов Ю.П., Черников И.А., Горбачёва М.Г., Павленко С.Н., Тромза Е.Н., Партин В.С. – F 22 В 1/00, 2008.
4. Парогазогенератор: патент РБ № 6988 / Северянин В.С., Ракецкий В.М., Павленко С.Н. – F 22 В 1/00, 2010.
5. Попов, В.А. Технологическое пульсационное горение / В.А. Попов, В.С. Северянин. – М.: ЭАИ, 1993.
6. Делягин, Г.Н. Теплогенерирующие установки / Г.Н. Делягин [и др.]. – М.: Стройиздат, 1986.

Материал поступил в редакцию 10.03.11

SEVERYANIN V.S., RAKETSKY V.M., PAVLENKO S.G. Evaporating particle in pulsating gas stream

Physical and mathematical model of evaporating particle behavior in unsteady gas stream is considered. This task is deciding for determination of size of boiler in special apparatus-so called «steamgasgenerator». It is found that little particle is decreasing very slow with some conditions. The results of this estimation may be used for receiving of water steam – hot gas mixture. Such steamgasgenerator is based on pulsating combustion of fuel.

УДК 534.142, УДК 628.3

Новосельцева Д.В.

ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВОК С ПУЛЬСИРУЮЩИМ ГОРЕНИЕМ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ЖИДКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Введение. Сжигание – наиболее распространенный способ термического обезвреживания промышленных отходов.

Различают следующие способы сжигания топлива:

1. Сжигание топлива в плотном фильтрующем слое или слоевое сжигание.
2. В кипящем слое.
3. В потоке воздуха (факельное сжигание).
4. Циклонное сжигание топлива.

Циклонный способ сжигания топлива характеризуется наибольшей скоростью сгорания благодаря весьма малым размером частиц с одновременной интенсификацией массопереноса в зону их горения, путем увеличения скорости их омывания потоком окислителя. При циклонном способе сжигания, в отличие от сжигания в прямотруйном потоке, частица (или капля) топлива циркулирует по организованному контуру потока столько раз, сколько необходимо для ее полного сгорания. Циркуляция газового потока достигается

Новосельцева Дина Владимировна, ассистент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.