

# 07, июль 2017

УДК 621.74.045

### **Исследование процессов, происходящих в псевдокипящем слое огнеупорного материала**

*Устинова Е. А., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Литейные технологии»*

*Научный руководитель: Мандрик А.А., к.т.н., доцент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Литейные технологии»*

*[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)*

При написании данной работы были использованы научная и методическая литература, статьи из зарубежных журналов, а также научные диссертации российских и зарубежных ученых.

Наиболее подробно о геометрии и аэродинамике зернистого слоя пишут: Ю.А. Буевич, Г.А. Минаев, J.F. Davidson, D. Harrison, Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн и В.Б. Кваша. В их работах «Основы техники псевдооживления» [4], «Струйное псевдооживление» [2], «Псевдооживление» [5] на основе практических опытов и теоретических знаний в наиболее полной мере раскрыты все вопросы по интересующей нас теме.

О том, как ведут себя частицы в кипящем слое и с какой скоростью они движутся у центра установки и в окрестностях стенки аппаратов подробно изложили: А.И. Быстрый, В.А. Квицинский, С.И. Крывошеев, В.Н. Макачук, А.И. Топал и И.Н. Хилько в научной статье «Определение полей скоростей и концентрации частиц в кипящем слое» [6].

Расчеты струй псевдооживленного слоя изложены в Докторской диссертации Минаева Г.А. [3]. Для того чтобы посмотреть, что представляет струя, и как она влияет на частицы огнеупорного материала, мы воспользуемся этим источником в дальнейших расчетах.

## Методика проведения исследования

Изучив теоретические данные [4, 5, 2], мы приступили к моделированию процессов происходящих в кипящем слое. Для этого мы строим математическую модель струйных течений в зернистом слое [2].

Итак для начала рассмотрим как будут вести себя частицы при подаче воздуха только снизу (рис. 1). Расчет ведем для плоской струи [2].

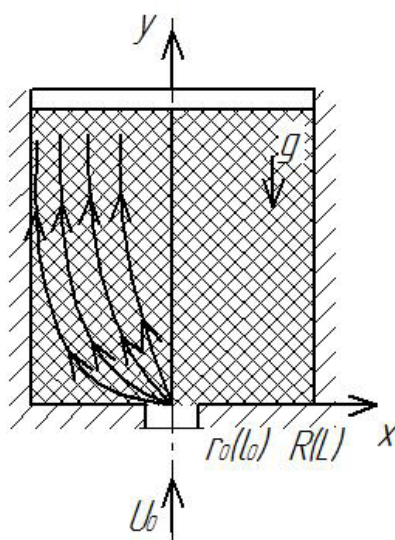


Рис. 1. Расчетная схема

Допустим, что в первом приближении порозность кипящего слоя постоянна, тогда запишем уравнение движения газа в окрестности факела в следующем виде [1]:

$$-\nabla P - \alpha \vec{U} = 0, \operatorname{div}(\epsilon \vec{V}) = 0, \vec{U} = \vec{V} - \vec{W}, \quad (1)$$

где  $\nabla P$  – перепад давления;  $\alpha$  – коэффициент сопротивления;  $\epsilon$  – порозность слоя;  $\vec{U}(\vec{V})$  – скорость легкой фазы в возмущенном состоянии слоя.

Эти уравнения описывают поведение газа в подвижном слое, который образовался движущимися частицами.

К уравнению (1) применим граничные условия, необходимые для решения задачи. Из условия непротекания внешней границы  $x = L$  (стенка аппарата), а также из требования постоянства расхода оживающего газа поступающего через газораспределительную решетку; из требования приближенного постоянства давления на поверхности раздела.

Также введем давление  $P^0$  и скорость газа  $U^0$ , не возмущенные струей:

$$P^0 = \alpha U^0 (H - y) = (1 - \epsilon) \rho_T g (H - y); U_x^0 = 0; U_y^0 = 0, \quad (2)$$

где  $H$  – высота слоя;  $\rho_T$  – плотность твердой фазы;  $g$  – ускорение силы тяжести.

Введем избыточное давление  $\varphi = P - P^0$ . Получаем:

$$\Delta\varphi = 0, \vec{U} = \vec{U}^0 + \vec{U}', \vec{U}' = -\alpha^{-1}\nabla\varphi \quad (3)$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial y} = 0 (y = 0); \frac{\partial\varphi}{\partial x} = 0; \varphi = -\alpha U^0(H - y)$$

Решая эту задачу, мы сможем найти поля давления и относительную скорость газа [6] в промежутках между частицами.

Задача (3) решается методом разделения переменных. Для плоской струи и при  $L \rightarrow \infty$ , суммируя два последних ряда получим:

$$U_x = -\frac{1}{\pi} U^0 \ln \frac{\{[1 - \exp(-\pi\xi)]^2 + 4 \exp(-\pi\xi) \sin^2\left(\frac{\pi\zeta}{2}\right)\}}{[1 + \exp(-\pi\xi) - 2 \exp(-\pi\xi) \cos\left(\frac{\pi\xi}{2}\right)]^2} \quad (4)$$

$$U_y = -\frac{2}{\pi} U^0 \operatorname{arctg} \frac{\exp\left(-\frac{\pi\xi}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi\zeta}{2}\right)}{1 - \exp(-\pi\xi)}$$

где  $\xi = \frac{x-\delta/2}{H}, \zeta = \frac{y}{H}$ .

Результаты расчетов по уравнениям (4) сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Значения составляющих относительной скорости газа в зависимости от  $\zeta$

$\zeta$	$y, (м)$	$H, (м)$	$U_x, (м/с)$	$U_y, (м/с)$	$U, (м/с)$
0,033	0,00331	0,10	2,828	1,993	3,46
0,020	0,00372	0,19	3,115	1,996	3,70
0,015	0,00425	0,28	3,286	1,997	3,85
0,014	0,00495	0,37	3,397	1,997	3,94
0,013	0,00594	0,46	3,475	1,998	4,01
0,014	0,00741	0,54	3,534	1,998	4,06
0,016	0,00985	0,63	3,580	1,998	4,10
0,020	0,01467	0,72	3,617	1,998	4,13
0,035	0,02863	0,81	3,647	1,998	4,16
0,460	0,41375	0,90	3,673	1,999	4,18

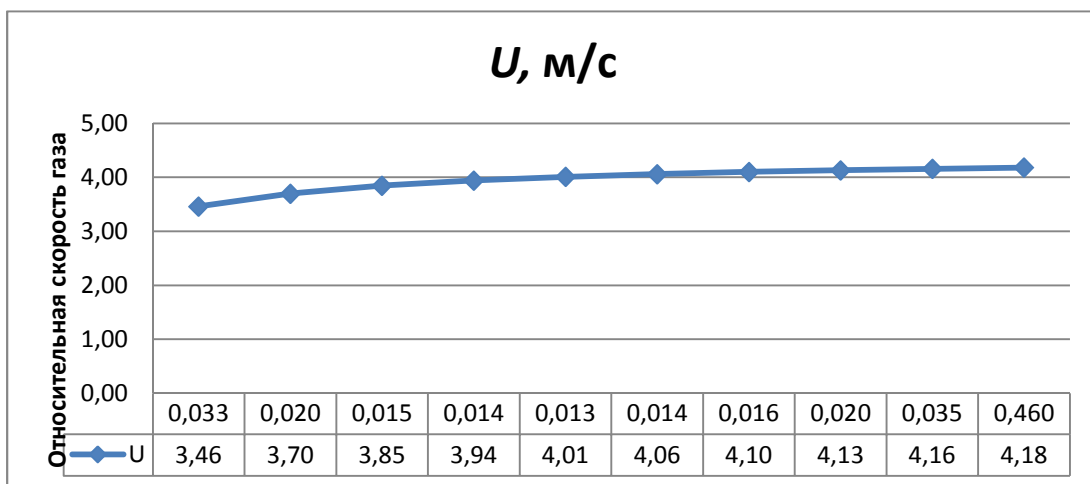


Рис. 2. Зависимость относительной скорости газа от  $\zeta$

### Расчет струи в псевдооживленном слое

Рассчитаем струю воздуха, истекающую в псевдооживленный слой огнеупорного материала из отверстия диаметром 0,8 мм (Рисунок 1). Будем считать, что начальный профиль скорости струи – равномерный. Начальную скорость истечения принимаем равной  $U_0 = 20$  м/с. Число псевдооживления  $W = 1$ . Плотность материала  $\rho_T = 1650$  кг/м<sup>3</sup>.

Рассчитаем струю [3].

Фракционный состав слоя:

Фракции, мм	0,1	0,13	0,16	0,2	0,25
Содержание фракции, %	6	15	27	34	18

1. Эквивалентный диаметр частиц псевдооживленного слоя:

$$\frac{1}{d_3} = \sum \frac{x_i}{d_i} = \frac{0,06}{0,1} + \frac{0,15}{0,13} + \frac{0,27}{0,16} + \frac{0,34}{0,2} + \frac{0,18}{0,25},$$

$$d_3 = 0,17 \text{ мм.}$$

2. Критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{g \cdot d_3^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_T - \rho_G}{\rho_G} = \frac{9,81 \cdot 0,00017^3}{(16 \cdot 10^{-6})^2} \cdot \frac{1650 - 2}{2} = 156,81.$$

3. Скорость на границе газового факела:

$$U_B = \frac{\eta \cdot \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} \cdot \nu}{d_3} = \frac{0,8 \cdot \frac{156,81}{18 + 0,61\sqrt{156,81}}}{0,00017} = 0,46 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

где  $Ar$  – критерий Архимеда.

4. Коэффициент струи  $C_1$ :

$$C_1 = 0,46 Ga^{0,1} = 0,46 \left( \frac{9,81 \cdot 0,00017^3}{16^2 \cdot 10^{-12}} \right)^{0,1} = 0,39,$$

где  $Ga$  – критерий Галилея.

5. Средняя плотность зоны газ – твердые частицы:

$$\rho'_\Pi / \rho_{\Pi 0} = 0,34 - 0,035 \cdot d_3 = 0,34 - 0,035 \cdot 0,17 = 0,334$$

6. Коэффициент струи  $C_2$ :

$$C_2 = C_1 \sqrt{\rho_\Gamma / \rho'_\Pi} = 0,39 \sqrt{2 / 272,84} = 0,0334$$

7. Длина газового факела струи:

$$Y_\Phi = \frac{U_0 r_0}{0,366 U_B C_1} = \frac{20 \cdot 0,4}{0,366 \cdot 0,46 \cdot 0,39} = 122,25 \text{ мм.}$$

8. Абсцисса начального и переходного сечений факела:

$$Y_H = 1,75 \cdot \frac{r_0}{C_1} = 1,75 \cdot \frac{0,4}{0,39} = 1,769 \text{ мм,}$$

$$Y_\Pi = 3,28 \cdot \frac{r_0}{C_1} = 3,28 \cdot \frac{0,4}{0,39} = 3,367 \text{ мм.}$$

9. Для ряда значений  $U_{m_i}$  (от  $0,835U_0$  до  $U_B$ ) при известных  $U_B$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  и  $\rho'_\Pi$  рассчитаем среднюю плотность сечения струи  $\rho_{ср_i}$ , толщину пограничного слоя  $b_i$ , расстояние от сопла  $y_i$  а также толщину газового факела  $b_\Phi$ . Результаты расчета сведем в таблицу 2.

## Результаты расчета изменения осевой скорости и геометрии факела круглой струи

$U_{m_i}$ , м/с	$U_m/U_0$	$A$	$\rho_{ср}$ , кг/м <sup>3</sup>	$b_i$ , мм	$y$ , мм	$b_{\phi}$ , мм
16,70	0,835	0,950	6,49	1,33	3,31	1,22
14,90	0,745	0,940	6,53	1,49	3,72	1,36
13,09	0,655	0,930	6,58	1,68	4,25	1,54
11,29	0,564	0,920	6,65	1,94	4,95	1,78
9,48	0,474	0,910	6,75	2,30	5,94	2,10
7,68	0,384	0,890	6,89	2,81	7,41	2,56
5,87	0,294	0,860	7,12	3,61	9,85	3,28
4,07	0,203	0,800	7,59	5,05	14,67	4,56
2,26	0,113	0,660	8,95	8,35	28,63	7,40
0,46	0,023	0,001	77,14	14,00	413,75	0,20

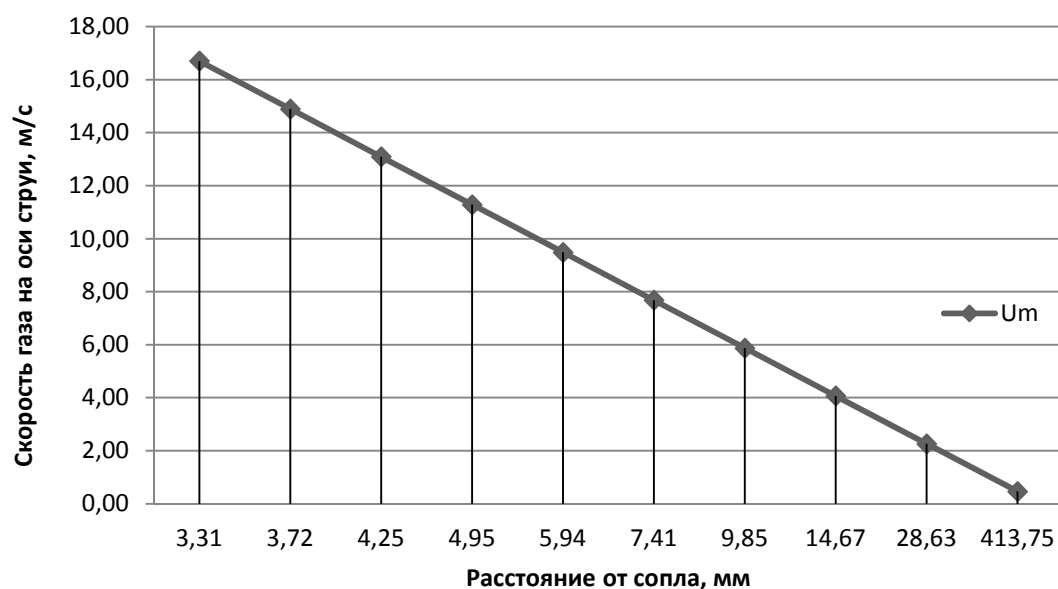


Рис. 3. График зависимости профиля скорости круглой струи от расстояния от сопла  $U_m = f(y)$

10. Определим профиль скорости струи в сечении  $y = 5$  мм.

Из графика (Рисунок 3) находим  $U_m = 10$  м/с. Тогда:

$$b_{\phi y=5} = \frac{U_m - U_B}{U_m + U_B} C_1 \cdot y = \frac{10 - 0,46}{10 + 0,46} 0,39 \cdot 5 = 1,96 \text{ мм.}$$

Профиль скорости в газовом факеле струи рассчитаем по формуле:

$$\frac{\Delta U}{\Delta U_m} = 1 - \left[ 1 - \left( 1 - \frac{x}{b_\Phi} \right)^{1,5} \right]^2$$

а результаты расчета сведем в таблицу 3.

Таблица 3

Результаты расчета профиля скорости струи

$x$ , мм	0,00	0,22	0,44	0,67	0,89	1,11	1,33	1,56	1,78	1,96
$\frac{\Delta U}{\Delta U_m}$	1,00	0,95	0,84	0,74	0,68	0,67	0,71	0,78	0,89	0,00
$\Delta U$ , м/с	9,54	8,48	7,42	6,36	5,30	4,24	3,18	2,12	1,06	0
$U = \Delta U + U_B$ , м/с	10,0	8,94	7,88	6,82	5,76	4,70	3,64	2,58	1,52	0,46

### Расчет параметров газораспределительной решетки по геометрическим параметрам факела

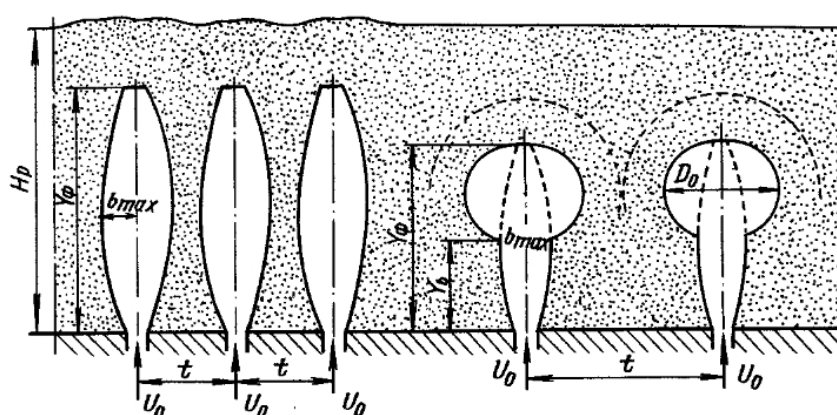


Рис. 4. Идеальная модель работы перфорированной газораспределительной решетки

Рассмотрим, как работает перфорированная газораспределительная решетка. Для того чтобы упростить задачу примем что отверстия решетки имеют круглое сечение. На рисунке 4 представлена идеальная модель работы решетки.

Из [1] следует. Для того чтобы два параллельных факела не сливались необходимо выполнение следующего условия:

$$t_{min} = 2b_{max} \quad (7)$$

При таком минимальном шаге  $t_{min}$  по условию (7) соседние факелы сливаться не будут. Но образовавшиеся пузыри в верхней части газового факела сольются. Для того чтобы они не сливались необходимо чтобы выполнялось следующее условие (8).

$$t_{min} = 2K_э b_{max}, \quad (8)$$

где  $K_э$  – это коэффициент, учитывающий увеличение радиуса влияния струй на структуру слоя.

Чтобы посмотреть на то, как будет влиять число отверстий в решетке на расход и скорость движения оживленных частиц, примем  $\frac{t}{2}$  за радиус влияния одной струи на кипящий слой.

$$n = \frac{F(1-m)}{f_\phi} = \frac{F(1-m)U_B^2}{K_э^2 U_0^2 r_0^2} \quad (9)$$

где  $F$  – площадь решетки;  $f_\phi$  – частота факела.

По формуле (9) можно определить число отверстий в решетке.

Нижнюю и верхнюю оценки  $K_э$  ( $K_{эн}$  и  $K_{эв}$ ), при истечении параллельных струй, формирующих псевдооживленный слой можно получить из условия (8). При предельных режимах истечения:

$$K_{эн} = \frac{KD_0}{b_{max}} \quad K_{эв} = \frac{\eta D_0}{\left(\frac{Y_\phi}{H_p}\right) 2b_{max}} \quad (10)$$

Зная параметр  $\frac{Y_\phi}{H_p}$  мы можем управляя параметром  $K_э$  в пределах  $K_{эн} \leq K_э \leq K_{эв}$  регулировать режимы истечения.

### **Анализ эффективности работы щелевых газораспределителей, воздействующих на слой сбоку**

Проанализировав полученные данные произведем расчет установки псевдокипящего слоя [2], но теперь добавим составляющие от горизонтально направленных факелов.

Зададимся значением  $U_0 r_0, \text{ м}^2/\text{с}$  (значение комплекса, установки).

Протяженность факела в кипящем слое определим по формуле (11):

$$Y_\phi = \frac{U_0 r_0}{0,366 U_B C_1} \quad (11)$$

Найдем максимальный радиус факела в кипящем слое по формуле (12):



$$b_{max} = \frac{0,565U_0r_0}{U_B} \quad (12)$$

Определим горизонтальную дальность струи по формуле (13):

$$x_{гор} = \frac{U_0r_0}{0,585U_B C_1} \quad (13)$$

Найдем шаг между вертикальными прорезями по формуле (14):

$$t = 2x_{гор} + l_{щ} \quad (14)$$

Число прорезей в установке (15):

$$n_{щ} = \frac{\pi(x_M + l_{щ})}{Kb_{max}} \quad (15)$$

По формуле (16) определим расход газа на одну щель:

$$q_0 = \frac{q}{n} \quad (16)$$

Для определения длины щели воспользуемся следующим выражением (17):

$$l_{щ} = \frac{q_0}{\pi U_0 r_0 n_{щ}} \quad (17)$$

Вычислим скорость истечения газа по формуле (18):

$$U_0 = \frac{U_0 r_0}{l_{щ}} \quad (18)$$

И в заключении найдем сопротивление решетки по формуле (19):

$$\Delta P = \xi \frac{U_0^2 \gamma}{2g} \quad (19)$$

Воспользовавшись формулами (7) – (19) выполним расчет и сведем данные в таблицу 4.

## Результаты расчета

$b_{\phi}$ , мм	$n$	$U_p$ , м/с	$Q_0$ , л/с	$U_0 r_0$	$x_{гор}$ , м	$t$ , м	$n_{щ}$
1,22	613	0,50	290,00	0,004	0,04	0,08	985411,3
1,36	153	2,67	1546,67	0,008	0,08	0,15	10250,8
1,54	68,178	4,83	2803,33	0,012	0,11	0,23	1124,4
1,78	38,3	7,00	4060,00	0,016	0,15	0,31	247,0
2,10	24,5	9,17	5316,67	0,020	0,19	0,38	77,6
2,56	17,0	11,33	6573,33	0,024	0,23	0,46	30,3
3,28	12,5	13,50	7830,00	0,028	0,27	0,54	13,8
4,56	9,59	15,67	9086,67	0,032	0,31	0,61	7,0
7,40	7,57	17,83	10343,33	0,036	0,34	0,69	3,8
0,20	6,14	20,00	11600,00	0,040	0,38	0,77	2,2
$q_0$ , л/час		$l_{щ}$			$U_0$ , м/с		
2,423E-06		1,93E-04			20,7355		
4,399E-04		0,02			0,4568		
0,006		0,16			0,0767		
0,035		0,71			0,0227		
0,140		2,23			0,0090		
0,428		5,69			0,0042		
1,098		12,48			0,0022		
2,474		24,62			0,0013		
5,059		44,76			0,0008		
9,586		76,32			0,0005		

**Определение суммарной скорости в зависимости от протяженности щели**

Итак, выполнив весь необходимый расчет и собрав все недостающие данные, мы готовы посмотреть на результат. Будут ли оказывать влияние вертикальные прорезы в гильзе пескосыпа?

Для большей наглядности сведем рассчитанные данные в таблицу 5.

Таблица 5

## Результирующие значения от составляющих скорости

Угол, °	$U_y$ , м/с	$U_x$ , м/с	$U_y$ , м/с	$U_x$ , м/с	$U_y$ , м/с	$U_x$ , м/с
-0,1	2,07010	20,63194	1,99	2,83	4,06	23,46
5	0,43802	0,12957	2,00	3,12	2,43	3,24
10	0,04170	0,06432	2,00	3,29	2,04	3,35
15	0,01475	0,01723	2,00	3,40	2,01	3,41
20	0,00818	0,00366	2,00	3,48	2,01	3,48
25	0,00056	0,00418	2,00	3,53	2,00	3,54
30	0,00222	0,00035	2,00	3,58	2,00	3,58
35	0,00056	0,00117	2,00	3,62	2,00	3,62
40	0,00060	0,00054	2,00	3,65	2,00	3,65
45	0,00045	0,00028	2,00	3,67	2,00	3,67

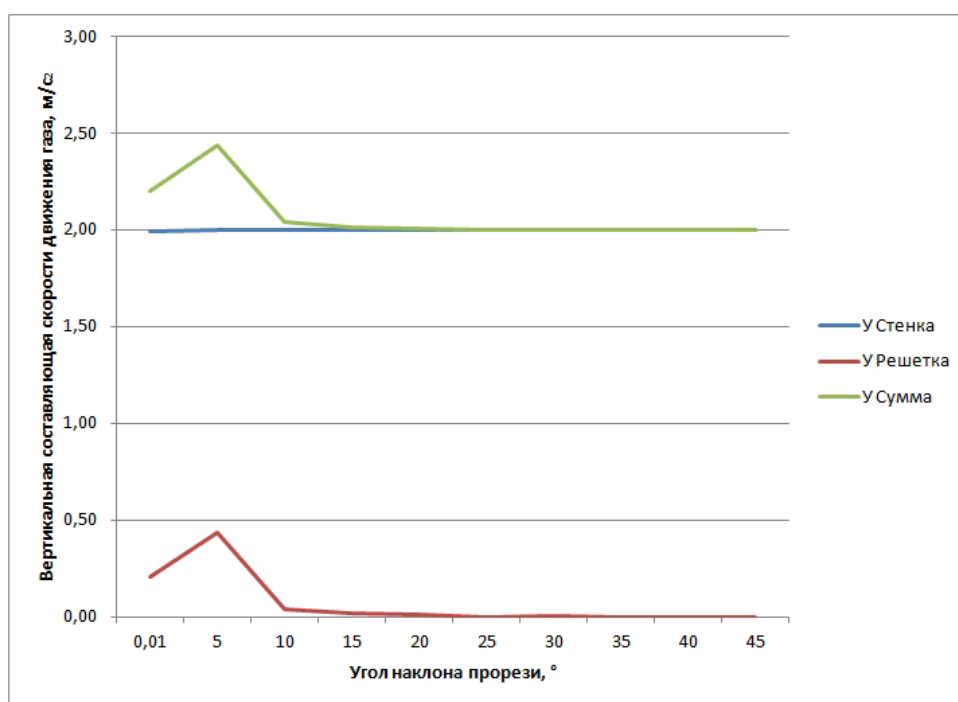
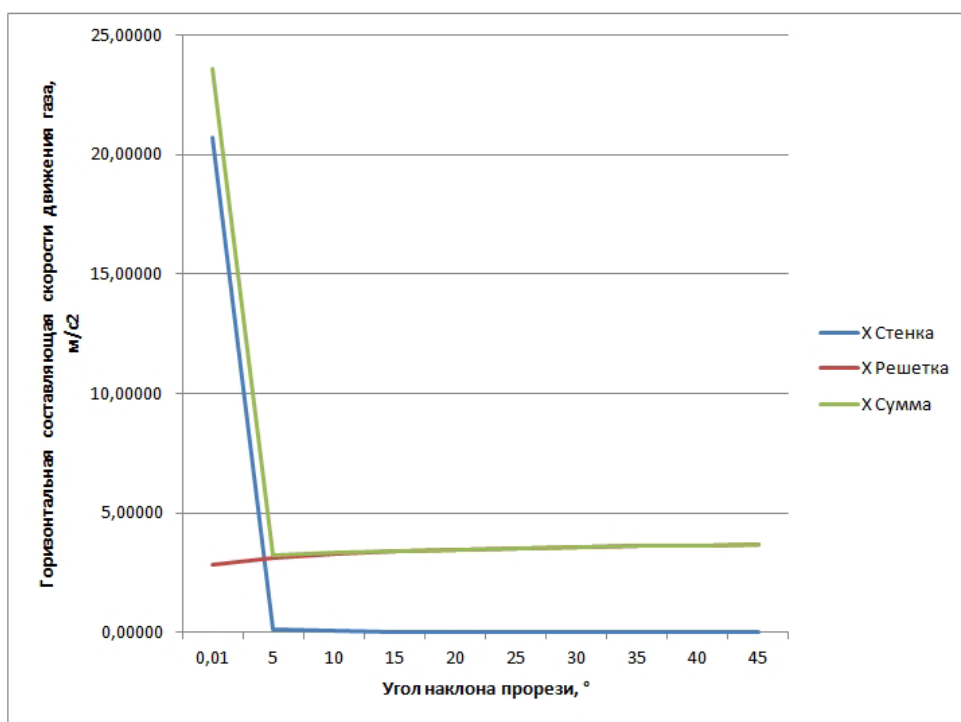


Рис. 5. Окончательные зависимости скорости

## Выводы

1. Произведя расчет и проанализировав методическую литературу можно сделать вывод. На поток частиц в кипящем слое будут оказывать воздействие прорези, которые

имеют уклон от  $0^\circ$  до  $15^\circ$ . Если прорези изготовить под большим углом, то воздействия на составляющую скорости течения газа от решетки прорези от стенки не окажут.

2. При порозности кипящего слоя  $\varepsilon = 0,44$  мы имеем максимальное давление воздуха на слой, что свидетельствует о том, что в этот момент слой огнеупорного материала начинает «кипеть».

### Список литературы

- [1]. Бувич Ю.А., Минаев Г.А., Элленгорн С.М. О струйном течении в низком псевдооживленном слое // Инженерно-физический журнал. 1976. Т. 30. № 2. С. 197–206.
- [2]. Бувич Ю.А., Минаев Г.А. Струйное псевдооживление. М.: Химия, 1984. 136 с.
- [3]. Минаев Г.А. Исследование струйных течений в зернистом слое: дис. ... докт. техн. наук. М.: МИХМ, 1977. 456 с.
- [4]. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления. М.: Химия, 1967. 664 с.
- [5]. Дэвидсон И., Харрисон Д. Псевдооживление. М.: Химия, 1974. 728 с.
- [6]. Быстрый А.И., Квицинский В.А., Крывошеев С.И., Макачук В.Н., Топал А.И., Хилько И.Н. Определение полей скоростей и концентраций частиц в кипящем слое // Современная наука. 2012. № 3. С. 50–55.