

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Новосельцева, Д.В. Суммарное действие нестационарного давления и температуры на скорость химической реакции // Вестник БрГТУ. – 2013. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, геоэкология.
- Общая токсикология / Под ред. А.О. Лойта. – СПб.: ЭЛБИ-СПб., 2006.
- Ахметов, Н.С. Общая и неорганическая химия. – 7-е изд. – М.: Высшая школа, 2009. – 743 с.
- Технологическое пульсационное горение // В.А. Попов, В.С. Северянин, А.М. Аввакумов, В.Я. Лысков, Я.М. Щелоков / Под ред. В.А. Попова – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 320 с.
- Северянин, В.С. Оценка эффективности нестационарных топочных процессов // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство. Теплоэнергетика. Экология. – 2003, №2(20). – С. 33–36.

Материал поступил в редакцию 20.03.14

## SEVERYANIN V.S., NOVOSELTSEVA D.V. Experimental researches of efficiency of neutralization of gas emissions in a pulsing stream

The description and results of experiments on efficiency of neutralization of gas emissions in a pulsing stream are resulted- is presented in the paper.

УДК 621.311.25, 620.9

Янчилин П.Ф.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНЦЕНТРАТОРА «ЛУЧ»

**Введение.** Для повышения эффективности существующих гелиоустановок используются сложные конструкции и дорогие материалы, что повышает срок окупаемости солнечных энергетических установок. Серьезным препятствием на пути эффективной реализации высокого энергетического потенциала солнечного излучения является его низкая плотность, обусловленная большой удаленностью Земли от Солнца. Преодолеть это противоречие можно лишь путем концентрирования излучения.

В научно-исследовательской лаборатории «ПУЛЬСАР» БрГТУ разработана под руководством профессора, д.т.н. Северянина Виталия Степановича гелиоустановка «ЛУЧ». Основными особенностями этой установки являются расщепление параболоида вращения на отдельные конусы и состоящий из них гелиоконцентратор (в виде группы концентрических конусов, имеющих общий фокус на теплоприёмнике), и ориентирование на Солнце механизмом слежения.

**Расчёт модели.** В работах [1, 2] при разработке концентратора было принято условие, что принимаем за основу концентратора форму параболоида и требуется её изменить так, чтобы упростить конструкцию, процесс изготовления и эксплуатации. В ходе геометрических преобразований, показанных на рисунке 1, получаем новый вид концентратора, показанный на рисунке 2. Используя графоаналитический метод, основанный на геометрических построениях, будем отображать лучи, падающие и отраженные зеркалом. При этом используем закон зеркального отражения и будем рассматривать параллельный пучок лучей, распределение излучения в пучке по направлениям принимаем равномерным. Упрощать конструкцию будем расщеплением параболоида вращения на отдельные конусы [3]. Получаем, что концентратор представляет собой совокупность концентрических конусов. Каждый конус – это лента из листового материала, согнутая в виде усечённого конуса, внутренняя поверхность которой выполнена зеркальной. Угол образующей конуса к его оси выбираем таким, чтобы солнечный луч после отражения был направлен в фокус. Понятно, что все конуса имеют один и тот же фокус.

Оптическая система или концентратор гелиоустановки «ЛУЧ» состоит из трех основных элементов: радиусов, конусов, крепежных колец. Их конструктивные размеры определяются при геометрических построениях. Конусы дистанционируются относительно друг друга радиусами, при этом образуется продуваемая прочная пространственная конструкция, имеющая меньшую парусность. Радиусы представляют собой плоские элементы, имеющие специально вырезанные формы, для крепления конусов под требуемым заданным углом, что является необходимым условием для наилучшего приема потока солнечных лучей. Радиусы закреплены на опорных кольцах, которые крепятся к стойкам. Полный расчёт гелиоконцентратора приведен в [3].

Концентраторы, у которых образующая отражающей поверхности является кривой второго порядка – окружностью, параболой, гиперболой и т.п., относятся к группе сильноконцентрирующих систем. Идеальный параболоидный концентратор фокусирует параллельный пучок лучей в точку, что соответствует бесконечно большой степени концентрирования ( $K_C \rightarrow \infty$ ). Геометрию параболоидного отражателя характеризуют двумя независимыми параметрами: диаметром концентратора  $D_K$  (или фокусным расстоянием  $f_K$ ) и углом полуоткрытия  $U_K$  (или отношением  $D_K/f_K$ ) [4]. Третий параметр всегда является зависимым и определяется из уравнения:

$$D_K = \frac{4 \cdot f_K \cdot \sin U_K}{1 + \cos U_K} \quad (1)$$

Данные параметры показаны на рисунке 1, отличаются только индексами:  $p$  – для параболоидного концентратора,  $л$  – для концентратора «ЛУЧ».

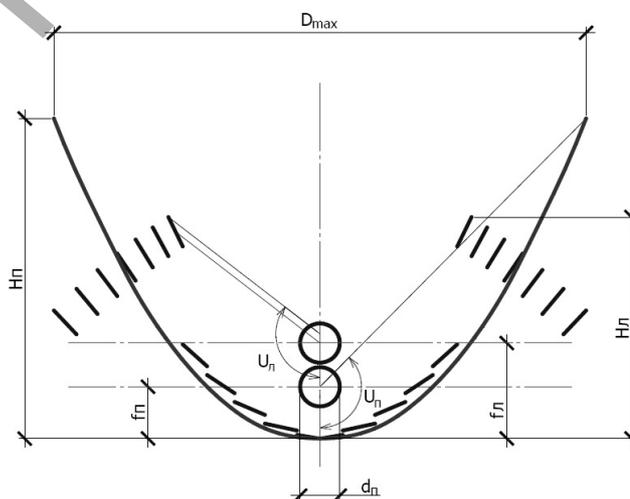


Рис. 1. Совмещение двух концентраторов и их основные размеры

Данные геометрические преобразования параболоидного концентратора проводились в целях упрощения конструкции для процесса изготовления и эксплуатации. Поэтому необходимо сопоставить геометрические характеристики этих двух концентраторов. Важным параметром будет отношение площади отражающей поверхности концентратора (зеркала)  $S_{пов.}$  к площади улавливаемого солнечного потока  $S_{с.п.}$ :

Янчилин П.Ф., ст. преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Брестского государственного технического университета.

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

Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология

Таблица 1. Результаты расчёта параболоида

$S_{\text{пов}}, \text{м}^2$	$h_{\text{п}}, \text{м}$	$p$	$f, \text{м}$	$K_{\text{п}}$
4,555165398	0,1	7,2	3,6	1,006912625
4,593859682	0,15	4,8	2,4	1,015465939
4,647321924	0,2	3,6	1,8	1,027283689
4,714902255	0,25	2,88	1,44	1,042222222
4,795839565	0,3	2,4	1,2	1,060113296
4,889301372	0,35	2,057142857	1,028571429	1,080772891
4,994420203	0,4	1,8	0,9	1,104009255
5,11032405	0,45	1,6	0,8	1,12962963
5,236159937	0,5	1,44	0,72	1,157445468
5,371110771	0,55	1,309090909	0,654545455	1,187276151
5,514406294	0,6	1,2	0,6	1,218951416
5,665329257	0,65	1,107692308	0,553846154	1,252312716
5,82321797	0,7	1,028571429	0,514285714	1,287213784
5,987466248	0,75	0,96	0,48	1,323520625
6,157521601	0,8	0,9	0,45	1,361111111
6,192184516	0,81	0,888888889	0,444444444	1,368773298
6,227055715	0,82	0,87804878	0,43902439 = $f_{\text{п}}$	1,376481525
6,262131494	0,83	0,86746988	0,43373494	1,384234974
6,29740822	0,84	0,857142857	0,428571429	1,392032843
6,332882334	0,85	0,847058824	0,423529412	1,399874344
6,513094025	0,9	0,8	0,4	1,439709873
6,697745733	0,95	0,757894737	0,378947368	1,480526862
6,886466176	1	0,72	0,36	1,522243239
6,92466841	1,01	0,712871287	0,356435644	1,530687787
6,963017355	1,02 = $h_{\text{п}}$	0,705882353	0,352941176	1,539164765
7,001510542	1,03	0,699029126	0,349514563	1,547673628
7,04014555	1,04	0,692307692	0,346153846	1,556213839
7,078920008	1,05	0,685714286	0,342857143	1,564784876
7,274804307	1,1	0,654545455	0,327272727	1,608084813
7,314368253	1,11	0,648648649	0,324324324	1,616830365
7,354056326 = $S_{\text{п}}$	1,12	0,642857143	0,321428571	1,625603356 = $K_{\text{п}}$
7,393866505	1,13	0,637168142	0,318584071	1,634403337
7,433796814	1,14	0,631578947	0,315789474	1,643229874
7,473845314	1,15	0,626086957	0,313043478	1,652082536
7,67579544	1,2	0,6	0,3	1,696723315
7,880430555	1,25	0,576	0,288	1,741957606
8,087547539	1,3	0,553846154	0,276923077	1,787740511
8,296962086	1,35	0,533333333	0,266666667	1,83403129
8,508506744	1,4	0,514285714	0,257142857	1,880792926
8,722029163	1,45	0,496551724	0,248275862	1,927991743
8,937390537	1,5	0,48	0,24	1,975597059
9,154464216	1,55	0,464516129	0,232258065	2,023580877
9,373134472	1,6	0,45	0,225	2,071917616
9,593295407	1,65	0,436363636	0,218181818	2,120583867
9,814849971	1,7	0,423529412	0,211764706	2,169558179
10,0377091	1,75	0,411428571	0,205714286	2,218820862
10,26179093	1,8	0,4	0,2	2,268353822
10,48702014	1,85	0,389189189	0,194594595	2,318140408
10,71332728	1,9	0,378947368	0,189473684	2,36816527
10,94064829	1,95	0,369230769	0,184615385	2,418414245
11,16892395	2	0,36	0,18	2,468874243

$$K_{\text{п}} = \frac{S_{\text{пов.}}}{S_{\text{с.п.}}} \quad (2)$$

Для нахождения основных параметров параболоидного концентратора и площади отражающей поверхности концентратора (зеркала)  $S_{\text{пов.}}$  воспользуемся известными формулами для параболы. Каноническое уравнение параболы в прямоугольной системе координат имеет вид:

$$y^2 = 2px, p > 0, \quad (3)$$

где  $p$  – фокальный параметр параболы, он равен расстоянию от фокуса до директрисы.

Поскольку каждая точка параболы равноудалена от фокуса и директрисы, то и вершина тоже, поэтому она лежит между фокусом и директрисой на расстоянии  $p/2$  от обоих. Отсюда фокусное расстояние  $f_{\text{к}}$ , м:

$$f_{\text{к}} = \frac{p}{2}. \quad (4)$$

Высота параболы  $h$  находится из соотношения:

$$h = \frac{R^2}{2p}, \quad (5)$$

где  $R$  – радиус окружности, описываемой ветками параболы при вращении вокруг оси  $Y$  (параболоида), в плоскости перпендикулярной этой оси на расстоянии  $h$  от вершины параболы, м.

Площадь поверхности параболоида или площадь отражающей поверхности концентратора (зеркала)  $S_{пов.}$  можно найти из уравнения:

$$S_{пов.} = \frac{2\pi}{3p} \cdot (\sqrt{(p^2 + R^2)^3} - p^3). \quad (6)$$

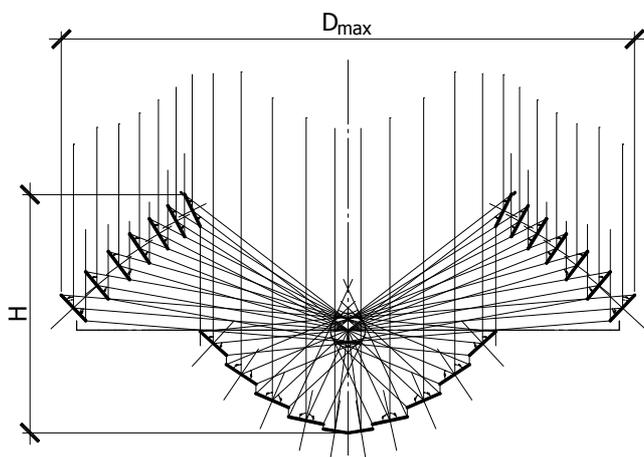


Рис. 2. Концентратор в виде расщепленного параболоида

Поставим задачу найти такой параметр параболы (и соответственно параболоида)  $p$ , при котором его площадь поверхности  $S_{пов.}$  будет стремиться к минимуму. Для этого нужно взять производную от уравнения (6) и определить безусловный максимум функции, приравнявая её к нулю [5].

$$\begin{aligned} S'_{пов.}(p) &= \frac{2\pi}{3} \cdot \frac{1}{p} \left[ 3p\sqrt{(p^2 + R^2)^3} - 3p^2 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{p} (\sqrt{(p^2 + R^2)^3} - p^3) \right] = \\ \dots &= \frac{2\pi}{3p} \cdot \left[ \sqrt{p^2 + R^2} \left( 2p - \frac{R^2}{p} \right) - 2p^2 \right] = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Корень этого уравнения получается  $R = 0$ . Поэтому нужно искать условный (локальный) экстремум, для этого принимаем ограничения, установленные опытным путём. Т.к. радиус  $R$  и параметр  $p$  связаны соотношением (5), то будем задавать диапазон высот от 0,1 до 2 метров. Этот промежуток обусловлен тем, что рассчитываемый идеальный параболоид должен максимально соответствовать геометрическим размерам нашего составного концентратора, а высота  $h_{г}$  рассчитанного гелиоконцентратора «ЛУЧ», составляет 1,016 м. Задаёмся значением радиуса параболоида  $R_{г} = 1,2$  м, что соответствует радиусу гелиоконцентратора «ЛУЧ» и соответственно площадь улавливаемого солнечного потока  $S_{с.п.} = 4,523893421$  м<sup>2</sup>.

Последовательность расчёта: находим площадь  $S_{пов.}$  из формулы (7), параметр  $p$  из (5), фокусное расстояние  $f$  из (4). В таблице 1 приведены некоторые полученные данные.

Из анализа полученных данных видно, что минимальная площадь поверхности достигается при минимальной высоте параболоида, что видно из графика на рисунке 3. При увеличении высоты  $h$  возрастает площадь поверхности и уменьшается фокусное расстояние, что видно из графика на рисунке 4. Очевидно, что с увеличением площади поверхности возрастает и коэффициент  $K_{г}$  (график на рисунке 5).

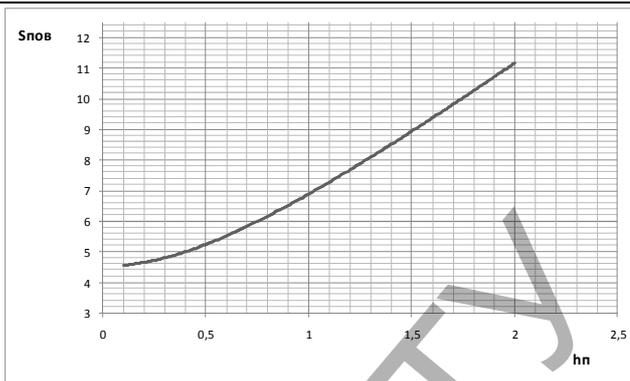


Рис. 3. График зависимости  $S_{пов.}$  от  $h_{п}$

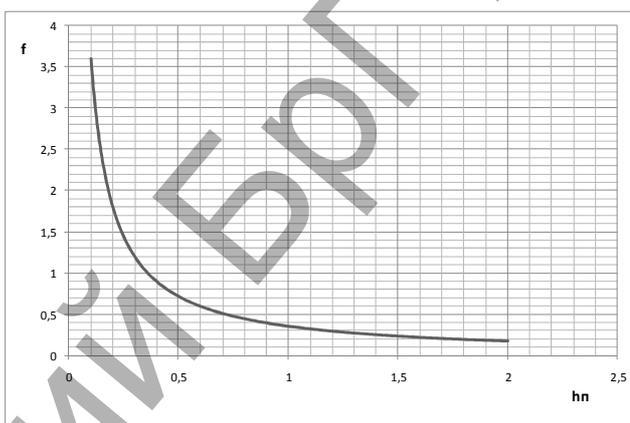


Рис. 4. График зависимости  $f$  от  $h_{п}$

Т.к. радиусы параболоида и гелиоконцентратора «ЛУЧ» равны, то соответственно площадь улавливаемого солнечного потока  $S_{с.п.}$  у этих двух концентраторов одинаковая. Это означает, что тепловая мощность  $Q$  принятая, отражённая, сконцентрированная и «утилизированная» (переданная теплоносителю в теплоприёмнике) у них так же одинакова. С экономической точки зрения невыгодно производить концентратор с большими геометрическими размерами, если его тепловая мощность соответствует концентратору с меньшими габаритами. Поэтому нужно учитывать соотношение между геометрическими параметрами концентратора ( $R, h, f$ ) для данной тепловой мощности гелиоустановки.

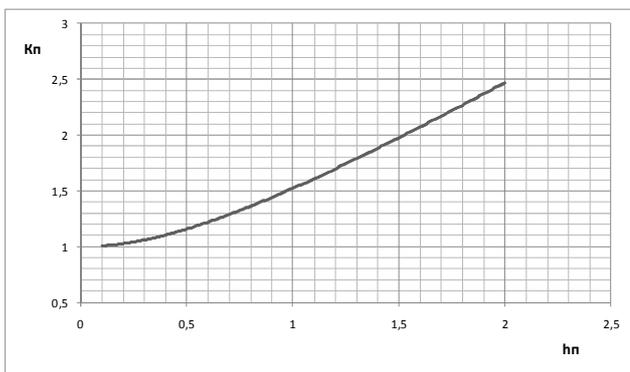


Рис. 5. График зависимости  $K_{г}$  от  $h_{п}$

Сопоставим рассчитанные ранее графоаналитическим методом геометрические параметры гелиоконцентратора «ЛУЧ» с полученными параметрами для параболоидного концентратора (таблица 1, выделенные строки).

Рассчитанные геометрические параметры гелиоконцентратора «ЛУЧ» (из таблицы 2):

Таблица 2. Расчёт конусов гелиоконцентратора «ЛУЧ»

№ конусов	Диаметр большой, мм $D_6$	Диаметр меньший, мм $D_M$	Ширина, мм $a$	Радиус развертки, мм $R_p$	Дуга раз- вертки, мм $L$	Угол раз- вертки, $\alpha$	$\beta=360-\alpha$	Площадь поверхности, мм $S$	Площадь поверхно- сти, м $S$
«Верхние» конуса									
1	2408	2204	150	1771	7565	115,2	244,8	1086676,9	1,09
2	2204	2012	150	1722	6924	129,6	230,4	993371,6	0,99
3	2012	1836	150	1715	6321	148,8	211,2	906663,6	0,91
4	1836	1672	150	1679	5768	163,2	196,8	826553,0	0,83
5	1672	1528	150	1742	5253	187,2	172,8	753982,2	0,75
6	1528	1384	150	1592	4800	187,2	172,8	686123,8	0,69
7	1384	1252	150	1573	4348	201,6	158,4	621092,9	0,62
«Нижние» конуса									
8	1260	1028	150	815	3958	81,6	278,4	539097,3	0,54
9	1028	780	150	622	3230	62,4	297,6	426000,0	0,43
10	792	516	150	430	2488	28,8	331,2	308190,2	0,31
11	516	220	150	261	1621	4,8	355,2	173415,9	0,17
12	220	0	110	110	691	0,0	360,0	38013,3	0,04
							$\Sigma$	7359180,8	7,36

- общая высота  $h = 1,016$  м;
  - диаметр максимальный  $D = 2,4$  м, радиус  $R = 1,2$  м;
  - фокусное расстояние  $f = 0,438$  м;
  - площадь поверхности зеркал  $S_{пов.} = 7,3591$  м<sup>2</sup>;
  - коэффициент  $K_n = 1,6267$ .
- Рассчитанные геометрические параметры параболоидного концентратора при одинаковой высоте  $h$ :

- общая высота  $h = 1,02$  м;
- диаметр максимальный  $D = 2,4$  м, радиус  $R = 1,2$  м;
- фокусное расстояние  $f = 0,3529$  м;
- площадь поверхности зеркала  $S_{пов.} = 6,96302$  м<sup>2</sup>;
- коэффициент  $K_n = 1,5392$ .

Рассчитанные геометрические параметры параболоидного концентратора при одинаковом фокусе  $f$ :

- общая высота  $h = 0,82$  м;
- диаметр максимальный  $D = 2,4$  м, радиус  $R = 1,2$  м;
- фокусное расстояние  $f = 0,439$  м;
- площадь поверхности зеркала  $S_{пов.} = 6,22705$  м<sup>2</sup>;
- коэффициент  $K_n = 1,3764$ .

Рассчитанные геометрические параметры параболоидного концентратора при одинаковой площади поверхности зеркала  $S_{пов.}$  и одинаковом коэффициенте  $K_n$ :

- общая высота  $h = 1,12$  м;
- диаметр максимальный  $D = 2,4$  м, радиус  $R = 1,2$  м;
- фокусное расстояние  $f = 0,3214$  м;
- площадь поверхности зеркала  $S_{пов.} = 7,35405$  м<sup>2</sup>;
- коэффициент  $K_n = 1,6256$ .

Возможно наилучшее соотношение между геометрическими параметрами концентратора для определённой тепловой мощности гелиоустановки учитывает коэффициент  $K_n$  (отношение площади отражающей поверхности концентратора  $S_{пов.}$  к площади улавливаемого солнечного потока  $S_{с.п.}$ ). Опытным путём установлено, что коэффициент  $K_n$  должен быть в пределах от 1,3 до 1,7.

**Заключение.** Анализируя приведённые геометрические параметры двух концентраторов, можно сделать следующие выводы:

1. Достигнута поставленная цель создания новой конструкции концентратора — геометрически преобразовать параболоидный концентратор так, чтобы упростить его конструкцию для изготовления и эксплуатации.

2. При равных геометрических и оптико-энергетических параметрах, разработанная конструкция гелиоконцентратора «ЛУЧ», близка к идеальной параболоидной, например максимальное отклонение высоты концентратора составляет менее 10 см при диаметре в 2,4 м.
3. По величине фокусного расстояния можно оценить степень «освещённости» поверхности теплоприёмника (его равномерности) помещённого в этой точке. Чем больше фокус, тем меньшей поверхностью теплоприёмник воспринимает концентрированное излучение. И наоборот, чем меньше фокусное расстояние, тем большая часть поверхности теплоприёмника освещена.
4. Наиболее близкое совпадение геометрических и оптико-энергетических параметров двух концентраторов получается при одинаковых площади поверхности зеркала  $S_{пов}$  и коэффициенте  $K_n$ , что позволяет нам записать математическое выражение концентратора «ЛУЧ» в виде канонического уравнения параболы:  $y^2 = 2px = 2 \cdot 0,642857143x = 1,285714286x$ . (8)
5. Явным преимуществом разработанной конструкции является улучшение аэродинамических свойств, а именно уменьшение ветровой нагрузки на строительные конструкции (большая продуваемость конструкции концентратора). Это позволяет производить концентратор с большими поперечными размерами и повысить тепловую мощность одной гелиоустановки.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гелиоустановка: пат. 3998 Респ. Беларусь, МПК F 24J 2/00 / Северянин В.С.; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т – № 20070327 заявл. 02.05.2007, опубл. 01.08.2007.
2. Гелиоконцентратор: пат. 4296 Респ. Беларусь, МПК F 24J 2/00 / Северянин В.С.; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т – № 20070576 заявл. 03.08.2007, опубл. 17.12.2007.
3. Особенности расчета оптической системы гелиоустановки «Луч» / В.С. Северянин, П.Ф. Янчилин // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2010. – № 2: Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – С. 74–77.
4. Андреев, В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / В.М. Андреев, В.А. Гриппес, В.Д. Румянцев – Л.: Наука, 1989. – 310 с.
5. Исследование оптических и теплофизических параметров гелиоустановок с целью оптимизации их использования / П.Ф. Янчилин // Справка-отчет №5 о научно-исследовательской работе, договор с БРФФИ № Т12МВ-048. – 2013. – 22 с.

Материал поступил в редакцию 11.03.14

## YANCHILIN P.F. Mathematical model of the concentrator "ЛУЧ"

In article the mathematical description of the form of a helio-concentrator "ЛУЧ" is resulted. The calculated geometrical parametres of a helio-concentrator are compared with the received parametres for the ideal paraboloidal concentrator.

УДК 697.9

Зафатаев В.А.

## ЭКСЕРГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОРЕБРЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

**Введение.** Реальные теплоиспользующие установки потребляют значительное количество энергии вследствие низкого качества преобразования энергии в оборудовании, неправильной организации процесса и низкой степени рекуперации. Это относится и к вспомогательному энергетическому оборудованию обеспечения микроклимата в рабочей зоне помещений предприятий различного назначения.

Республиканская программа энергосбережения на 2011-2015гг., утверждённая Постановлением СМ РБ за №1882 от 24.12.2010г., содержит требования относительно достижения экономии ТЭР в указанный период в размере 7,1 млн т.у.т за счёт разработки и внедрения энергосберегающих мероприятий, в том числе экономии 1250 тыс. т.у.т за счёт оптимизации систем теплоснабжения. Кроме того, согласно программе стратегии развития энергетического потенциала РБ до 2015г., утверждённой Постановлением СМ РБ за №1180 от 09.08.2010г., удельные затраты на производство «продукта» должны быть снижены на 20% за счёт реализации оптимальных схем энергоснабжения.

Таким образом, важность энергосбережения в условиях недостатка в стране собственных источников энергоресурсов и роста цен на энергоносители побуждает к изучению особенностей процесса передачи теплоты и в дальнейшем к его интенсификации и удешевлению.

Интенсификация теплообмена чаще всего осуществляется конструктивными методами увеличения теплопередающей стенки со стороны рабочей среды с низким коэффициентом теплоотдачи. Многообразие существующих промышленных образцов интенсифицированных поверхностей теплообмена свидетельствует о том, что их внедрением занимались не учёные-теплотехники, а технологи.

Исследованиям конвективной теплоотдачи теплопередающих поверхностей посвящено множество работ. В отечественной практике к таким работам прибегали известные учёные Пиир А.Э., Дрейцер Г.А., Кунтыш В.Б., Кузнецов Е.Ф., Юдин В.Ф., Стасюлявичус Ю.К., Письменный Е.Н., Ефимов А.Л. и др. Анализ работ [1, 2, 3, 4, 5], посвящённых исследованиям конвективной теплоотдачи ребристых поверхностей, позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Трубчатые теплообменные поверхности, интенсифицированные трапециевидными рёбрами, обладают максимальной теплоотдачей по сравнению с другими типами оребрения в одинаковых условиях, а также характеризуются простотой изготовления и минимальной массой.
2. При одинаковой высоте рёбер различного профиля разница в значениях коэффициента конвективной составляющей теплоотдачи  $\alpha_{конв}$  находится в пределах 5%.
3. На величину  $\alpha_{конв}$  большее влияние оказывает размер ребра, а не его форма.
4. По затратам тепловой энергии биметаллические ребристые трубы (далее БРТ) выигрывают у стальных ребристых на 50–70%.
5. При заданной постоянной теплопроизводительности стоимости стального, алюминиевого и медного оребрения соотносятся как 1,2:1,0:2,0.
6. Спиральная накатка рёбер имеет большую технологичность в изготовлении и максимально возможные значения  $\alpha_{конв}$  по сравнению с другими типами одиночных рёбер. Следует отметить, что в России не налажен промышленный выпуск труб со спиральной накаткой оребрения.
7. Возможности роста значения  $\alpha_{конв}$  ограничены высотой ребра  $h$ , т.к. при больших значениях высоты ребра температура его торца приближается по величине к температуре омывающего потока.
8. Для шахматных пучков: величина  $\alpha_{конв}$  падает при увеличении высоты ребра  $h$  и уменьшении шага рёбер  $S$ , т.е. при возрастании степени оребрения  $\Phi_{ор}$  теплопередающей поверхности.
9. Из анализа конфигураций производимых БРТ значение  $\Phi_{ор} = 15,2$  оптимально с точки зрения учёта величины  $\alpha_{конв}$  и гидравлических сопротивлений  $\Delta P$  на прокачку омывающего теплоносителя. Оптимальные размеры ребра в этом случае соотносятся как 
$$\frac{h}{\Delta_p} = \left( \frac{2\lambda_p}{\alpha_{пр}\Delta_p} \right)$$
, где  $\Delta_p$  – толщина ребра, м;  $\lambda_p$  – коэффициент его теплопроводности;  $\alpha_{пр}$  – приведенный коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности, Вт/м<sup>2</sup>·°С. Увеличение значения коэффициента оребрения на 40 % при  $\Phi_{ор} > 15$  сопровождается уменьшением значения коэффициента теплопередачи на 12 %.
10. С увеличением числа поперечных набегающему потоку рядов трубок  $Z_p$ ,  $\alpha_{конв}$  растёт медленнее, чем металлоёмкость, а затраты мощности на прокачку набегающего потока практически не зависят от числа рядов, но возрастают при увеличении степени оребрения  $\Phi_{ор}$ . Одновременно с увеличением коэффициента теплоотдачи на 30...40 % имеет место повышение гидравлического сопротивления в 1,5...2,5 раза.

Биметаллическая трубка (рис. 1) воздухонагревателей КСк представляется следующей конфигурацией: внутренняя труба – сталь, наружная ребристая – алюминий [6].