

*Проведено аналіз впливу геометричних розмірів та оптичних властивостей U-подібного «темного» трубного випромінювача на його енергетичну ефективність. Встановлено, що у досліджуваних межах енергетична ефективність «темного» трубного випромінювача може бути збільшена за рахунок збільшення температури та діаметра пальникової гілки, зменшення діаметра гілки, що відходить, збільшення коефіцієнта поглинання поверхні корпусу відбивача та поверхні пола приміщення*

*Ключові слова: випромінювач, коефіцієнт поглинання, U-подібний випромінювач, енергетична ефективність, відбивач*

*Проведен анализ влияния геометрических размеров и оптических свойств U-образного «темного» трубного излучателя на его энергетическую эффективность. Установлено, что в исследуемых пределах энергетическая эффективность «темного» трубного излучателя может быть увеличена путем увеличения температуры и диаметра горелочной ветви, уменьшения диаметра уходящей ветви, увеличения коэффициента поглощения поверхности корпуса отражателя и поверхности пола помещения*

*Ключевые слова: излучатель, коэффициент поглощения, U-образный излучатель, энергетическая эффективность, отражатель*

# ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕПЛОВУЮ МОЩНОСТЬ U-ОБРАЗНОГО ТРУБНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

**А. В. Яковлева**

Ассистент

Кафедра теплоэнергетики

Запорожская государственная инженерная академия

пр. Ленина, 226, г. Запорожье, Украина, 69006

E-mail: yakovleva\_sasa@mail.ru

## 1. Введение

При отоплении помещений большого объема в Украине и за рубежом широкое распространение получили инфракрасные обогреватели [1, 2].

Системы отопления и обогрева с газовыми инфракрасными излучателями обеспечивают необходимый микроклимат преимущественно в помещениях производственных зданий промышленных и сельскохозяйственных предприятий, на отдельных рабочих местах, открытых и полуоткрытых площадках, а также отдельных общественных зданий, когда устройство других систем отопления по техническим и технико-экономическим соображениям является невозможным или нецелесообразным [3].

Преимущества лучистого отопления при применении газовых инфракрасных излучателей обеспечиваются за счет возможности понижения температуры воздуха, поддерживаемой в помещении; существенного сокращения объема воздуха, нагреваемого до необходимой температуры при локальном обогреве рабочих мест и отдельных зон помещения; малой инерционности и гибкости управления систем; высокого общего коэффициента полезного действия излучателей. В результате, стоимость энергоресурсов, используемых на отопление производственных помещений, может быть сокращена в 2,5–3 раза, что в настоящее время является одним из основных обуславливающих факторов.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Несмотря на известные преимущества лучистого отопления, актуальной является задача повышения энергетической эффективности U-образных трубных излучателей. Одним из показателей энергетической эффективности может быть принято количество тепловой энергии, излучаемой от всех поверхностей излучателя на поверхность пола или другую расчетную поверхность. Поиск условий, обеспечивающих более высокий этот показатель, возможен на основе метода математического моделирования теплообмена излучением в системе поверхностей: «излучающая труба – отражатель – поверхность пола помещения». Представляет интерес провести анализ влияния геометрических размеров и оптических характеристик излучателя на его энергетическую эффективность. Исходной научной базой для развития и внедрения систем лучистого отопления послужили работы Мачкаши А., Банхиди Л., Родина А. К. [4–6].

Недостаточное решение вопросов, касающихся теплообмена в самих трубчатых излучателях, привели к тому, что наряду с позитивными публикациями [1], появляются публикации, ограничивающие область их применения [7]. Эффективность газового лучистого отопления зависит от многих факторов [8], в том числе от разработки рациональной конструкции излучателей и их размещения в отапливаемом помещении.

Одной из первых является публикация [9], посвященная теплотехническому расчету «темных» прямых и U-образных трубных излучателей. За основу принята методика расчета «светлых» излучателей, которая не учитывает конструктивные особенности излучателей и оптические свойства системы, что приводит к ошибочным результатам.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является изучение влияния геометрических характеристик и оптических свойств конструкции U-образного «темного» трубного излучателя с симметричным расположением горелочной и уходящей ветвей на его тепловую мощность.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Уточнить методику расчета U-образного «темного» трубного излучателя с учетом особенностей лучистого теплообмена в системе поверхностей «излучающая труба – отражатель – поверхность пола помещения».

2. Провести анализ влияния геометрических характеристик излучающей системы на тепловую мощность U-образного «темного» трубного излучателя.

3. Провести анализ влияния оптических свойств излучающей системы на тепловую мощность U-образного «темного» трубного излучателя.

4. Сформулировать рекомендации по выбору рациональной конструкции при проектировании U-образного «темного» трубного излучателя.

### 4. Анализ влияния различных факторов на тепловую мощность излучателя

Конструктивно U-образный трубный излучатель выполнен следующим образом (рис. 1).

Цифрами обозначены поверхности, участвующие в лучистом теплообмене. Горелочная ветвь излучающей трубы наружным диаметром  $d_1$  (поверхность  $F_1$ ) и уходящая ветвь диаметром  $d_1'$  (поверхность  $F_1'$ ) участвуют в лучистом теплообмене с внутренней поверхностью  $F_2$  отражателя, внутренней поверхностью отопляемого помещения и друг с другом. В свою очередь, внутренняя поверхность отражателя участвует в лучистом теплообмене с наружными поверхностями горелочной и уходящей ветвей излучающей трубы и поверхностью отопляемого помещения. Кроме того, поскольку поверхность  $F_2$  вогнутая, она участвует в лучистом теплообмене «сама с собой».

Для анализа лучистого теплообмена между поверхностями  $F_1, F_1', F_2$  и реальной поверхностью отопляемого помещения введем условную расчетную плоскую поверхность  $F_3$  прямоугольной формы, ширина которой равна ширине излучателя в основании, а длина – длине излучателя. Это возможно, так как весь лучистый поток от поверхностей  $F_1, F_1', F_2$  на реальную

расчетную поверхность помещения «проходит» через эту условную поверхность.

При известных геометрических параметрах излучателя, температурах поверхностей и их оптических характеристиках (коэффициентах поглощения) задача оценки энергетической эффективности излучателя сводится к определению мощности лучистого потока и определению условий, обеспечивающих ее увеличение. Это возможно при анализе лучистого теплообмена между указанными поверхностями.

При разработке математической модели принимаем следующие допущения:

- поверхности  $F_1, F_1', F_2, F_3$  изотермические и неограниченно протяженные в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа. Это позволяет не учитывать «концевые эффекты», т.е. перенос лучистой энергии по длине излучателя и ее «потерю» с концов излучателя;
- поверхности  $F_1, F_1', F_2, F_3$  серые; излучение их диффузное и подчиняется закону Ламберта;
- поверхности  $F_1, F_1', F_2, F_3$  разделены лучепрозрачной средой.

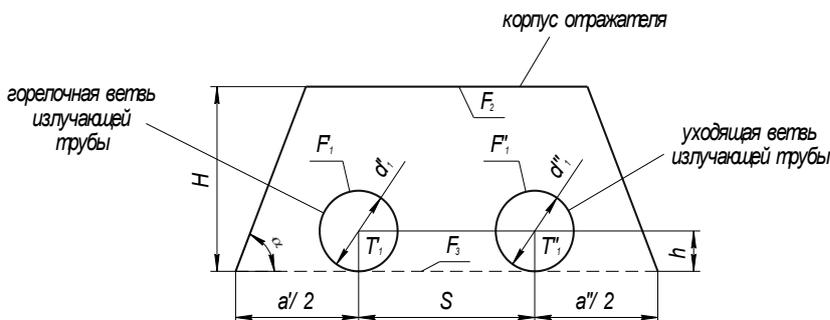


Рис. 1. Конструктивная схема U-образного трубного излучателя (поперечный разрез)

С учетом принятых допущений мощность результирующего потока излучения  $Q$  [Вт/м] на единицу длины 1 м излучателя для любых двух поверхностей, участвующих в лучистом теплообмене, определяется по известной зависимости [10]

$$Q_{ij} = C_{ij}^{прив} \phi_{ij} F_i (T_i^4 - T_j^4), \tag{1}$$

где  $\phi_{ij}$  – угловой коэффициент излучения между поверхностями  $F_i$  и  $F_j$ ;  $F_i$  – величина площади излучающей поверхности,  $m^2$ ;  $F_j$  – величина площади воспринимающей поверхности,  $m^2$ ;  $T_i, T_j$  – температуры поверхностей  $F_i$  и  $F_j$ , К;  $C_{ij}^{прив}$  – приведенный коэффициент излучения системы двух поверхностей  $F_i$  и  $F_j$ ,  $Вт/(m^2 K^4)$ , определяется по формуле [10]

$$C_{ij}^{прив} = \frac{C_0}{100^4 \left[ 1 + \phi_{ij} \left( \frac{1}{A_i} - 1 \right) + \phi_{ji} \left( \frac{1}{A_j} - 1 \right) \right]}, \tag{2}$$

где  $\phi_{ij}, \phi_{ji}$  – угловые коэффициенты собственного излучения соответствующих поверхностей.

Численные значения  $\phi_{ij}, \phi_{ji}$  определяются с использованием свойств взаимности и замыкаемости известных аналитических зависимостей для рассматриваемых поверхностей. В частности, для расчета лучистого

теплообмена от U-образного трубного излучателя по расчетным формулам, приведенным в [11].

Для анализа лучистого теплообмена принимаем, что известны температуры  $T_1$  горелочной и  $T_1'$  уходящей ветвей излучающей трубы (необходимо заметить, что точное определение численных значений  $T_1$  и  $T_1'$  является предметом специальных исследований и здесь не рассматривается) и лучевоспринимающей поверхностью  $F_3$ . Расчетная температура отражателя  $T_2$  определяется по формуле, приведенной в [12], для U-образного трубного излучателя, учитывающей наличие двух ветвей (горелочной и уходящей) излучающей трубы.

При определении температуры  $T_2$  учитываем тепловые потери  $Q_2$  через стенки отражателя, имеющие место в реальных условиях:

$$(Q_{1'2} + Q_{1'2'}) - Q_{23} = Q_2, \tag{3}$$

$$Q_{23} = (Q_{1'2} + Q_{1'2'})(1 - K), \tag{4}$$

где  $K = Q_2 / (Q_{1'2} + Q_{1'2'})$  – коэффициент, учитывающий потери теплоты во внешнюю среду через стенки отражателя. Предельные значения  $K$  равны 0 и 1. Значение  $K=0$  соответствует случаю, когда  $Q_{1'2} + Q_{1'2'} = Q_{23}$  (т.е. тепловые потери отсутствуют). Значение  $K=1$  соответствует случаю, когда  $Q_{1'2} + Q_{1'2'} = Q_2$ .

Для изучения влияния геометрических параметров излучающей системы с симметричным U-образным трубным излучателем на величину тепловых потоков по формуле (4) проведены варианты расчеты. В качестве базового варианта принята излучающая система с исходными данными варианта № 1 из табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета результирующего теплового потока

№ варианта	Параметры излучателя						
	$d_1$ , м	$d_1'$ , м	$S$ , м	$H$ , м	$h$ , м	$\alpha$ , град	$\frac{a}{2}$ , м
1	0,1	0,1	0,3	0,18	0,05	60	0,15
2	0,08	0,08	0,3	0,18	0,04	60	0,15
3	0,1	0,1	0,3	0,15	0,05	60	0,15
4	0,1	0,1	0,2	0,18	0,05	60	0,15
5	0,1	0,1	0,3	0,18	0,1	60	0,15
6	0,1	0,1	0,3	0,18	0,05	60	0,15

В вариантах 1...5 приняты  $A_r = A_r' = 0,8$ ,  $A_2 = 0,1$ ,  $A_3 = 0,9$ ,  $T_1 = 700\text{K}$ ,  $T_1' = 500\text{K}$ ,  $T_3 = 290\text{K}$ . В варианте 6 принят  $A_2 = 0,8$ .

Проведен анализ влияния:  $S$ , м – расстояния между осями симметрии горелочной и уходящей ветвей;  $H$ , м – высоты корпуса отражателя;  $d_1$ , м – диаметра горелочной ветви;  $d_1'$ , м – диаметра уходящей ветви;  $h$ , м – высоты от оси симметрии горелочной и уходящей ветвей до нижнего основания корпуса отражателя;  $\alpha$  угла наклона боковых стенок отражателя к горизонтальной поверхности;  $T_1$ ,  $K$  – температуры горелочной ветви;  $A_2$  – коэффициента поглощения материала поверхности отражателя;  $A_3$  – коэффициента поглощения поверхности пола помещения.

Указанные параметры изменялись в пределах:  $S$  варьируется от 0,2 м до 0,4 м с шагом 0,05 м;  $H$  варьируется от 0,12 м до 0,24 м с шагом 0,03 м;  $h$  варьируется от 0,05 м до 0,125 м с шагом 0,025 м;  $d_1$ ,  $d_1'$  варьируется от 0,08 м до 0,14 м с шагом 0,02 м при  $d_1 = d_1'$  и  $h = d/2$ ;  $\alpha$  варьируется от 50° до 90° с шагом 10°;  $T_1$  варьируется от 700 К до 850 К с шагом 50 К при  $T_1' = 500$  К;  $A_2$  варьируется от 0,1 до 0,9 с шагом 0,2;  $A_3$  варьируется от 0,3 до 0,9 с шагом 0,2.

Рассматривалось влияние указанных параметров на величину общего теплового потока излучением с горелочной, уходящей ветвей и корпуса отражателя на поверхность пола помещения.

На рис. 2 представлен график зависимости общего теплового потока U-образного «темного» трубного излучателя от  $S$  – расстояния между осями симметрии горелочной и уходящей ветвей. Из полученных результатов следует, что при значительном увеличении размеров отражателя (на 200 мм, т.е. в 2 раза) увеличение лучистого теплового потока на поверхность пола помещения происходит менее, чем на 10 %, поэтому в практике проектирование увеличения  $S$  нецелесообразно.

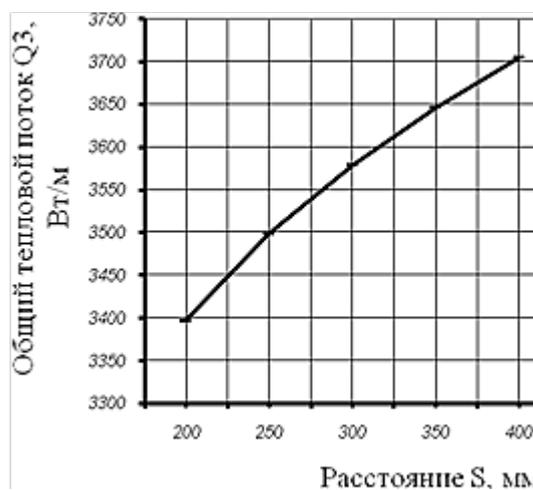


Рис. 2. Влияние расстояния между осями симметрии горелочной и уходящей ветвей на общий тепловой поток излучением

На рис. 3 представлен график зависимости тепло-технических характеристик U-образного «темного» трубного излучателя от  $H$  – общей высоты отражателя. Результирующие тепловые потоки от горелочной и уходящей ветвей на поверхность пола помещения остаются постоянными. Величина общего результирующего теплового потока увеличивается с 3542 до 3612 Вт, т.е. примерно на 2 %. Таким образом, при значительном увеличении высоты отражателя (от 120 до 240 мм), что связано с расходом дорогостоящего материала, незначительное увеличение лучистого теплового потока, поэтому этот путь увеличения лучистого потока малоэффективен.

На рис. 4 представлен график зависимости тепло-технических характеристик U-образного «темного» трубного излучателя от  $\alpha$  – угла наклона боковых стенок корпуса отражателя к горизонту. При его увеличении происходит увеличение площади поверхности отражателя. Поэтому результаты расчетов при варьировании  $\alpha$  аналогичны результатам расчетов при варьировании  $H$ , хотя численно незначительно

отличаются. Следовательно, при значительном увеличении  $\alpha$  (на  $40^\circ$ ) повышение лучистого теплового потока происходит лишь на 2,5%. Таким образом, можно рекомендовать максимальное значение  $\alpha$  на уровне  $50^\circ-60^\circ$ .



Рис. 3. Влияние высоты корпуса отражателя на общий тепловой поток излучением

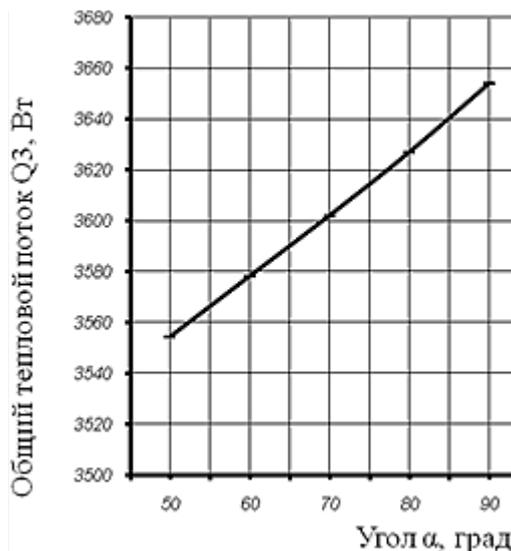


Рис. 4. Влияние угла наклона боковых стенок отражателя к горизонту на общий тепловой поток излучением

Из рис. 5 следует, что при увеличении  $T_1$  от 700 до 850 К общий результирующий тепловой поток  $Q_3$  возрастает от 2250 до 4450 Вт. Таким образом, для увеличения лучистого теплового потока на поверхность пола помещения целесообразно увеличивать температуру горелочной ветви  $T_1$  до 850 К ( $577^\circ\text{C}$ ). Дальнейшее увеличение  $T_1$  лимитируется свойствами жаропрочных сталей, способных работать продолжительное время при высоких температурах. Поэтому имеющееся ограничение по температуре поверхности горелочной ветви до уровня  $400^\circ\text{C}$  ( $673\text{ K}$ ), на наш взгляд, является необоснованным.

На рис. 6 приведены графики зависимости теплотехнических параметров от диаметров горелочной и уходящей ветвей излучателя ( $d_1=d_1'$ ). Из представленных результатов видно, что общий результирующий поток возрастает от 3050 до 4500 Вт, т. е. примерно в 1,5 раза.

Этот путь увеличения лучистого теплового потока эффективен, но он приводит к увеличению диаметра труб, их себестоимости. Окончательное решение должно быть принято на основе технико-экономического расчета.

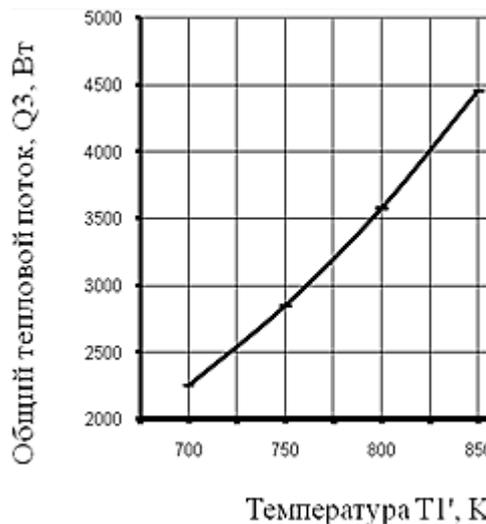


Рис. 5. Влияние температуры горелочной ветви на общий тепловой поток излучением

Увеличение коэффициента поглощения поверхности корпуса отражателя  $A_2$  от 0,1 до 0,9 приводит к тому, что общий лучистый тепловой поток на поверхность пола от обеих труб и отражателя увеличивается от 3550 до 4900 Вт (рис. 7). Поскольку этот способ не связан с увеличением металлоемкости, считаем его перспективным и эффективным при проектировании излучателей. Кроме того, показана возможность применения для отражателя листового металла из обычных углеродистых сталей взамен дорогостоящего листового металла нержавеющей сталей или алюминиевого листа.

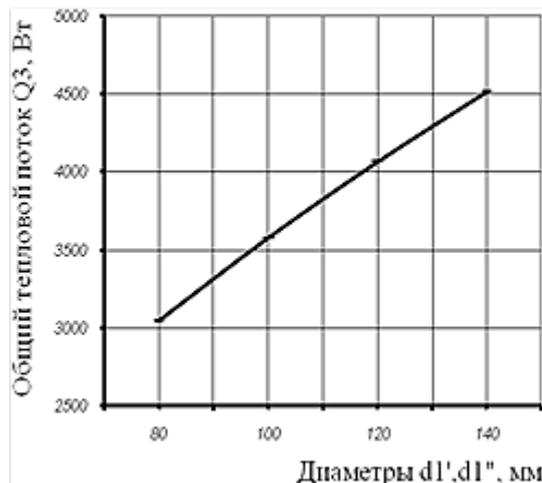


Рис. 6. Влияние величины диаметров горелочной и уходящей ветвей излучателя ( $d_1=d_1'$ ) на общий тепловой поток излучением

Уменьшение коэффициента поглощения поверхности пола  $A_3$  от 0,9 до 0,3 приводит к уменьшению общего теплового потока от 3600 до 2550 Вт (рис. 8).

Следовательно, поверхность пола помещения должна иметь покрытие с большим значением  $A_3$ .

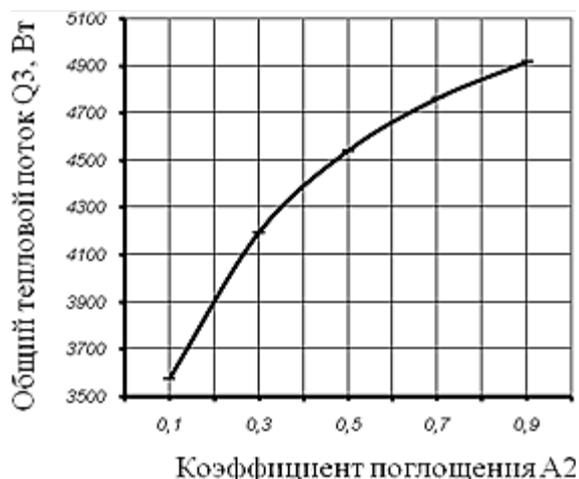


Рис. 7. Влияние коэффициента поглощения корпуса отражателя на общий тепловой поток излучением

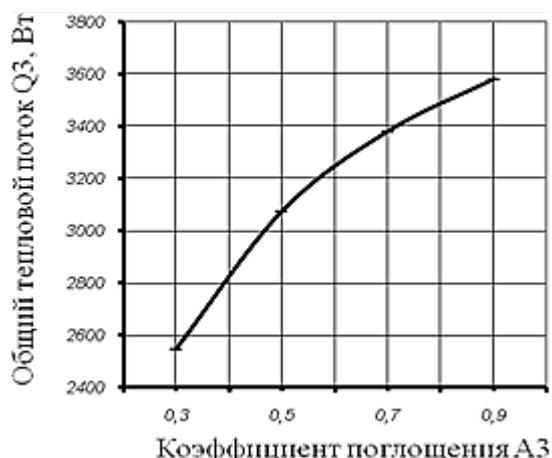


Рис. 8. Влияние коэффициента поглощения поверхности пола помещения на общий тепловой поток излучением

Увеличение  $h$  – расстояния от оси симметрии труб до нижнего основания отражателя от 50 до 125 мм приводит к тому, что общий результирующий тепловой поток  $Q_3$  уменьшается от 3580 до 3150 Вт (рис. 9). Таким образом, параметр  $h$  целесообразно делать не больше величины радиуса излучающей трубы.

Таким образом, проведенный параметрический анализ влияния геометрических и оптических характеристик элементов излучателей (излучающих труб и корпуса отражателя) позволил сформулировать рекомендации по разработке эффективных рациональных

конструкций симметричных U-образных трубных излучателей.

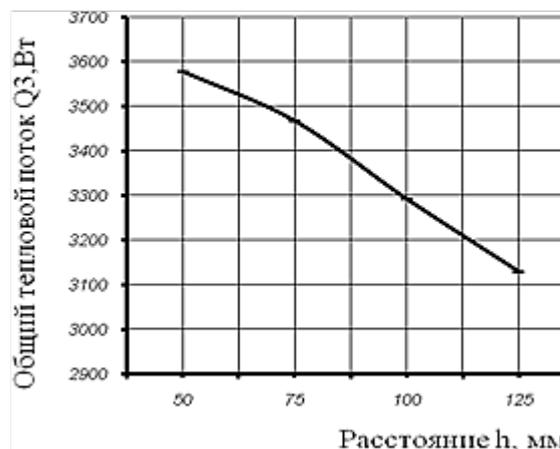


Рис. 9. Влияние расстояния от оси симметрии труб до нижнего основания корпуса отражателя на общий тепловой поток излучением

## 5. Выводы

Приведена уточненная методика расчета U-образных «темных» трубных излучателей при симметричном расположении ветвей излучающей трубы с учетом их геометрических размеров и оптических свойств.

Проведен анализ влияния геометрических размеров излучателя на его тепловую мощность. Установлено, что в исследуемых пределах энергетическая эффективность «темного» трубного излучателя может быть увеличена путем увеличения температуры и диаметра горелочной ветви, уменьшения диаметра уходящей ветви.

Проведен анализ влияния оптических свойств излучающей системы на тепловую мощность излучателя. Установлено, что увеличение лучистой тепловой мощности излучателя может быть достигнуто за счет увеличения коэффициента поглощения поверхности корпуса отражателя и поверхности пола помещения.

Выявлено, что необходимо стремиться к уменьшению негативного влияния уходящей ветви. Это может быть достигнуто путем уменьшения ее диаметра или размещения за пределами корпуса отражателя в отдельном отсеке. Кроме того, корпус отражателя целесообразно изготавливать из обычных углеродистых сталей взамен дорогостоящего листового металла нержавеющей сталей или алюминиевого листа листовым металлом.

## Литература

1. Тютюнников, А. И. О применении газовых инфракрасных излучателей для отопления производственных зданий [Текст] / А. И. Тютюнников, В. Ю. Мосягин // АВОК. Инженерные системы. – 2001. – № 3. – С. 29–31.
2. Редько, А. Ф. Совершенствование систем отопления производственных помещений газовыми трубчатыми инфракрасными нагревателями [Текст] / А. Ф. Редько, Н. Н. Болотских. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – № 4. – С. 36–47.
3. Стандарт АВОК. Системы отопления и обогрева с газовыми инфракрасными излучателями [Текст] / СТО НП «АВОК» 4.1.5–2006. – М., 2006. – 10 с.

4. Мачкаши, А. Основные принципы лучистого отопления больших помещений [Текст] / А. Мачкаши // Водоснабжение и санитарная техника. – 1964. – № 2. – С. 35–40.
5. Банхиди, Л. Тепловой микроклимат помещений [Текст] / Л. Банхиди. – М.: Стройиздат, 1981. – 248 с.
6. Родин, А. К. Газовое лучистое отопление [Текст] / Родин А. К. – Л.: Недра, 1987. – 191 с.
7. Вишневский, Е. П. Сравнительный анализ воздушного и лучистого отопления помещений большого объема [Текст] / Е. П. Вишневский, Р. Б. Жуйков // Инженерные системы. АВОК-Северо-Запад. – 2001. – № 3. – С. 24–28.
8. Дюгаров, Ю. Ц. Применение газовых инфракрасных обогревателей как перспективное направление в отопительной технике [Текст] / Ю. Ц. Дюгаров, Р. А. Кадцын // Промышленное и гражданское строительство. – 2003. – № 12. – С. 38–39.
9. Крейнин, Е. В. Оптимизация системы лучистого отопления помещений [Текст] / Е. В. Крейнин, О. Г. Рогинский, В. Б. Бондарчук // Газовая промышленность. – 2001. – № 2. – С. 51–53.
10. Блох, А. Г. Теплообмен излучением: справочник [Текст] / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
11. Алексеев, Г. Ф. Методика расчета угловых коэффициентов при отоплении «темными» U-образными трубными излучателями [Текст] / Г. Ф. Алексеев, А. В. Яковлева // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць. – 2010. – Вип. 2. – С. 5–11.
12. Ревун, М. П. Расчетная оценка температуры поверхности отражателя U-образного «темного» трубного излучателя [Текст] / М. П. Ревун, А. В. Яковлева // Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. Национальной металлургической академии Украины. – 2010. – Вып. 2 (17). – С. 185–189.