

**Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
Инженерно-строительный факультет
Кафедра «Технология, организация и экономика строительства»**

Петроченко Марина Вячеславовна, Улыбин Алексей Владимирович
mpetrochenko@mail.ru, www.stroikafedra.spb.ru

Паропроницаемый экран железобетонной башенной градирни

1. Башенные градирни

Башенные градирни являются одним из наиболее эффективных и ответственных устройств для охлаждения циркуляционной воды в системах теплоснабжения. В настоящее время градирни с железобетонной оболочкой активно эксплуатируются и строятся. Железобетонные оболочки градирен эксплуатируются в тяжелых агрессивных условиях, что приводит к их преждевременному разрушению и выходу из строя. Одним из эффективных способов защиты оболочек является устройство вентилируемого паронепроницаемого экрана. Для обоснования его применения и создания эффективной конструкции, необходим точный тепло- гидравлический расчет движения воздуха в зазоре между экраном и железобетонной оболочкой градирни. Успешная попытка такого расчета сделана в работе [1] Н.И.Ватина, А.В.Улыбина. Дальнейшее развитие этого направления требует более точного расчета.

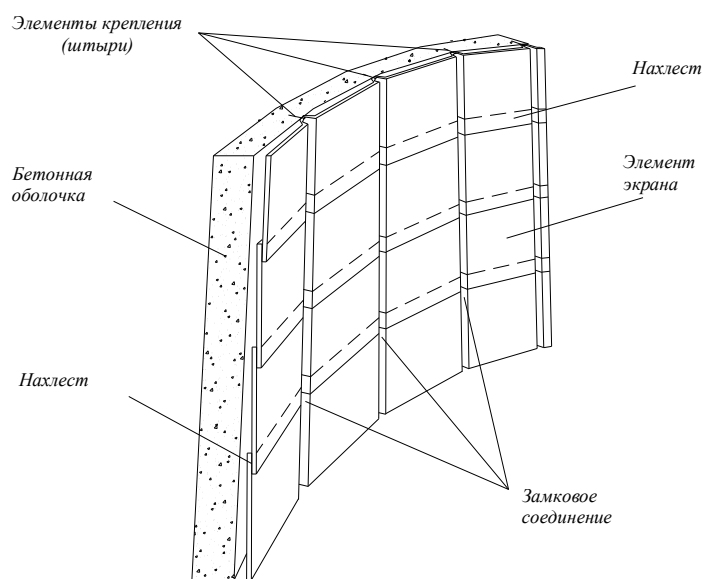


Рис.1.1 Конструкция защитного экрана

Рассмотрим процессы, позволяющие описать характер движения воздуха в вентилируемом канале (прослойке) и его параметры. Около нагретых поверхностей, окруженных воздухом, возникают конвективные токи, которые вызывают теплообмен между поверхностями и воздухом. Этот процесс называют свободной конвекцией. Процесс переноса теплоты конвекцией связан с переносом массы подвижной среды. Прослойка в данном случае является гравитационным побудителем для интенсификации конвективного теплообмена.

2. Конвективный теплообмен с поверхности экрана

Процесс переноса теплоты в вентилируемом зазоре между экраном и железобетонной оболочки градирни можно определить как естественную

(свободную) конвекцию. Движение воздуха возникает за счет разности плотностей холодных и нагретых масс. Будем рассматривать зависимость плотности воздуха от температуры линейной. Обозначим разность температуры между поверхностью экрана и воздуха $\Delta\tau$. На частицы нагретого от поверхности экрана воздуха действует подъемная архимедова сила, равная:

$$(\rho_{нар.возд} - \rho_{внут.возд})g = \rho_{нар.возд}\beta g\Delta\tau, \quad 2.1$$

где β - коэффициент температурного расширения воздуха, K^{-1} ;

g - ускорение силы тяжести, m/c^2 ;

$\rho_{нар.возд}$ - плотность «холодного» наружного воздуха, $кг/м^3$;

$\rho_{внут.возд}$ - плотность «теплого» внутреннего воздуха, $кг/м^3$;

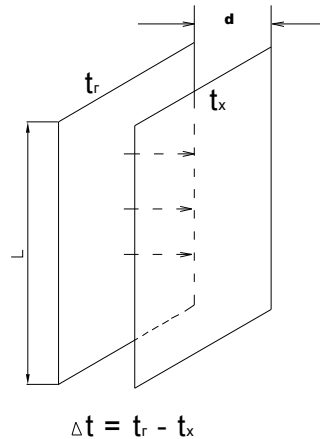


Рис.2.1

Интенсивность естественного конвективного потока для любых форм поверхностей и сред в обобщенном виде определяется критерием Грасгофа (Gr) или произведением критерия Грасгофа на критерий Прандтля ($GrPr$).

Число Грасгофа - безразмерная величина, представленная отношением подъемной силы к силе вязкости:

$$Gr = \frac{\beta g X^3 \Delta\tau}{\nu^2}, \quad 2.2$$

где X - определяющий размер поверхности в направлении потока воздуха, $м$;

ν - коэффициент кинематической вязкости воздуха, $м/с^2$.

Эта величина характеризует действие гидростатической подъемной силы и силы вязкости жидкости при естественной конвекции.

Число Прандтля – безразмерная величина, представленная отношением скорости диффузии к температуропроводности.

$$Pr = \frac{\nu c_p \rho}{\lambda}, \quad 2.3$$

где λ - коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$;

c_p - удельная теплоемкость при постоянном давлении, $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$;

ρ - плотность воздуха, $кг/м^3$.

Этот критерий устанавливает связь теплопередачи с движением воздуха

Уравнение подобия для конвективного теплообмена для свободной конвекции примет вид:

$$Nu = f(Gr Pr), \quad 2.4$$

где Nu (число Нуссельта) – безразмерная величина, характеризующая интенсивность теплообмена.

$$Nu = \frac{\alpha_{\kappa} X}{\lambda}, \quad 2.5$$

где α_{κ} - коэффициент конвективного теплообмена, $Bm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$;

$$GrPr = \frac{\beta g X^3 \Delta t}{\nu^2} Pr \approx 10^8 l^3 \Delta \tau, \quad 2.6$$

Количество теплоты, передаваемое воздуху с поверхности экрана в этом случае определяется законом Ньютона:

$$Q = \alpha_{\kappa} (t_2 - t_6) Ft, \quad 2.7$$

где α_{κ} - коэффициент конвективного теплообмена;

t_2 - температура экрана, $^{\circ}C$;

t_6 - температура слоя воздуха, $^{\circ}C$;

F - площадь элемента экрана, m^2 ;

t - время, c .

Коэффициент α_{κ} представляет собой очень сложную функцию потока воздуха, его теплофизических свойств и геометрических параметров системы. Как правило, за исключением незначительного числа простейших случаев, получить точные аналитические решения этого уравнения не представляется возможным и поэтому используются приближенные методы. Для большинства практических задач, коэффициент теплоотдачи оценивают по эмпирическим уравнениям, полученным обработкой экспериментальных результатов методом анализа размерностей.

Конвективный теплообмен q_{κ} в воздушной прослойке от одной поверхности к другой равен:

$$q_{\kappa} = \alpha_{\kappa} (\tau_1 - \tau_2) \quad 2.8$$

На теплообмен влияют режимы течения воздуха в зазоре: ламинарный и турбулентный. Первый характеризуется спокойным, струйчатым движением, второй - неупорядоченным, вихревым. Коэффициент конвективного теплообмена α_{κ} , входящий в критерий Нуссельта Nu , связь которого с критериями Грасгофа Gr и Прандтля Pr устанавливается методом анализа размерностей:

$$Nu = C(Gr Pr)^n, \quad 2.9$$

При расчете Gr значение ν берется при средней температуре $t_{cp} = \frac{(t_x + t_2)}{2}$, а температурный коэффициент объемного расширения воздуха определяем как

$$\beta = \frac{1}{(t_x + 273)}.$$

В нашем случае будем рассматривать движение воздуха между оболочкой градирни и экраном как систему с двумя параллельными пластинами с различной температурой (с одинаковым α_{κ}).

• При малых толщинах или при небольших разностях температур имеет место режим параллельно-струйного движения воздуха вдоль поверхности ($Re < 2 \cdot 10^3$). Экспериментально установлено, что ламинарный режим течения сохраняется в пределах значения критериев $GrPr < 1000$. Учитывая зависимость, определим критическую толщину прослойки, для которой сохраняется ламинарный режим течения. Учитывая 2.6, по рекомендациям В.Н.Богословского [7] получаем:

$$(Gr Pr)_{кр} \approx 10^8 \delta \Delta \tau \leq 1000 \quad 2.10$$

$$\delta_{кр} \approx 20 \Delta t \frac{1}{3} \quad 2.11$$

Учитывая 2.11, получаем, что при максимальном температурном перепаде между железобетонной оболочкой градирни и стеклопластиковым экраном [1] при

температуре наружного воздуха -28°C и температуре экрана $+10^{\circ}\text{C}$ ламинарный режим течения воздуха сохраняется при ширине зазора $\delta_{кр}$ до 6 мм.

При этом режиме движения в зазоре:

$$\alpha_{\kappa} = \frac{\lambda_{\epsilon}}{\delta}, \quad 2.12$$

где λ_{ϵ} - коэффициент теплопроводности воздуха, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$;

δ - толщина прослойки, м.

Т.о. получаем, что передача тепла через слой воздуха толщиной, меньше критической происходит теплопроводностью.

- В случае турбулентного потока воздуха ($\text{Re} < 2 \cdot 10^3$) $\text{GrPr} > 1000$:

$$\text{Nu} = 0.54(\text{GrPr})^{0.25} \quad 2.13$$

или

$$\text{Nu} = 0.018(\text{Re})^{0.8} \quad 2.14$$

$$\text{Re} = \frac{V \cdot X}{\nu} \quad 2.15$$

где V – скорость воздуха в прослойке.

В рассматриваемом случае минимальная ширина зазора составляет 10 см, получаем, что движение воздуха в прослойке между железобетонной оболочкой и экраном носит турбулентный характер.

Установим зависимость для определения α_{κ} , используя 2.5, 2.13 и 2.14

$$\alpha_{\kappa} = \frac{0.18 \cdot \left(\frac{\beta g X^3 \Delta \tau c_p \rho}{\nu \lambda} \right)^{0.25} \cdot \lambda}{X} \quad 2.16$$

или, используя 2.14 и 2.15

$$\alpha_{\kappa} = 0.018 \cdot \left(\frac{V \cdot X}{\nu} \right)^{0.25} \quad 2.17$$

3. Скорость воздуха в зазоре

Расход воздуха W в вентилируемой прослойке нужно определять специальным гидравлическим расчетом. Как сказано выше, движение воздуха в прослойке происходит за счет разности плотностей холодного и теплого воздуха:

$$\Delta \rho g H = \sum \zeta \cdot W^2, \quad 3.1$$

где $\sum \zeta$ - сумма гидравлических сопротивлений;

H - высота градирни

Представим 3.1 в следующем виде:

$$\Delta \rho = \rho_{нар.возд} - \rho_{внутр.возд} = \rho_{нар.возд} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{внутр.возд}}{\rho_{нар.возд}} \right) \quad 3.2$$

$$\Delta \rho = \rho_{нар.возд} \cdot H \cdot \left(1 - \frac{T_{нар.возд.}}{T_{внутр.возд.}} \right) \quad 3.3$$

Скорость воздуха V в прослойке определим как расход воздуха W через площадь поперечного сечения прослойки:

$$V = \sqrt{\frac{\rho_{\text{нар.возд}} H \left(1 - \frac{T_{\text{нар.возд.}}}{T_{\text{внутр.возд.}}}\right)}{\sum \zeta}} \quad 3.4$$

$$\sum \zeta = \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{вых}} + \lambda_2 \frac{H}{R_2}, \quad 3.5$$

где λ_2 - линейный коэффициент сопротивления трения;

R_2 - гидравлический радиус сечения канала, м.

Гидравлические потери на вход и выход в данном случае незначительны по сравнению с гидравлическими потерями по длине. Ранее было определено, что в канале устанавливается турбулентный режим движения. Таким образом, линейный коэффициент сопротивления трения можно определить по зависимости Альтшуля [9]:

$$\lambda_r = 0,11 \left(\Delta_r + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} \quad 3.6$$

где Δ_r - относительная шероховатость стенок канала.

$$R_2 = \frac{\delta \cdot L}{2(\delta + L)}, \quad 3.7$$

где L - расстояние между направляющими экрана, м

Учитывая зависимости 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, окончательное выражение для определения скорости движения воздуха в зазоре можно записать в виде:

$$V = \sqrt{\frac{\rho_{\text{нар.возд}} \left(1 - \frac{T_{\text{нар.возд.}}}{T_{\text{внутр.возд.}}}\right) \left(\frac{\delta \cdot L}{2(\delta + L)}\right)}{0,11 \left(\Delta_r + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}}} \quad 3.8$$

4. Распределение температуры воздуха по высоте зазора

Определим температуру воздуха в произвольном сечении прослойки x .

Обозначим коэффициент теплопередачи наружной части конструкции (железобетонной оболочки градирни) – K_n , внутренней части конструкции (экрана) – K_6 .

Вентилируемая прослойка отделена экраном от внутренней части конструкции, имеющей температуру $t_{\text{внутр}}$. Температуру наружного воздуха обозначим $t_{\text{наружн.}}$.

Выделим по длине прослойки бесконечно малый элемент dx , шириной 1 м. Для этого элемента:

- Количество тепла, поступающее в прослойку от внутреннего воздуха,

$$Q_1 = K_6 (t_{\text{внутр}} - t_x) dx \quad 4.1$$

где t_x - температура воздуха в данном сечении прослойки;

- Количество тепла, уходящего из прослойки к наружному воздуху,

$$Q_2 = K_n (t_x - t_{\text{наружн.}}) dx \quad 4.2$$

- Количество тепла, идущего на изменение температуры воздуха в прослойке на dt градусов,

$$Q_3 = Wcdt \quad 4.3$$

$$W = 3600V\delta\gamma \quad 4.4$$

где V - скорость воздуха в прослойке;
 δ - толщина воздушной прослойки, м;
 γ - объемный вес воздуха в прослойке, кг/м³;
 c - удельная теплоемкость воздуха
 Из условия теплового баланса

$$Q_3 = Q_1 - Q_2 \quad 4.5$$

откуда

$$Wcdt = K_г(t_{внутр} - t_x)dx - K_n(t_x - t_{наружн})dx \quad 4.6$$

Интегрирование этого уравнения дает:

$$t_x(K_г + K_n) - A = [t_0(K_г + K_n) - A]e^{-\frac{K_г + K_n}{Wc}x} \quad 4.7$$

откуда окончательно получим:

$$t_x = \frac{A + [t_0(K_г + K_n) - A]e^{-\frac{K_г + K_n}{Wc}x}}{K_г + K_n} \quad 4.8$$

где t_x - температура воздуха в прослойке на расстоянии x , м, от входа воздуха в прослойку;

$$A = K_г t_г + K_n t_n \quad 4.9$$

t_0 - температура воздуха, входящего в прослойку, град;

e - основание натурального логарифма.

При определении $K_г$ и K_n учитываются только конвективные составляющие теплообмена на поверхностях прослойки, т.е.

$$K_г = \frac{1}{\frac{1}{K_г^1} + \frac{1}{\alpha_к}}; \quad K_n = \frac{1}{\frac{1}{K_n^1} + \frac{1}{\alpha_к}} \quad 4.10$$

где $K_г^1$ и K_n^1 - коэффициенты теплопередачи внутренней и наружной частей градирни от поверхностей воздушного зазора;

$\alpha_к$ - коэффициент конвективного теплообмена одной поверхности с воздухом, движущимся в прослойке со скоростью V .

5. Исследование модели

5.1. Исходные данные

Используя рекомендации, описанные в [1], примем следующие данные:

Расчет произведем для градирни со следующими параметрами:

- высота - 83 м
- толщина железобетонной оболочки – 0,6 м
- толщина стеклопластикового экрана – 1 мм
- ширина зазоров: 0,1 м ; 0,2 м, 0,3 м
- расстояние между направляющими экрана (ширина) – 2 м

Таблица 5.1. Температурные параметры наружного и внутреннего воздуха [1]

	температура наружного воздуха, $t_{нар}$, °C	температура паро-воздушной смеси в градирне, $t_{внутр}$, °C
1	-28	10
2	-20	13
3	-10	17

5.2. Основные допущения

Перед расчетом модели вводим следующие допущения:

- Плотность наружного воздуха примем одинаковой для всех расчетных случаев
- При определении числа Рейнольдса коэффициент кинематической вязкости ν принимаем при температуре $t_{cp} = \frac{t_{нар} + t_{внутр}}{2}$
- Рассматривая распределение температуры воздуха по высоте зазора, теплопередачу между железобетонной оболочкой градирни учитываем как сумму конвективной составляющей и теплопроводности, не учитывая излучение.

5.3. Результаты расчета модели

5.3.1. Определение скорости воздуха в зазоре:

Используя зависимость 3.8 определяет скорость воздуха в вентилируемом зазоре:

$$V = \sqrt{\frac{\rho_{нар.возд} \left(1 - \frac{T_{нар.возд.}}{T_{внутр.возд.}}\right) \left(\frac{\delta \cdot L}{2(\delta + L)}\right)}{0,11 \left(\Delta_r + \frac{68}{Re}\right)^{0,25}}$$

Учитывая, что в канале имеет место турбулентный режим движения воздуха в первом приближении примем $Re = 3 \cdot 10^3$; $\Delta_r = 0,002 м$ (для бетонной поверхности по [9]); $\rho_{нар.возд} = 1,29 кг / м^3$.

Получив скорости воздуха для всех расчетных случаев, итерационно пересчитываем числа Рейнольдса по формуле 2.15, а затем скорости по 3.8.

Таблица 5.2. Значения скоростей (м/с) при различных температурных режимах $[t_{нар}; t_{вн}]$ и величинах зазора

Величина зазора, м	Температурные режимы, $[t_{нар}; t_{вн}]$, °С		
	[-28;10]	[-20;13]	[-10;17]
0.1	2.42	2.22	1.97
0.2	1.72	1.58	1.39
0.3	1.39	1.27	1.13

Таблица 5.3. Значения чисел Рейнольдса при различных температурных режимах $[t_{нар}; t_{вн}]$ и величинах зазора

Величина зазора, м	Температурные режимы, °С		
	[-28;10]	[-20;13]	[-10;17]
0.1	8174	7396	6304
0.2	10780	9755	8314
0.3	12352	11176	9526

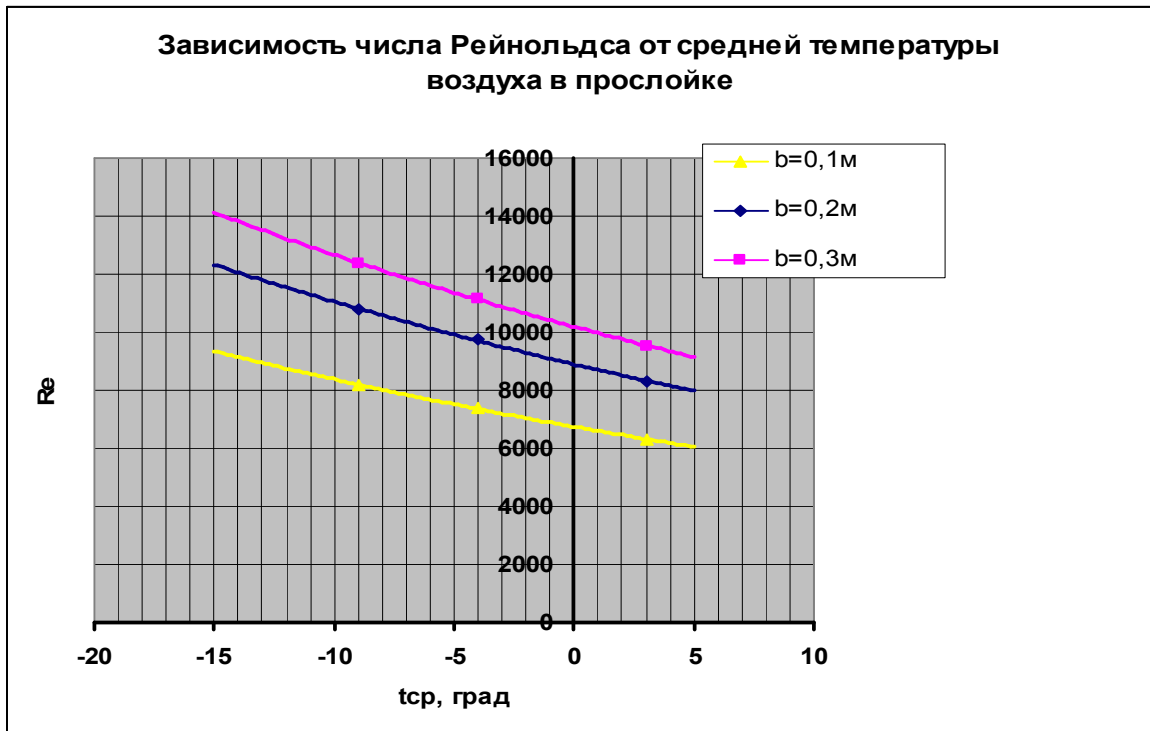


Рис.5.3.1

5.3.2. Определение коэффициента конвективного теплообмена

Коэффициент конвективного теплообмена α_k определим, используя формулы 2.16, 2.17.

Таблица 5.4. Значения коэффициент конвективного теплообмена α_k при различных температурных режимах $[t_{нар}; t_{вн}]$ и величинах зазора

Величина зазора, м	Температурные режимы, °С		
	[-28;10]	[-20;13]	[-10;17]
0.1	12.44	11.48	10.10
0.2	8.13	7.5	6.60
0.3	6.31	5.83	5.13

5.3.3. Определение температуры воздуха по высоте зазора

Используя полученную зависимость 4.8, полученные данные о скорости движения воздуха и компоненте конвективного теплообмена, получаем следующие распределения температуры воздуха по высоте канала:

Таблица 5.5. Параметры воздуха в зазоре при температуре наружного воздуха минус 28 °С

Величина зазора, м	Конечная температура воздуха, °С	Скорость воздуха в зазоре, м/с
0.1	-7,31	2,42
0.2	-8,09	1,72
0.3	-8,38	1,39

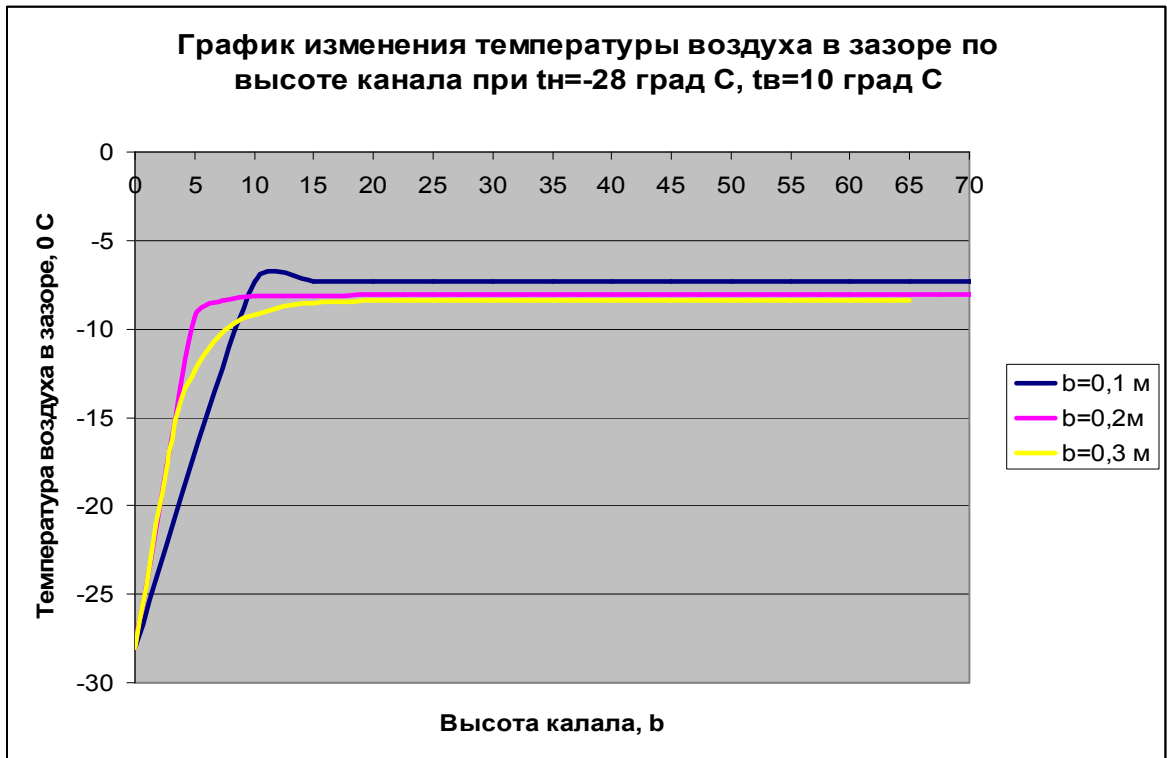


Рис.5.3.2

Таблица 5.6. Параметры воздуха в зазоре при температуре наружного воздуха минус 20 °С

Величина зазора, м	Конечная температура воздуха, °С	Скорость воздуха в зазоре, м/с
0.1	-2,03	2,22
0.2	-2,71	1,58
0.3	-2,96	1,27



Рис.5.3.3

Таблица 5.7. Параметры воздуха в зазоре при температуре наружного воздуха минус 10 °С

Величина зазора, м	Конечная температура воздуха, 0С	Скорость воздуха в зазоре, м/с
0.1	4,69	1,96
0.2	4,14	1,39
0.3	3,93	1,13

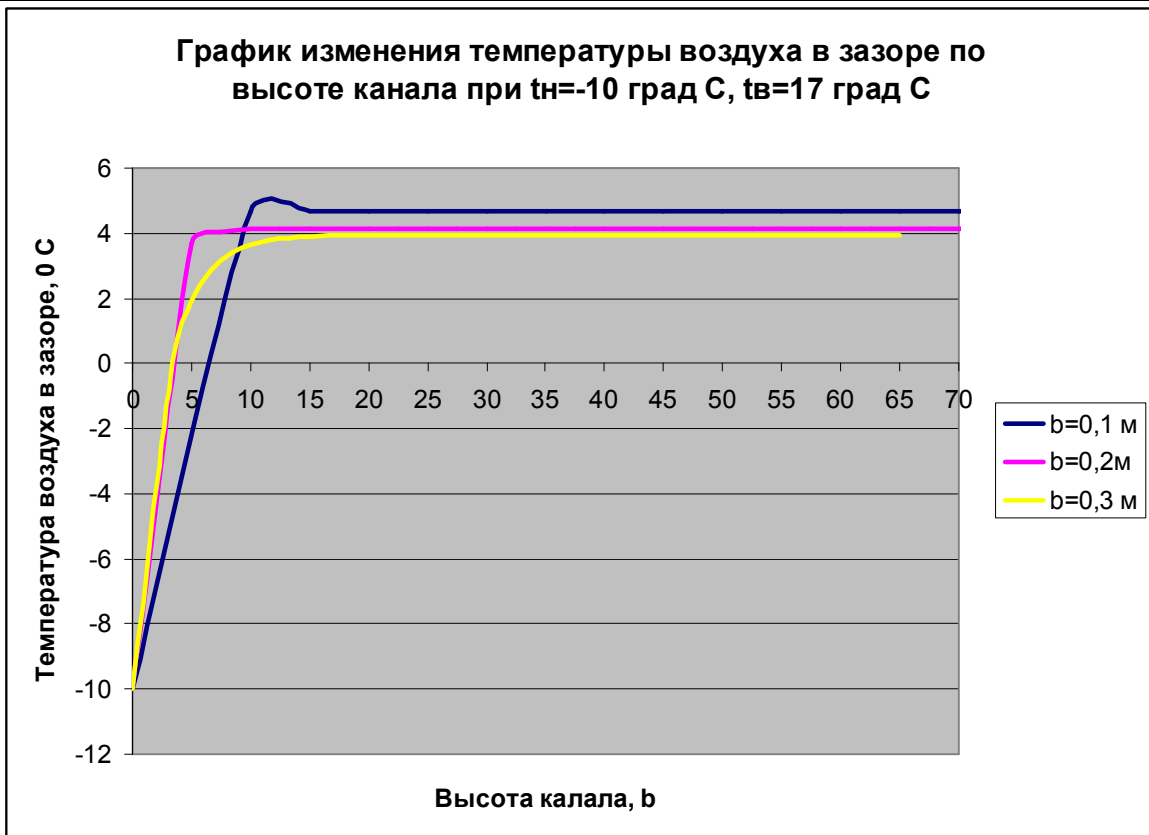


Рис.5.3.4

В результате построения данных графиков было установлено, что при одинаковых величинах ширины зазора независимо от температурного режима [t_n ; $t_{вн}$] изменение температуры воздуха в зазоре по высоте канала происходит на одинаковом участке канала, длиной $L_{кр}$. По установленным зависимостям построим график изменения $L_{кр}$ в зависимости от величины воздушного зазора.

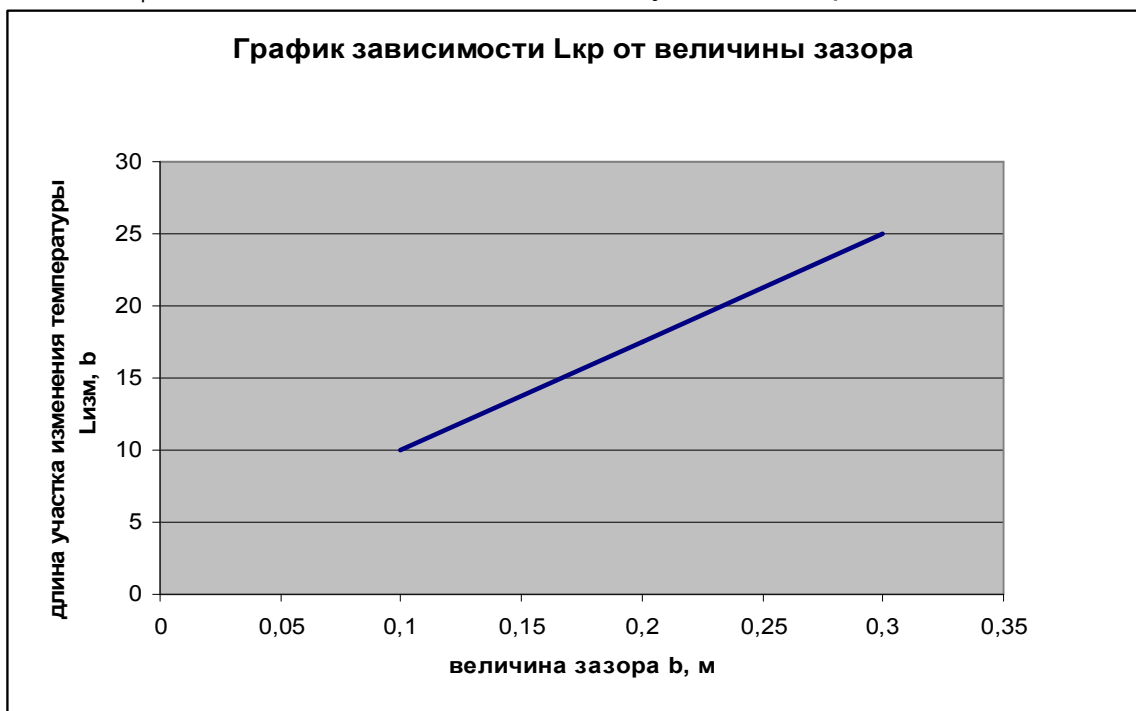


Рис.5.3.5

6. Выводы

В данной работе был произведен расчет температурных и скоростных параметров воздуха в воздушном зазоре с учетом конвективной составляющей теплопроводности. Учет данного параметра позволяет с большей точностью приблизиться в расчетах к истинному распределению температуры в зазоре по высоте канала и скоростей в зазоре между защитным экраном и железобетонной оболочкой градирни. Скорость, рассчитанная по данной методике, оказывается обратнопропорциональной величине вентилируемого зазора. Конечные температуры воздуха в зазоре в каждом расчетном случае оказываются выше на 3...4 °С, чем температуры воздуха, рассчитанные по методике А.В.Улыбина.

Установленная зависимость длины участка изменения температуры по высоте канала $L_{кр}$ от величины зазора (Рис.5.3.5) является справедливой для любых температурных параметров наружного и внутреннего воздуха исследуемой модели.

Список использованных источников

1. Исследование параметров воздуха в вентилируемом зазоре между железобетонной оболочкой башенной градирни и защитным паронепроницаемым экраном. Ватин Н.И., Улыбин А.В. – СПб.: Изд-во СПбОДЗПП, 2006,- 19 с.
2. Х. Уонг. Основные формулы и данные для теплообмена для инженеров (справочник). М.:Атомиздат, 1979.-212 с.
3. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. Стереотип. Михеев М.А., Михеева И.М.- М.: «Энергия», 1977.-344 с.
4. Справочник по теплопередаче. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М.- М.: Государственное энергетическое издательство, 1958. – 404 с.
5. Луканин В.Н. Теплотехника. - М: «Высшая школа», 2000. – 671 с.
6. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. - М.:Стройиздат, 1973. – 287 с.
7. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. - Изд-во «АВОК Северо-Запад», 2006.-400с.
8. Тепловлажностный расчет фасадных систем с воздушным зазором А.Н. Машенков и др.- Н. Новгород: Изд-во НГАСУ, 2005.-32с.
9. Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): Учебник для вузов. 2-е изд. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007.- 168 с.