

Исследование прочностных свойств полученных бетонов проводилось на образцах кубической формы с ребром 2 см. Исследование проводилось с применением разрывной машины Instron 150 LX. Результаты исследования показаны в таблице 5.

**Таблица 5** – Результаты прочностных испытаний бетонов на основе бесклинкерных вяжущих

Образец	Прочность
ПЦ М400	39,5 МПа
ВМШ + 5% ЗУ	42,1 МПа
ВМШ + 7% NaOH (1:2.5)	32,3 МПа
ВМШ + 1% SiO <sub>2</sub> (1:3)	39,4 МПа

Авторы работы выражают благодарность Министерству образования и науки РФ за финансовую поддержку (проект RFMEFI57814X0099)

### Список литературы

1. Escalante Garcia J.I, Mendez Nonell J., Gorokhovskiy A., Fraire Luna P.E., Mancha Molinar H., Mendoza Suarez G., Reactividad y propiedades mecanicas de escoria de alto horno activada por alcalis, Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio, 2002, Vol.41, No 5, 451–458.
2. Рекомендации по изготовлению шлакощелочных бетонов и изделий на их основе. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. – 55с.
3. Боженов П.И. Комплексное использование минерального сырья и экология. – М.: изд-во АСВ, 1994. – 264 с.
4. Горшков, В.С., Александров, С.Е., Иващенко, С.И., Горшкова, И.В. Комплексная переработка и использование металлургических шлаков в строительстве. – М. : Стройиздат, 1985. – 273 с.

УДК 697.922.2

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ АЭРОСТАТИКИ, АЭРОДИНАМИКИ, ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА АЭРАЦИИ ЦЕХОВ С ТЕПЛОИЗБЫТКАМИ

**Широкова О.Н., Липко В.И.**

Учреждение образования «Полоцкий государственный университет», г. Новополоцк, Республика Беларусь, [kafedratgsv@mail.ru](mailto:kafedratgsv@mail.ru)

*The article outlines the conceptual possibilities and methods of physico-mathematical modeling of static, dynamic and heat and mass transfer processes in the shops of the extract in terms of exposure to gravitational forces and wind pressure on the building when natural ventilation is active by a method of aeration by the "bottom-up".*

### Введение

Технология литейного производства характеризуется значительными теплоизбытками, выделяющимися в рабочую зону от технологических печей, технологического оборудования, нагретых и расплавленных металлов непрерывно или длительно по времени в виде радиационной лучистой тепловой энергии от нагретых поверхностей и конвективной составляющей теплового потока в виде горячих газов или перегретого воздуха, вследствие чего значительно ухудшаются условия труда работающих.

В целях улучшения качества воздушной среды в горячих цехах используется способ вентиляции методом аэрации путём естественного проветривания рабочей зоны цеха наружным приточным вентиляционным воздухом, который поступает внутрь помещений через специальные аэрационные приточные отверстия, расположенные в наружных стенах здания в двух уровнях: для летнего периода года – в нижней зоне вблизи пола помещения, а для зимнего периода года отверстия расположены на высоте  $h = 4,5$  м от пола.

Удаление вентиляционного воздуха при аэрации здания осуществляется через специальные аэрационные фонари с вытяжными отверстиями, расположенными выше крыши, или вытяжные шахты.

Для количественного регулирования расхода вентиляционного воздуха в приточных и вытяжных отверстиях устанавливаются регулируемые решётки.

В процессе естественной циркуляции воздушных потоков внутри помещений горячих цехов с интенсивными тепlopоступлениями образуется несколько зон с различными температурами.

### Основная часть

Для представления физической картины аэростатических, аэродинамических и тепломассообменных процессов, протекающих в условиях изменяющихся температур, необходимо изначально представить помещение как сосуд, заполненный газовой смесью, тогда по законам аэростатики изменение давления  $dP$  в слое  $dh$  газа переменено по высоте и составляет

$$= \rho \cdot dh. \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность газа (воздуха),  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $F$  – площадь поперечного сечения помещения,  $\text{м}^2$ ;  $V = F \cdot h$  – объём столба газа (воздуха),  $\text{м}^3$ .

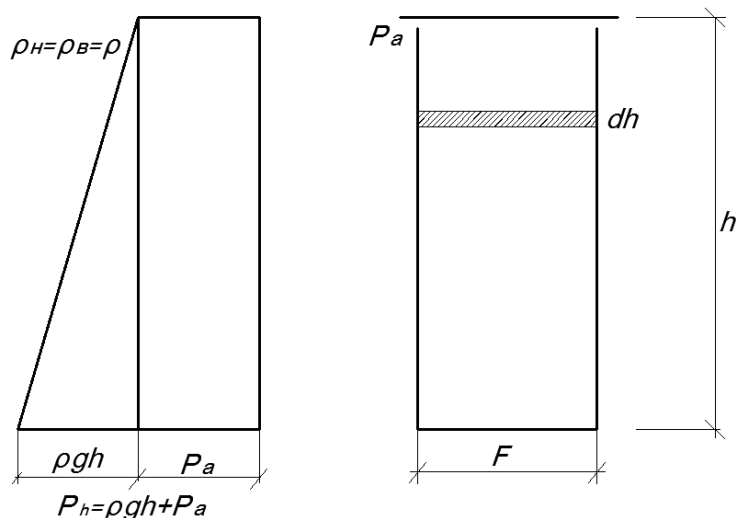
Так как  $V = F \cdot h$  то выражение (1) примет вид

$$dP = \rho \cdot g \cdot dh \quad (2)$$

Интегрируя выражение (2), получим

$$P_h = P_a + \int_0^h \rho \cdot g \cdot dh \quad (3)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление на поверхности земли при  $h=0$ .



**Рисунок 1** –Изменение аэростатического давления по высоте помещения при  $t_n = t_s$  ( $t_s, t_n$  – температуры воздуха соответственно внутри и снаружи помещения,  $^{\circ}\text{C}$ )

В стационарных условиях без каких-либо теплопоступлений температура воздуха внутри помещения остаётся неизменной. Тогда и плотность воздуха постоянна, а после интегрирования выражение (3) имеет вид

$$= -\rho \quad , \text{ Па.} \quad (4)$$

Физическая картина описанных выше аэростатических процессов выражениями (1)–(4) представлена на рисунке 1.

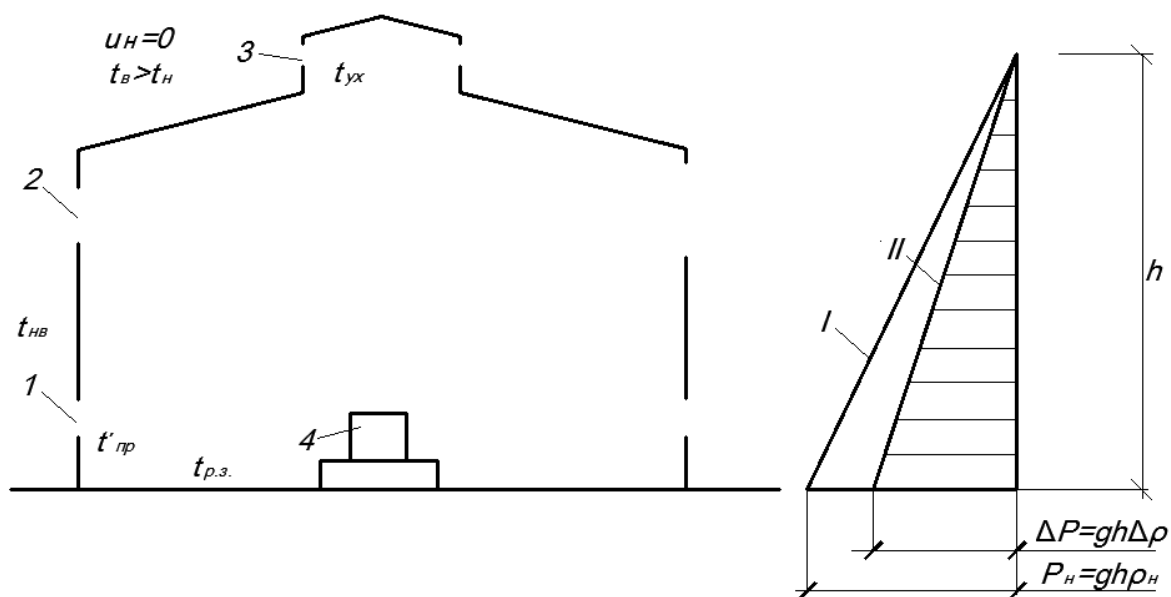
Если в рассматриваемом помещении установлен источник теплопоступлений 4 (рисунок 2), то физическая картина кардинально изменяется при  $t_n < t_g$ . Линия I на графике (рисунок 2) соответствует изменению аэростатического давления снаружи здания согласно выражению  $= -\rho$ , а линия II на графике соответствует изменению аэростатического давления внутри здания  $P = P_a - \rho gh$ , тогда оставшаяся заштрихованная часть графика будет соответствовать перепаду аэростатических давлений снаружи и внутри здания, т.е.

$$\Delta = - = +\rho - -\rho \quad , \quad (5)$$

откуда после преобразований получим

$$= \Delta = \rho - \rho \quad . \quad (6)$$

На графике (рисунок 2) заштрихованная часть является расчётной эпюрой избыточного гравитационного (аэростатического) давления при действии только сил гравитации.



**Рисунок 2** –Изменение аэростатического давления по высоте помещения при  $t_n < t_g$ : 1 – приточные отверстия летом, 2 – приточные отверстия зимой, 3 – вытяжные отверстия

В процессе естественной циркуляции воздушных потоков внутри помещений с теплоизбытками образуется несколько характерных зон с различными температурами.

При аэрации зданий снаружи помещений с теплоизбытками принимается наружная температура  $t_{ng}$  воздуха для расчёта вентиляции летнего и зимнего периодов года.

Температура воздуха внутри помещений со стороны приточных отверстий принимается на  $+5^{\circ}\text{C}$  выше, чем  $t_{\text{вн}}$ , т.е.

$$t_{\text{пр}} = t_{\text{вн}} + 5, ^{\circ}\text{C} \quad (7)$$

Температура воздуха в рабочей зоне  $t_{\text{рз}}$  на расстоянии  $r = 2$  м от пола помещения определяется из выражения

$$t_{\text{рз}} = t_{\text{пр}} + \Delta t, \quad (8)$$

где  $\Delta t = +8^{\circ}\text{C}$  – нормируемый температурный перепад.

Температура  $t_{\text{вн}}$  уходящего через вытяжные отверстия внутреннего воздуха равна [2, с.24]

$$t_{\text{вн}} = \frac{t_{\text{вн}} - 1 - t_{\text{вн}}}{\dots} = \frac{t_{\text{вн}} - 1 - t_{\text{вн}}}{\dots} + \dots, \quad (9)$$

где  $\dots$  – коэффициент, выражающий отношение активных тепловыделений, непосредственно влияющих на температуру воздуха в рабочей зоне, к общему количеству активных тепlopоступлений в помещения, не зависящих от расчётного периода года, например, для литейных цехов согласно СН 7–57.

$$\dots = \frac{\dots}{\dots} = 0,3 \quad (10)$$

Тогда с учетом (8) из выражения (10) можно определить температуру воздуха  $t_{\text{рз}}$ , удаляемого из помещения с теплоизбытками

$$t_{\text{рз}} = \frac{\Delta t}{\dots} + \dots \quad (11)$$

Таким образом, согласно вышеприведенной методике можно определить температуры воздуха  $t_{\text{пр}}$ ,  $t_{\text{рз}}$  и  $t_{\text{вн}}$  во всех характерных зонах помещения.

В качестве примера определим температуры в характерных зонах для литейного цеха, расположенного в г. Полоцке, для которого  $t_{\text{вн}} = +20^{\circ}\text{C}$  (летом),  $t_{\text{вн}} = -25^{\circ}\text{C}$  (зимой).

Для летнего периода года

$$\begin{aligned} t_{\text{пр}} &= t_{\text{вн}} + 5 = 20 + 5 = 25^{\circ}\text{C}; \\ t_{\text{рз}} &= t_{\text{пр}} + \Delta t = 25 + 8 = 33^{\circ}\text{C}; \\ t_{\text{вн}} &= \frac{\Delta t}{0,3} + t_{\text{рз}} = \frac{8}{0,3} + 25 = 51,7^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Температура внутри помещения определяется как средняя  $t_{\text{вн}}$  и  $t_{\text{вн}}$ , т.е.

$$t_{\text{вн}} = \frac{t_{\text{пр}} + t_{\text{вн}}}{2} = \frac{33 + 51,7}{2} = 42,3^{\circ}\text{C}.$$

Плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ , определим по формуле

$$\rho = \frac{353}{273 + t_{\text{вн}}}. \quad (12)$$

Плотность наружного воздуха летом составит  $\rho = \frac{353}{273 + 20} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ , а воз-

духа внутри помещения летом -  $\rho = \frac{353}{273 + 42,3} = 1,12 \text{ кг/м}^3$ .

Для литейного цеха при  $h = 10$  м величина гравитационного давления летом равна

$$= \rho - \rho = 10 \cdot 98 \cdot 12 - 112 = 784 \text{ Па.}$$

Для зимнего периода года температура в характерных зонах литейного цеха в г. Полоцке

$$\begin{aligned} &= +5 = -25 + 5 = -20 \text{ }^{\circ}\text{C}; \\ &= +\Delta = -20 + 8 = -12 \text{ }^{\circ}\text{C}; \\ &= \frac{\Delta}{2} + = 26.7 - 20 = +6.7 \text{ }^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Плотность наружного воздуха зимой составит  $\rho = \frac{353}{273 - 25} = 1.42 \text{ кг/м}^3$ .

Температура внутреннего воздуха зимой составит

$$= = \frac{+}{2} = \frac{-12 + 6.7}{2} = -2.65 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Плотность воздуха внутри помещения летом  $\rho = \frac{353}{273 - 26.5} = 1.3 \text{ кг/м}^3$ .

Гравитационного давления зимой составит

$$= \rho - \rho = 10 \cdot 98 \cdot 1.42 - 1.3 = 118 \text{ Па.}$$

Для климатических условий г. Полоцка Витебской области согласно [6, т.4.5] средняя скорость ветра  $v = 5.1 \text{ м/с}$ .

Аэродинамика воздействия ветрового давления на здание характеризуется аэродинамическими коэффициентами: с наветренной стороны  $= +0.8$ , с заветренной стороны здания  $= -0.6$ , а динамическое ветровое давление на здание с наветренной стороны равно

$$= \frac{v^2 \rho}{2} = 0.8 \cdot \frac{5.1^2 \cdot 1.42}{2} = +14.7 \text{ Па.}$$

и соответственно с заветренной стороны

$$= \frac{v^2 \rho}{2} = -0.6 \cdot \frac{5.1^2 \cdot 1.42}{2} = -11.1 \text{ Па.}$$

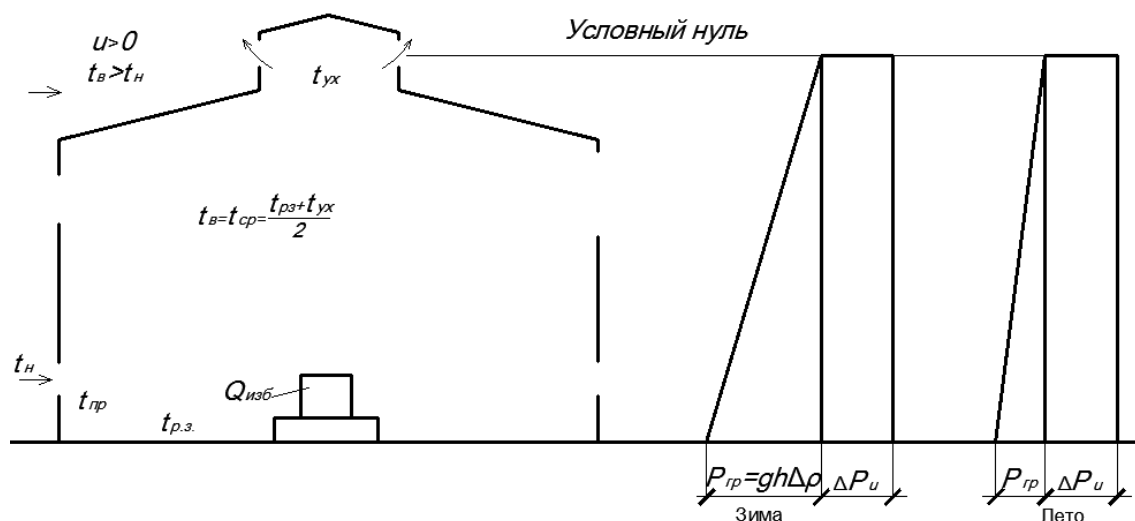
Влияние ветрового давления на здание оценивается как разность  $\Delta_v$ .

$$\Delta_v = - = 14.7 + 11.1 = 25.8 \text{ Па.}$$

Суммарное воздействие на здание гравитационного и ветрового  $\Delta_v$  давлений определит построение эпюр давлений на здание для летнего и зимнего периодов года.

На рисунке 3 выполнено построение эпюр давлений для летнего и зимнего периодов года при совместном воздействии на здание гравитационного и ветрового  $\Delta_v$  давлений, формирующих тепловой и воздушный режим зданий при аэрации.

Динамические процессы в горячих цехах тесно связаны с тепломассообменом. Суммарные тепловыделения от нагретых поверхностей печей, остывающего и расплавленного металла осуществляются за счёт конвекции и лучеиспускания.



**Рисунок 3** – Построение эпюры давлений при совместном воздействии гравитационного и ветрового давлений на здание летом и зимой

Теплопоступления при конвективном теплообмене определяются выражением [1, с.51].

$$= \alpha \cdot ( - ). \quad (13)$$

а при лучистом теплообмене

$$= \alpha \cdot ( - ). \quad (14)$$

или суммарно

$$_{\Sigma} = + = \alpha + \alpha \cdot ( - ). \quad (15)$$

где  $\alpha = \sqrt[4]{ - }$  - коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>·°С; - температура нагретой поверхности тела, °С; - температура внутреннего воздуха, °С; - площадь нагретой поверхности, м<sup>2</sup>; - опытный коэффициент (для вертикальных поверхностей = 2,2, для горизонтальных, обращённых вверх = 2,8, для горизонтальных, обращённых вниз = 1,1).

Коэффициент лучистого теплообмена  $\alpha$  определяется из выражения [1, с.51]

$$\alpha = \frac{\left( \frac{273 + }{100} \right)^4 + \left( \frac{273 + }{100} \right)^4}{ - }, \quad (16)$$

где ' - приведенный коэффициент излучения определяется по формуле

$$' = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}} \quad (17)$$

$_1$  и  $_2$  - коэффициенты излучения взаимнооблучаемых поверхностей;  $_3 = 4,96$  - коэффициент излучения абсолютно чёрного тела.

Для условий литейных цехов '  $\cong 4$  [1, с.520].

По технологическим условиям взятого для примера литейного цеха г. Полоцка летом = 42,3 °С, = 300 °С, = 10 м<sup>2</sup>.

$$\alpha = 2,8 \sqrt[4]{300 - 42,3} = 2,8 \cdot 4 = 11,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}.$$

$$= \alpha \cdot ( - ) \cdot = 11,2 (300 - 42,3) \cdot 10 = 28862,4 \text{ Вт}.$$

$$\alpha = \frac{\left(\frac{273+300}{100}\right)^4 + \left(\frac{273+42,3}{100}\right)^4}{300-42,3} \cdot 4 = \frac{5,73^4 + 3,15^4}{257,7} \cdot 4 = 18,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}.$$

$$= 18,2 \cdot (300 - 42,3) \cdot 10 = 46901,4 \text{ Вт}.$$

$$\Sigma = 28862,4 + 46901,4 = 75763,8 \text{ Вт}.$$

При совместном действии ветра и сил гравитации имеем суммарное давление, Па

$$p_1 = \left( - \right) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} + \cdot (\rho - \rho_0). \quad (18)$$

$$p_1 = (0,8 + 0,6) \cdot \frac{12,51^2}{2} + 10 \cdot 9,8(1,2 - 1,12) = 29,64 \text{ Па}.$$

Проверяем соотношение ветрового давления к гравитационному, т.е.

$$\frac{v}{v_0} = \frac{21,8}{7,84} = 2,78 > 0,5, \text{ тогда при расчёте аэрации следует учитывать совместное}$$

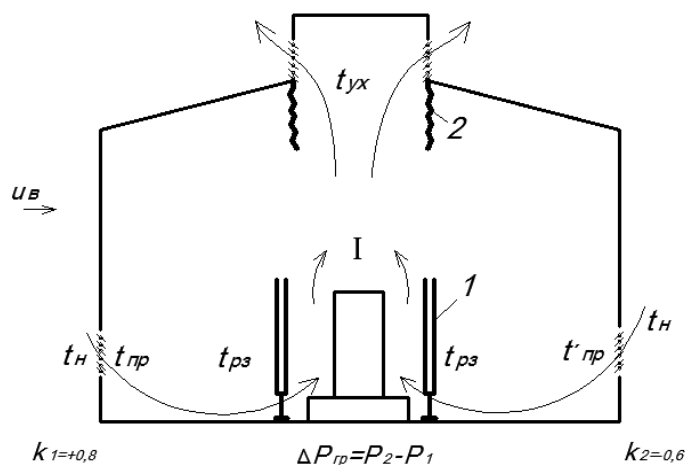
действие ветра и гравитационных сил [5, с.301].

Производительность приточных систем для разбавления избыточной теплоты при расчёте аэрации по схеме воздухообмена «снизу-вверх» для летнего периода года определяется из выражения [2, с.23]

$$G = \frac{\Sigma}{0,28 \cdot \rho \cdot (t_{yx} - t_{pr})} = \frac{0,3 \cdot 75763,8}{0,28 \cdot 1,2(42,3 - 20)} = 3033,5 \text{ кг/ч}.$$

$$F_1 = \frac{3033,5}{3600 \cdot \mu \cdot (2\rho)^{1,2} \cdot t_1^{1,2}} = \frac{3033,5}{3600 \cdot 0,5 \cdot (2 \cdot 1,2)^{1,2} \cdot 29,64^{1,2}} = 0,2 \text{ м}^2.$$

В целях снижения вредного воздействия на работающих высоких температур от нагретых поверхностей активных источников тепlopоступлений предлагается в горячих цехах применять технологическую схему управляемой экранно-шторной аэрации, ограничивающей зону высоких температур от рабочей зоны помещений так, как это показано на рисунке 4.



**Рисунок 4** – Схема управляемой экранно-шторной аэрации, ограничивающей тепловые горизонтальные воздействия в рабочей зоне с возможностью перемещения избыточной теплоты восходящими вертикальными конвективными потоками I, формирующими циркуляцию внутри здания

Легкие переносные экраны 1, выполненные из листовых материалов, хорошо отражающих лучистую энергию от расплавленного металла или нагретых поверхностей оборудования горячих цехов, например, алюминиевой фольги с жестким каркасом из любого профильного металла, создадут экранированную защиту рабочей зоны.

Шторы 2 из термостойкого материала, например, из стеклоткани, спускающиеся сверху от конструкции аэрационного фонаря или вытяжной шахты, установленной на крыше, позволяют максимально изолировать рабочую зону от активного воздействия проникающей тепловой радиации от горячих источников, от которых вверх поднимаются конвективные потоки перегретого воздуха.

Предлагаемые технические решения для борьбы с тепловой радиацией от источника теплоты горячих цехов отличаются от всех известных аналогичных устройств простотой конструктивного исполнения, экономичностью в изготовлении, малой массивностью, мобильностью в эксплуатации, так как их конструкции могут перемещаться по цеху в пространстве по площади и высоте и при необходимости устанавливаться в любом месте или демонтироваться на некоторое время.

Высота экранов 1, а также глубина свесов штор 2 может регулироваться при необходимости для достижения максимального эффекта локализации тепловых воздушных потоков и вывода избыточной теплоты из рабочей зоны горячих производственных помещений.

### **Заключение**

Анализируя и обобщая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

- при аэрации цехов с теплоизбытками на формирование воздушных потоков совместное влияние оказывают силы гравитации с направленным движением «снизу-вверх» и горизонтально направленные перемещения воздушных масс под действием ветрового давления;
- тепловое воздействие на работающих от нагретых поверхностей происходит как за счет лучеиспускания, так и конвекции, что вызывает дискомфорт в рабочей зоне;
- необходимый санитарно-гигиенический эффект для снижения вредного воздействия высоких температур на работающих, можно обеспечить путем устройства специальных защитных ширм и штор, конструкции которых просты в изготовлении.

### **Список литературы**

1. Бромлей, М.Ф. Проектирование отопления и вентиляции / М.Ф. Бромлей, А.П. Щеголов. - М. : Издательство литературы по строительству, 1965. – 260с.
2. Кострюков, В.А. Сборник примеров расчёта по отоплению и вентиляции. – М.: Госстройиздат, 1962. – 200 с.
3. Рысин, С.А. Вентиляционные установки машиностроительных заводов: Справочник. – М. : Машиздат, 1964. – 704 с.
4. Внутренние санитарно-технические устройства: в 2-х ч. /Под ред. И.Г. Старовойрова.-М. : Стройиздат, 1978. – 510 с.
5. Отопление и вентиляция: Учебник для вузов. В 2-х ч. – Ч.2 Вентиляция/ Под ред. В.Н.Богословского. М. : Стройиздат, 1976 . – 440 с.
6. Строительная теплотехника. ТКП 45-2.04-43-2006.-Введ. 01.07.2001.-Минск : М-во арх. и строительства Республики Беларусь. – 2007.
7. СН 7-57 Указания по проектированию отопления и вентиляции производственных и вспомогательных зданий промышленных предприятий. Государственный комитет Совета Министров СССР по делам строительства. 1957.