



УДК 628.8

**Бройда В.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [broida@mail.ru](mailto:broida@mail.ru)

**Бабич Е.К.** – студент

E-mail: [babich.evgeniy1@mail.ru](mailto:babich.evgeniy1@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

## **Зависимости для расчета воздушно-струйного экрана над промышленной ванной**

### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследования выявить и представить в доступном для практического применения виде основные зависимости для расчета воздушно-струйных экранов над промышленными ваннами, полученные методом CFD. Характеристики взаимодействия плоской приточной струи и локализирующего щелевого стока в воздушно-струйных экранах, зависят в основном от геометрических условий: расстояния между приточным устройством и стоком  $l$ , расстояния от оси воздушно-струйного экрана до зеркала жидкости  $h$ , ширины щелевого стока  $B$ .

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в представленных в безразмерном виде зависимостях, требующихся для расчетов воздушно-струйных экранов над промышленными ваннами. Такие зависимости даны в виде аналитических формул и в виде графиков. Из-за сложности рассчитанных течений аналитическое описание достаточно громоздко и более подходит для компьютерной программы расчета. Графические материалы доступны для выполнения расчетов ручным способом.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для вентиляции производственных зданий состоит в более полном и правильном учете геометрических факторов при расчете воздушно-струйных экранов над промышленными ваннами. Примеры иллюстрируют способ применения полученных зависимостей.

**Ключевые слова:** воздушно-струйный экран, плоская струя, сток, расход, расчет.

### **Введение**

Воздушно-струйные экраны применяются в гражданских и производственных зданиях для отделения пространства с неблагоприятными для человека условиями от остального пространства и, в тоже время, они не создают непроницаемой перегородки, что во многих ситуациях совершенно необходимо. Так воздушно-тепловые завесы у дверей и ворот [1] защищают помещения от проникновения наружного воздуха в зимний период, но не препятствуют прохождению людей и проезду автотранспорта.

В производственных помещениях применяются разнообразные активированные отсосы, представляющие собой разновидность локализуемого воздушно-струйного экрана, образованного приточной струей и стоком. Наиболее часто используются передувки – воздушно-струйный экран образованный плоской приточной струей, истекающей из приточной щели, располагаемой вдоль стороны промышленной ванны. Развиваясь над зеркалом жидкости, струя отделяет пространство помещения от вредных веществ, выделяющихся при проведении процесса в ванне. Струя транспортирует воздух, насыщенный этими веществами к щелевому стоку, располагающемуся вдоль противоположного борта ванны, улучшая возможность локализации загрязненного воздуха и снижая требующийся расход удаляемого воздуха. Этим и объясняются преимущества передувки над обычными бортовыми отсосами, которые также применяются у промышленных ванн. В то же время воздушно-струйный экран позволяет беспрепятственно погружать обрабатываемые детали в ванну и вынимать их из нее.

Основу существующего метода расчета активированных отсосов [1], составляют экспериментальные и аналитические исследования взаимодействия плоской струи и щелевого стока. Эксперименты проводились на небольших моделях, которые помещались в поле прибора Теплера, позволяющего непосредственно наблюдать слегка подогретые воздушные потоки, в том числе улавливание плоской струи щелевым стоком.

В аналитическом исследовании применялся способ наложения потоков и метод интегральных соотношений, позволяющий рассчитывать толщину и другие необходимые характеристики струи, развивающейся в зоне действия стока.

Как базовый изучался вариант взаимодействия струи и стока при их соосном расположении в пространстве вдали от ограничивающих поверхностей. Полученные результаты с определенной коррекцией применялись к расчету передувки у промышленной ванны.

В действительности значительное влияние на работу таких устройств оказывают геометрические ограничения, такие как зеркало жидкости в ванне, борта ванны, которые существенно усложняют картину течения. Струя, развиваясь вблизи зеркала жидкости, настигается на его поверхность, проявляется эффект Коанда. Наличие высоких бортов ванны также усложняет аналитическое описание.

В настоящее время для расчета течений при сложных граничных условиях, таких как воздушные струи в помещениях, и течения вблизи стоков, большое распространение получили численные методы CFD (Calculating Fluid Dynamics) [2-4 и др.].

Метод CFD использован для численного моделирования течений в воздушно-струйных экранах в виде завес у проемов дверей [5-7], экспериментальное исследование подобных течений выполнено в работах [7, 8].

Для локализуемых устройств, какими и являются передувки, важны условия полного улавливания загрязненного примесью воздушного потока наименьшим расходом удаляемого воздуха – условия предельного улавливания. Это условие соответствует наиболее экономичному расходу воздуха и, связанных с ним эксплуатационных затрат на перемещение воздуха, его очистку и подогрев в холодный период года. Такие условия используются, в частности, в работе [9].

В работе [10] методом CFD моделировались двумерные течения, сформированные плоской приточной струей и щелевым стоком при сложных граничных условиях, характерных для воздушно-струйного экрана над зеркалом промышленной ванны. Выявлены качественные соотношения для характерных параметров такого течения в условиях предельного улавливания при различных сочетаниях основных геометрических размеров, таких как: расстояние между приточным устройством и стоком  $l$ , расстояние от оси воздушно-струйного экрана до зеркала жидкости  $h$ , ширина щелевого стока  $B$ . Результаты моделирования позволяют уточнить методику расчета таких устройств, с учетом полученных новых результатов.

Целью данной работы является обработка результатов численного моделирования методом CFD, выполненных в [10], получение необходимых количественных связей между основными расчетными характеристиками и их представление в виде, доступном для практического применения.

### Основная часть

За основу принимается подход к расчету воздушно-струйного экрана над промышленной ванной, представленный в [1]. Для реализации такого подхода необходимо знать количественную зависимость относительного расхода в режиме предельного улавливания  $L^*$  от основных параметров взаимодействия плоской приточной струи и щелевого стока, расположенных над противоположными бортами промышленной ванны. К ним относятся:

– высота расположения оси струи и стока над зеркалом жидкости в ванне в относительном выражении  $h^*=h/l$ ;

– ширина всасывающей щели стока в относительном выражении  $B^*=B/l$ .

Причем за характерный геометрический размер принимается расстояние между приточной щелью и стоком, которая равна ширине ванны – величина  $l$ . За величину характерного расхода воздуха принимается расход в свободной плоской струе на расстоянии  $l$  от места истечения  $L_{пл}$ , приходящийся на 1 м длины приточной щели, который определяется выражением:

$$L_{пл} = 0,205 \cdot m \cdot v_0 \cdot \sqrt{b \cdot l}, \quad (1)$$

где  $m$  – кинематический (скоростной) коэффициент приточного устройства, определяется по справочным данным, для устройства с идеально равномерным полем скорости истечения теоретическое значение  $m = 2,62$ ;

$v_0$  – скорость истечения струи из приточного устройства;

$b$  – ширина приточной щели.

Тогда:

$$L^* = L/L_{\Pi}$$

Таким образом, по результатам численного исследования [10] должна быть получена зависимость:

$$L^* = f(h^*, B^*) \quad (2)$$

При обработке результатов численного моделирования было установлено, что функция (2) имеет сложную форму с максимумом при  $h^* = 0,35$ . Поэтому восходящие и нисходящие линии  $L^*$  аппроксимировались отдельными семействами кривых, для описания которых использовались полиномиальные зависимости для представления коэффициентов уравнения (2).

Окончательный вид зависимости (2) после обработки описывается громоздкими выражениями при  $h^* \leq 0,35$ :

$$L^* = (-10,759 \cdot (B^*)^2 + 7,0667 \cdot B^* - 0,111) \cdot (h^*)^2 + (13,676 \cdot (B^*)^2 - 6,3867 \cdot B^* + 0,6786) \cdot h^* + 0,707, \quad (3)$$

при  $h^* \geq 0,35$

$$L^* = (-39,435 \cdot (B^*)^2 + 12,83 \cdot B^* - 3,0193) \cdot (h^*)^3 + (84,23 \cdot (B^*)^2 - 28,577 \cdot B^* + 6,5944) \cdot (h^*)^2 + (-60,222 \cdot (B^*)^2 + 21,432 \cdot B^* - 4,832) \cdot h^* + 15,222 \cdot (B^*)^2 - 5,7167 \cdot B^* + 1,9228. \quad (4)$$

Графически эта зависимость представлена на рис. 1.

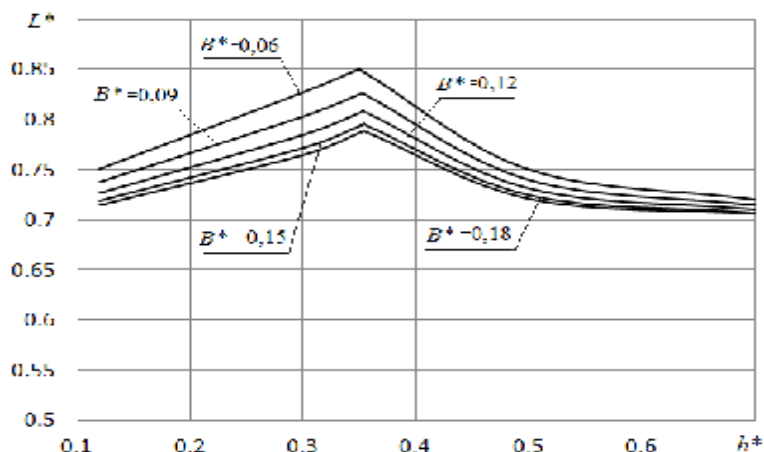


Рис. 1. График зависимости  $L^* = f(h^*, B^*)$

Можно отметить, что линии  $B^* = 0,18$  и  $B^* = 0,24$  очень близки и практически сливаются в одну линию.

Другой важной связью, которая определяется по результатам численного моделирования и применяется в методике расчета, является зависимость минимума максимального значения продольной компоненты скорости в воздушно-струйном экране в режиме предельного улавливания – критическая скорость  $v_{кр}$ , которая также представляется в относительном безразмерном виде:

$$v_{кр}^* = v_{кр} / v_l, \quad (5)$$

где  $v_l$  – максимальная (осевая) скорость в свободной плоской приточной струе на расстоянии  $l$  от места выпуска, которая рассчитывается при  $m = 2,62$  по формуле:

$$v_l = m \cdot v_0 \cdot \sqrt{b/l}. \quad (6)$$

Характер изменения величины  $v_{кр}^*$ , в условиях непростой геометрии границ течения, учитывая эффекта настиления струи на зеркало жидкости и влияние бортов ванны, достаточно сложен.

Картины течений различаются в зависимости от значения относительной высоты расположения оси струи и стока над зеркалом жидкости в ванне  $h^*$ . На рис. 2 приведены две характерные картины изолиний продольных компонент скорости в воздушно-струйном экране, полученные численным расчетом для режимов предельного улавливания. Пунктиром показаны линии расположения максимальных значений продольных составляющих скорости, из которых находились их минимальные значения –  $v_{кр}$ .

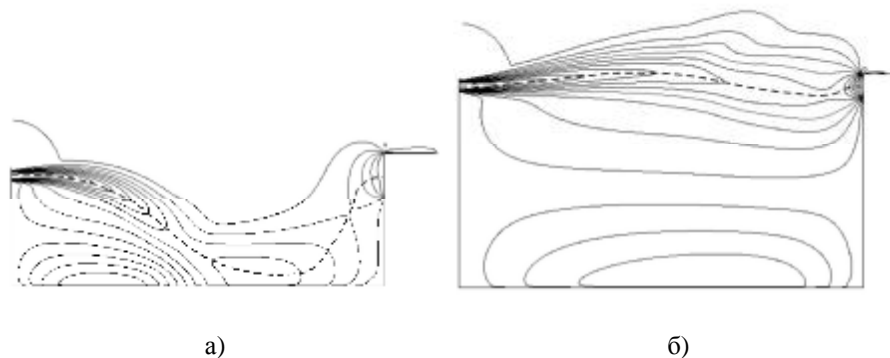


Рис. 2. Расчетная картина течения (в виде продольных составляющих скорости) в воздушно-струйном экране со щелевым стоком над зеркалом жидкости в ванне в режиме предельного улавливания при  $l=1$  м,  $b=0,02$  м,  $v_0=10$  м/с:  
 а –  $h=0,3$  м,  $B=0,12$  м,  $u=4,9$  м/с; б –  $h=0,5$  м,  $B=0,06$  м,  $u=9,0$  м/с

Так при изменении от величины  $h^*$  от 0 до 0,4 проявляется эффект Коанда – настиание струи на поверхность жидкости. Вблизи борта у приточного насадка развивается зона циркуляционного движения, и линия максимальных продольных составляющих скорости потока сильно искривляется. При величинах  $h^*>0,4$  зона циркуляции покрывает все зеркало жидкости в ванне, а линия максимальных значений продольной составляющей скорости выравнивается, приближается к оси системы приточный насадок – сток.

Зависимость длины зоны циркуляции  $l_{ц}^*=l_{ц}/l$  от величины  $h^*$ , полученная обработкой результатов исследования [10], графически показана на рис. 3.

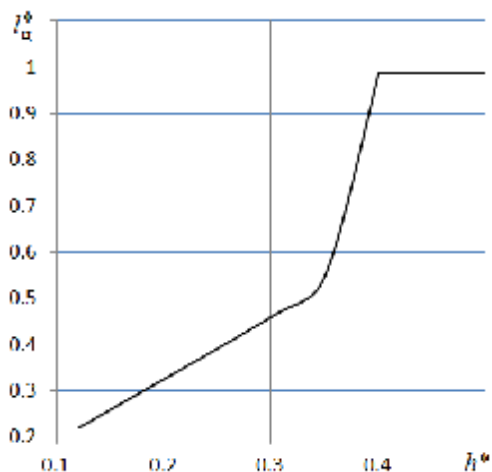


Рис. 3. Расчетная зависимость относительной длины зоны циркуляционного потока  $l_{ц}^*=l_{ц}/l$  над зеркалом жидкости

Зависимость  $v_{кр}^*$  в режиме предельного улавливания от величин  $h^*$  и  $B^*$  получена из обработки результатов численного моделирования [10], и приближенно выражается формулами при  $h^*\leq 0,3$ :

$$v_{кр}^* = -2,1444 \cdot h^* + 1,1385, \tag{7}$$

при  $h^* \geq 0,3$

$$v_{кр}^* = (8,6528 \cdot B^* - 7,4917) \cdot (h^*)^2 + (-101383 \cdot B^* + 8,99) \cdot h^* + 2,3367 \cdot B^* - 1,5276. \quad (8)$$

Графически зависимости (7)-(8) представлены на рис. 4. Величина  $v_{кр}^*$  при  $h^* \leq 0,3$  практически зависит только от относительной высоты  $h^*$ . При  $h^* \geq 0,3$  определенное влияние оказывает и относительная ширина щели стока  $B^*$ .

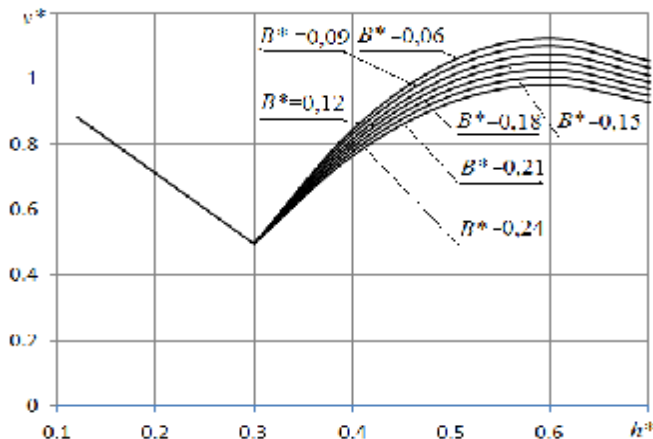


Рис. 4. Зависимость  $v_{кр}^*$  от величин  $h^*$  и  $B^*$  в режиме предельного улавливания

Представленные зависимости (5)-(8) составляют основу метода расчета воздушно-струйного экрана над зеркалом жидкости в промышленной ванне. Другие положения расчета сохраняются, в основном, такими же, какие применяются в методике расчета [1].

#### Примеры расчета и обсуждение.

*Пример расчета 1.* Рассчитать воздушно-струйный экран для ванны травления. Температура раствора  $T=333$  К. Ширина ванны  $l=2,3$  м, длина  $a=1,6$  м. Расстояние от оси системы струя-отсос до зеркала жидкости в ванне  $h=0,25$  м. Температура воздуха в помещении  $T_B=293$  К. Кинематический коэффициент приточного насадка  $m=2,5$ .

*Решение.* Принимается ширина приточной щели  $b=0,02$  м; ширина щели стока  $B=0,23$  м. Определяется  $v_{кр}^*$  для настилающейся струи по формуле [1]:

$$v_{кр} = 1,83 \cdot \sqrt{g \cdot l \cdot \Delta T / T_B} = 1,83 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 2,3 \cdot (333 - 293) / 293} = 3,2 \text{ м/с.}$$

При значениях  $B^*=0,23/2,3=0,1$  и  $h^*=0,25/2,3=0,11$  по (7) или по графику на рис. 4 находится  $v_{кр}^*=0,9$ . Из определения  $v_{кр}^*$  (5) находится  $v_l = v_{кр} / v_{кр}^*$ ,  $v_l = 3,2 / 0,9 = 3,56$  м/с, исходя из (6) рассчитывается скорость истечения струи  $v_0 = v_l / (m \cdot \sqrt{b/l})$ ,  $v_0 = 3,56 / (2,5 \cdot \sqrt{0,02/2,3}) = 15,3$  м/с, тогда расход приточного воздуха равен  $L_0 = v_0 \cdot b \cdot a = 15,3 \cdot 0,02 \cdot 1,6 = 0,49$  м<sup>3</sup>/с или 1764 м<sup>3</sup>/ч.

Расход воздуха в свободной струе на расстоянии от приточного насадка  $l=2,3$  м определяется по формуле (1)  $L_{л} = 0,205 \cdot 2,5 \cdot 15,3 \cdot \sqrt{0,02 \cdot 2,3} \cdot 1,6 = 2,69$  м<sup>3</sup>/с или 9680 м<sup>3</sup>/ч.

При значениях  $B^*=0,1$  и  $h^*=0,11$  по (3) или по графику на рис. 1 находится  $L^*=0,72$ , тогда расход воздуха, удаляемого через щелевой сток, составит:

$$L = L_{л} \cdot L^* = 2,69 \cdot 0,72 = 1,94 \text{ м}^3/\text{с} \text{ или } 6984 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Результаты такого расчета в 1,4 больше чем по методике [1].

*Пример расчета 2.* Рассчитать воздушно-струйный экран для ванны латунирования. Температура раствора в ванне  $T=299$  К. Ширина ванны  $l=1,0$  м, длина  $a=1,2$  м. Расстояние от оси системы струя-отсос до зеркала жидкости в ванне  $h=0,31$  м. Температура воздуха в помещении  $T_B=291$  К. Кинематический коэффициент приточного насадка  $m=2,5$ .

*Решение.* Принимается ширина приточной щели  $b=0,01$  м; ширина щели стока  $B=0,06$  м. Определяется  $v_{кр}$  для настилающейся струи по формуле [1]:

$$v_{кр} = 1,83 \cdot \sqrt{g \cdot l \cdot \Delta T / T_B} = 1,83 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 1,0 \cdot (299 - 291) / 291} = 0,95 \text{ м/с.}$$

При значениях  $B^*=0,06/1,0=0,06$  и  $h^*=0,31/1,0=0,31$  по (7) или по графику на рис. 4 находится  $v_{кр}^*=0,5$ . Из определения  $v_{кр}^*$  (5) находится  $v_l=v_{кр}/v_{кр}^*$ ,  $v_l=0,95/0,5=1,9$  м/с, исходя из (6) рассчитывается скорость истечения струи  $v_0=v_l/(m\cdot\sqrt{b/l})$ ,  $v_0=1,9/(2,5\cdot\sqrt{0,01/1,0})=7,6$  м/с, тогда расход приточного воздуха равен  $L_0=v_0\cdot b\cdot a=7,6\cdot 0,01\cdot 1,2=0,091$  м<sup>3</sup>/с или 328 м<sup>3</sup>/ч.

Расход воздуха в свободной струе на расстоянии от приточного насадка  $l=1,0$  м определяется по (1)  $L_{п}=0,205\cdot 2,5\cdot 7,6\cdot\sqrt{0,01\cdot 1,0}\cdot 1,2=0,47$  м<sup>3</sup>/с или 1692 м<sup>3</sup>/ч.

При значениях  $B^*=0,06$  и  $h^*=0,31$  по (3) или по графику на рис. 1 находится  $L^*=0,83$ , тогда расход воздуха, удаляемого через щелевой сток, составит:

$$L=L_{п}\cdot L^*=0,47\cdot 0,83=0,39$$
 м<sup>3</sup>/с или 1404 м<sup>3</sup>/ч.

В методиках расчета подобных устройств, например, в [1] предполагается, что при величине  $h^*>0,15$  плоская приточная струя имеет характеристики более близкие к свободной, чем к полуограниченной струе. Относительный расход удаляемого воздуха для такого случая следовало бы принимать  $L^*>1$ , по данным [1]  $L^*=1,5$ . Тогда в данном примере расчетный расход удаляемого воздуха был бы значительно больше  $L=L_{п}\cdot L^*=0,47\cdot 1,5=0,705$  м<sup>3</sup>/с или 2538 м<sup>3</sup>/ч, что на 81 % больше величины полученной с учетом данного исследования.

Таким образом, представленный материал, полученный на основе численного исследования [10], составляет основу более точного метода расчета подобных устройств. Он позволяет более полно учитывать особенности взаимодействия плоской струи со щелевым стоком при их расположении вблизи от зеркала жидкости в ванне.

В полной методике расчета локализирующего воздушно-струйного экрана над зеркалом жидкости в промышленной ванне, можно пользоваться логикой методики расчета [1] и представленными в данной работе количественными характеристиками.

Возможно, некоторой коррекции требуют уточняющие поправки на подвижность воздуха в помещении и на токсичность выделяющихся из ванны вредных веществ. Кроме того, как показано в работе [10], этот расчет может применяться для воздушно-струйных экранов над ваннами с высокими бортами, обеспечивающими локализацию вредных выделений в период обработки деталей и в период стекания жидкости, когда обработанные детали остаются под защитой воздушно-струйного экрана.

### Заключение

На основе расчетов течений в локализуемых воздушно-струйных экранах, выполненных методом CFD, получены количественные характеристики, связывающие параметры плоской приточной струи и щелевого стока, расположенных на одной оси над зеркалом жидкости в промышленной ванне в режиме предельного улавливания.

Представлены в аналитическом виде и в виде графиков зависимости относительного расхода удаляемого воздуха  $L^*$ , относительной длины циркуляционной зоны  $l_{ц}^*$ , а также относительной критической скорости  $v_{кр}^*$  от основных геометрических параметров. Такие геометрические параметры также выражены в безразмерном виде: относительная высота оси взаимодействия системы струя-сток  $h^*$  и относительная ширины щели стока  $B^*$ .

Полученные зависимости  $L^*(h^*, B^*)$  и  $v_{кр}^*(h^*, B^*)$  составляют основу расчета локализирующих воздушно-струйных экранов над промышленными ваннами. Приведены примеры расчетов расчета воздушно-струйных экранов, иллюстрирующие способ применения полученных зависимостей. Показано их большее соответствие условиям развития течений.

### Список библиографических ссылок

1. Посохин В. Н. Аэродинамика вентиляции. М. : АВОК-ПРЕСС. 2008. 209 с.
2. Посохин В. Н., Кареева Ю. Р. Характеристики турбулентной плоской струи в тупике при разном расположении приточных и вытяжных отверстий // Известия вузов. Строительство. 2011. № 7. С. 27–33.

3. Денисихина Д. М., Шупашева Р. Ж., Колубков А. Н. Решение задач распределения воздуха в спортивном зале борьбы // АВОК. 2015. № 4. С. 62–68.
4. Цуляну К. Р., Гуцул В. Г., Зайцев О. Н., Богатикова Н. П. Моделирование работы щелевого отсоса взаимодействующего с плоской газовой струей // Строительство и безопасность. 2012. Вып. 41. С. 235–239.
5. Wang. L. Investigation of the Impact of Building Entrance Air Curtain on Whole Building Energy Use. Air Curtain Study. The Air Movement and control Association International, Inc. 2013. 16 p. URL: <https://www.amca.org> (дата обращения: 03.11.16.).
6. Georgiev E., Stankov P., Markov D. On the numerical study of air curtains. Technical University, Sofia, 2013. 7 p. URL: <http://e-university.tu-sofia.bg> (дата обращения: 03.11.16.).
7. Marnix Van Belleghem, Gregory Verhaeghe, Christophe T'Joen, Henk Huisseune, Peter De Jaeger, Michel De Paepe. Heat Transfer Through Vertically Downward-Blowing Single-Jet Air Curtains for Cold Rooms // Heat Transfer Engineering. 2012. Vol. 33, Issue 14. P. 1196–1206. URL: <https://biblio.ugent.be> (дата обращения: 28.03.17.).
8. Polak J. Experimental study of the airflow distribution in a room with heating equipment. Norwegian University of Science and Technology. 2015. September. 88 p. URL: <https://brage.bibsys.no> (дата обращения: 02.01.17.).
9. Варсегова Е. В., Посохин В. Н. Об условии предельного улавливания потока вредных выделений местным отсосом // Известия вузов. Строительство. 2015. № 11-12. С. 18–22.
10. Бабич Е. К., Бройда В. А. Взаимодействие воздушно-струйного экрана со щелевым стоком // Известия КГАСУ. 2017. № 1 (39). С. 159–165.

**Broyda V.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [broida@mail.ru](mailto:broida@mail.ru)

**Babich E.K.** – student

E-mail: [babich.evgeniy1@mail.ru](mailto:babich.evgeniy1@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Dependencies for calculating the air-jet screen over an industrial bath**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The purpose of the study is to identify and present, in an accessible form for practical applications, the basic dependencies for the calculation of air screens over industrial baths obtained by the CFD method. The parameters of the interaction of a flat jet flow and a localizing slot outlet in air screens depend mainly on the geometric conditions: the distance between the supply and discharge device  $l$ , the distance from the axis of the air screen to the liquid mirror  $h$ , width of the slot outlet  $B$ .

*Results.* The main results of the research consist in the dependences presented in the dimensionless form, which are required for the calculation of air screens over industrial baths. Such dependencies are given in the form of analytical formulas and in the form of graphs. Because of the complexity of the calculated flows, the analytical description is rather cumbersome and more suitable for a computer calculation program. Graphic materials are available for manual calculations.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the ventilation of industrial buildings is to more fully and correctly take into account the geometric factors in the calculation of air screens over industrial baths. The examples illustrate how to apply the obtained dependencies.

**Keywords:** air-jet screen, flat jet flow, outlet, air flow, calculation.

### References

1. Posohin V. N. Aerodynamics of ventilation. M. : AVOK-PRESS, 2008. 209 p.
2. Posokhin V. N., Kareeva Y. R. Axially symmetric turbulent jet in a deadlock // *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*. 2011. № 3. P. 64–70.
3. Denisikhina D.M, Shupasheva R. Zh., Kolubkov A.N. Solving the problems of air distribution in the sports hall of struggle // *AVOK*. 2015. № 4. P. 62–68.
4. Tsulyanu K. R., Hutsul V. G., Zaitsev O. N., Bogatikova N. P. Simulation of the suction slot cooperating with the plane gas jet // *Stroitelstvo i bezopasnost*. 2012. Issue 41. C. 235–239.
5. Wang. L. Investigation of the Impact of Building Entrance Air Curtain on Whole Building Energy Use. Air Curtain Study. The Air Movement and control Association International, Inc. 2013. 16 p. URL: <https://www.amca.org> (reference date: 03.11.16.).
6. Georgiev E., Stankov P., Markov D. On the numerical study of air curtains. Technical University, Sofia. 2013. 7 p. URL: <http://e-university.tu-sofia.bg> (reference date: 03.11.16.).
7. Marnix Van Belleghem, Gregory Verhaeghe, Christophe T'Joel, Henk Huisseune, Peter De Jaeger, Michel De Paepe. Heat Transfer Through Vertically Downward-Blowing Single-Jet Air Curtains for Cold Rooms // *Heat Transfer Engineering*. 2012. Vol. 33, Issue 14. P. 1196-1206. URL: <https://biblio.ugent.be> (reference date: 28.03.17.).
8. Polak J. Experimental study of the airflow distribution in a room with heating equipment. Norwegian University of Science and Technology. 2015. September. 88 p. URL: <https://brage.bibsys.no> (reference date: 02.01.17.).
9. Varsegova E. V., Posokhin V. N. On a condition limiting the flow of harmful emissions capture local suction // *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*. 2015. № 11-12. P. 18–22.
10. Babich E. K., Broyda V. A. Interaction of air screen with a slot outlet // *Izvestiya KGASU*. 2017. № 1 (39). P. 159–165.