



УДК 628.8

Бабич Е.К. – студент

E-mail: babich.evgeniy1@mail.ru

Бройда В.А. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: broida@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Взаимодействие воздушно-струйного экрана со щелевым стоком

Аннотация

Постановка задачи. Исследуется воздушно-струйный экран над промышленной ванной, защищающий атмосферу помещения от вредных выделений. Методом CFD рассчитываются течения, сформированные плоской приточной струей и щелевым стоком при сложных граничных условиях. Учитываются: расстояние между приточным устройством и стоком l , расстояние от оси воздушно-струйного экрана до зеркала жидкости h , ширина щелевого стока B .

Результаты. Установлено, что в режиме полного улавливания струи минимальным расходом воздуха (предельное улавливание) при $h^* = h/l < 0,4$ струя настигается на зеркало жидкости, вблизи приточного устройства формируется циркуляционная зона. При больших величинах h^* под воздушным экраном формируется сплошная зона циркуляции, покрывающая все зеркало жидкости. Увеличивая высоту h^* можно размещать под экраном детали на время стекания жидкости. Определено, что в режиме предельного улавливания относительный расход удаляемого воздуха изменяется в диапазоне от $L^* = L/L_{\text{п}} \approx 0,71$ до $L^* \approx 0,83$.

Выводы. В режиме предельного улавливания расход воздуха, удаляемого щелевым стоком, приблизительно соответствует расходу в полуограниченной приточной струе и слабо зависит от расстояния от оси «струя – сток» до зеркала жидкости и от ширины щели стока. Результаты исследования могут быть применены для расчета воздушно-струйных экранов у ванн с высокими бортами, обеспечивающими защиту от вредных выделений, как в режиме обработки деталей, так и в режиме стекания жидкости.

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

Введение

В вентиляционной практике находят широкое применение воздушно-струйные экраны, которые используются для отделения зоны помещения с более благоприятными параметрами от зоны с менее благоприятными параметрами воздушной среды. Такими в частности являются разнообразные варианты воздушно-тепловых завес, защищающих внутреннюю среду помещения от втекания наружного холодного воздуха в зимний период и повышающих температуру воздуха в зоне открываемых проемов ворот и дверей [1 и др.].

В общественных зданиях воздушно-струйный экран, образованный плоской струей, истекающей из щелевого приточного воздухораспределителя, может отделять, например, зону помещения с разрешенным курением, от зоны помещения для некурящих [2].

Еще более разнообразны применения локализуемых воздушно-струйных экранов в производственных помещениях. Воздушный экран отделяет источник вредных выделений от воздушной среды помещения и транспортирует попавшие в воздушный поток вредные выделения к месту их локализации: по такому принципу работают многие разновидности активированных местных отсосов [1].

В основе работы локализирующего воздушно-струйного экрана лежит улавливание загрязненной примесью плоской струи щелевым стоком. Среди вариантов взаиморасположения воздушно-струйного экрана, щелевого стока и поверхности источника вредных выделений наиболее часто встречается расположенные на одной оси приточный насадок и щелевой сток над зеркалом жидкости в промышленной ванне.

В основу метода расчета активированных отсосов, представленного в [1] положено аналитическое исследование взаимодействия плоской струи и щелевого стока, использующее способ наложения потоков и базирующееся на методе интегральных соотношений. В основном рассмотрено взаимодействия струи и стока при их расположении на одной оси вдали от каких-либо ограничивающих поверхностей. Затем, полученные результаты с некоторыми допущениями применены к расчету воздушно-струйного экрана у промышленной ванны.

В реальных устройствах такого типа геометрические условия значительно сложнее – существенную роль играют ограничивающие поверхности: зеркало жидкости в ванне, борта ванны, которые заметно усложняют картину течения, затрудняя ее аналитическое исследование.

В настоящее время большое распространение для решения задач аэродинамики вентиляции, в частности для расчета струйных течений и течений вблизи стоков, получили численные методы CFD (Calculating Fluid Dynamics) [3-5 и др.].

Условия предельного улавливания – полного улавливания загрязненного примесиями воздушного потока минимальным расходом удаляемого воздуха представлены и используются, например, в работе [6].

Исследования течений в воздушно-струйных экранах в виде завес у проемов дверей методом CFD выполнены в работах [7-9], результаты представлены расчетными линиями тока, полями скорости и температуры, экспериментальное исследование подобных течений приведено, например, в работе [10].

Целью данной работы является определение методом CFD основных количественных соотношений для локализирующего воздушно-струйного экрана над зеркалом жидкости в ванне, сформированного плоской струей и щелевым стоком, расположенными на одной оси, и работающего в режиме предельного улавливания. Такие соотношения в основном зависят от расстояния от оси воздушного экрана до зеркала жидкости в ванне, от ширины всасывающей щели и составляют основу технического расчета этих устройств.

Основная часть

В данной работе рассматривается плоская (двухмерная) задача о взаимодействии приточной струи, истекающей из узкого щелевого отверстия в направлении, расположенного на одной оси с ней, щелевого стока. Расчетная область течения ограничивается поверхностью зеркала жидкости в ванне, бортами ванны и условными границами, показанными на рис. 1.

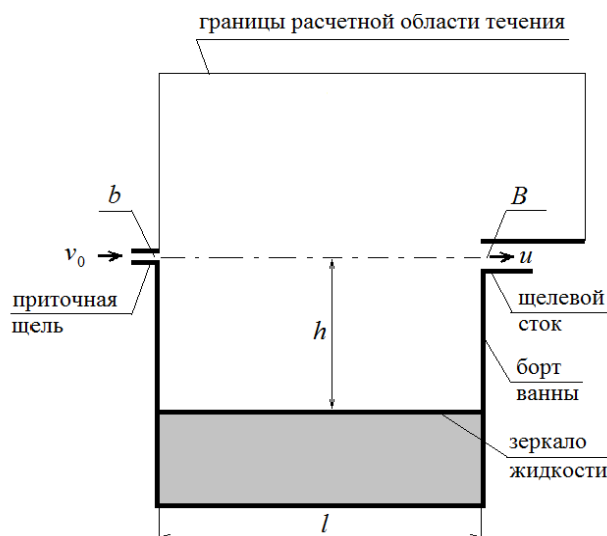


Рис. 1. Расчетная схема воздушно-струйного экрана со щелевым стоком над промышленной ванной

Расчеты выполнялись методом CFD для ванны шириной $l=1$ м. Ширина приточной щели была задана небольшой величиной $b=0,02$ м, что характерно для таких устройств и позволяет рассматривать плоскую приточную струю как струю-источник. Расстояние h от зеркала жидкости в ванне до оси системы струя-сток изменялось в диапазоне от 0,12 м до 0,5 м, вместе с которым соответственно изменялась высота бортов ванны.

Рассматривалась переменная ширина всасывающей щели в диапазоне $B=0,06\div 0,24$ м, наибольшее значение которой приблизительно соответствует ширине приточной струи на расстоянии $l=1$ м от места истечения.

При выполнении численных расчетов скорость истечения приточной струи оставалась постоянной $v_0=10$ м/с.

Скорость всасывания в щелевом отверстии стока u изменялась. Находилась такая минимальная величина скорости u , при которой наблюдается предельное улавливание струи, когда струя улавливается полностью. Минимальной величине скорости всасывания при заданной ширине стока соответствует минимальный расход воздуха, удаляемого стоком. Такой расход воздуха обеспечивает полное улавливание загрязнений, попадающих в воздушно-струйный экран и, в то же время является наименьшим, наиболее выгодным по эксплуатационным затратам.

О полном или неполном улавливании струи можно судить по расчетной картине течения вблизи щелевого стока, которая представляется в виде линий тока (рис. 2.). При полном улавливании струи все линии тока замыкаются на всасывающей щели. Достаточно незначительно уменьшить скорость всасывания (в расчетах приблизительно на 1÷2 %) и часть линий тока будет уходить в пространство за всасывающей щелью стока, что свидетельствует о неполном улавливании притекающей загрязненной струи. Таким образом, при заданной геометрии варьируя скорость всасывания и анализируя расчетные картины течения вблизи стока можно отобрать режимы, соответствующие полному улавливанию воздушной струи, соответствующие минимальному расходу воздуха через сток – предельное улавливание.

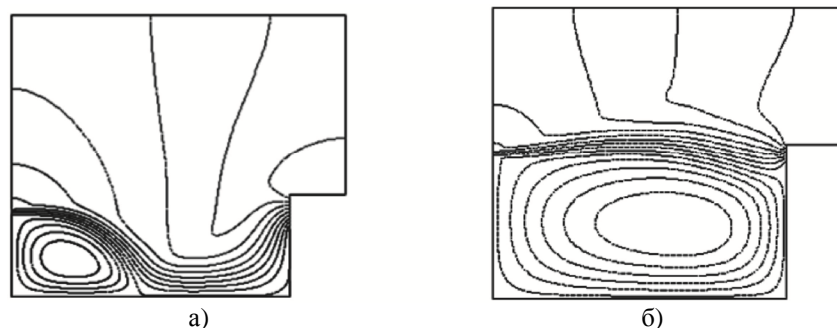


Рис. 2. Расчетная картина течения (в виде линий тока) в воздушно-струйном экране со щелевым стоком над зеркалом жидкости в промышленной ванне в режиме полного минимального улавливания при $l=1$ м, $b=0,02$ м, $v_0=10$ м/с:
а – $h=0,3$ м, $B=0,12$ м, $u=4,9$ м/с; б – $h=0,5$ м, $B=0,06$ м, $u=9,0$ м/с

При выполнении численных расчетов задавались границы области течения: непроницаемые твердые границы – это поверхность зеркала жидкости, борта ванны, внешняя поверхность всасывающей щели стока; свободные границы – в виде прямоугольной фигуры, охватывающей зону основного течения. На свободных границах давление принималось равным атмосферному, а линии тока направленными перпендикулярно этим границам. В плоскости приточного и всасывающего отверстий задавались соответственно величины скоростей истечения v_0 и всасывания u .

В данной задаче рассматривалось течение изотермической несжимаемой среды при температуре $t=293$ К, при плотности воздуха $\rho=1,2$ кг/м³. Использовалась стандартная $k-\varepsilon$ модель турбулентности, причем считалось, что турбулентность порождается приточной струей и завихрениями на углах твердых стенок, а внешние потоки подтекающего воздуха к струе и к всасывающему отверстию на свободных границах области расчета не турбулизованы.

Для проведения численного решения вся область течения покрывалась расчетной сеткой, затем в ходе выполнения вычислений первоначальная сетка измельчалась, причем наибольшее измельчение проводилось в зонах наибольших изменений скорости течения. В ячейках расчетной сетки решается система уравнений турбулентного движения и неразрывности. Решение выполняется итерационным методом, невязки итерационного процесса для всех контролируемых параметров расчета (компоненты скорости, неразрывность потока, характеристики турбулентности течения k и ε) устанавливались величиной 0,0001.

О сходимости результатов расчета в ходе измельчения расчетной сетки можно судить по динамике изменения характерной величины, за которую в данной задаче принималась продольная составляющая скорости потока в точке, расположенной на уровне верха всасывающей щели и на расстоянии 0,1 м от нее. Точность расчета считалась достигнутой, если продольная компонента скорости в расчетной точке в ходе измельчения сетки не изменяется более чем на 0,5 % своего предшествующего значения, а картина течения в виде линий тока остается стабильной.

Характерные картины течения в режиме предельного улавливания минимальным расходом удаляемого через сток воздуха представлены на рис. 2. При небольших расстояниях до $h < 0,4$ м приточная струя настигается на поверхность зеркала жидкости, и у борта ванны, от которого истекает струя, образуется циркуляционная зона (рис. 2 а), причем с увеличением h длина циркуляционной зоны возрастает.

В режиме предельного улавливания при $h > 0,4$ м картина течения совершенно иная. Струя развивается практически в направлении ее выпуска, линия максимальных скоростей лишь немного искривляется и отклоняется от оси приточного и вытяжного отверстий. Между образовавшимся воздушно-струйным экраном и зеркалом жидкости располагается обширная зона циркуляционного движения воздуха, которая накрывает все зеркало жидкости в ванне (рис. 2 б).

Воздушный экран защищает среду помещения от попадания вредных выделений во время проведения технологического процесса в ванне и транспортирует попавшие в него вредные примеси в зону локализации щелевым стоком.

Обычно после обработки крупные детали или блоки мелких обработанных деталей помещают на некоторое время над зеркалом раствора для стекания жидкости. Эта фаза технологического процесса сопровождается интенсивными выделениями вредных веществ в воздушную среду помещения. Для того чтобы защитить воздушную среду помещения и в этой фазе технологического цикла можно предусмотреть большую высоту бортов ванны, такую, чтобы на время стекания блок обработанных деталей также оставался под воздушным экраном. Расчетная картина такого варианта воздушно-струйного экрана показана на рис. 3. В этом случае при наличии достаточного пространства, под воздушным экраном также формируется циркуляционная зона.

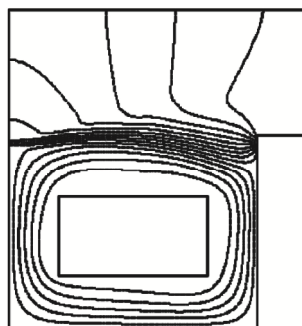


Рис. 3. Расчетная картина течения в воздушно-струйном экране со щелевым стоком над зеркалом жидкости в промышленной ванне в режиме полного минимального улавливания при размещении блока обработанных деталей над зеркалом жидкости:
 $l=1$ м, $v_0=10$ м/с, $b=0,02$ м, $h=0,7$ м, $B=0,06$ м, $u=9,0$ м/с; поперечные размеры блока деталей $0,6 \times 0,3$ м; высота над зеркалом жидкости 0,2 м, расстояние до бортов ванны 0,2 м

Как известно, характеристики течения в турбулизованных потоках с плохо обтекаемыми границами приблизительно подобны при подобных соотношениях геометрических размеров. Поэтому обобщение результатов численного расчета, полученных при конкретных заданных условиях, возможно за счет введения безразмерных относительных величин.

За характерный геометрический размер выбрана ширина ванны – величина l , следовательно, безразмерными геометрическими характеристиками будут:

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

– относительная ширина всасывающей щели стока $B^* = B/l$.

За характерный расход воздуха принят расход воздуха в свободной плоской приточной струе L_{Π} на расчетном расстоянии l от приточного устройства, (приходящийся на 1 м длины приточной щели), который рассчитывается по формуле:

$$L_{\Pi} = 0,537 \cdot v_0 \cdot \sqrt{b \cdot l}. \quad (1)$$

Тогда безразмерный относительный расход воздуха, удаляемого стоком равен:

$$L^* = L/L_{\Pi}, \quad (2)$$

где L – расчетный расход воздуха, удаляемый щелевым стоком в режиме предельного улавливания:

$$L = B \cdot u. \quad (3)$$

Из анализа численных решений следует, что относительный расход удаляемого воздуха в режиме предельного улавливания изменяется в нешироких пределах от $L^* \approx 0,71$ до $L^* \approx 0,83$. Его наибольшее значение соответствует $h^* \approx 0,3$ и наименьшему из рассмотренных размеров $B^* = 0,06$. Вероятно, это связано с наибольшей длиной искривленной границы струи, к которой подтекает питающий ее воздух из объема помещения над воздушным экраном. Кроме того, у высокого борта приточная настилаящая струя развивается вдоль борта, а не в направлении стока и ее захватывание, по-видимому, требует также небольшого увеличения расхода удаляемого воздуха.

Меньшее значение относительного расхода удаляемого воздуха $L^* \approx 0,71$ хорошо согласуется с расходом воздуха в плоской полуограниченной струе $L_{\Pi-огр}$ на расчетном расстоянии l , $L_{\Pi-огр} = L_{\Pi} / \sqrt{2} = 0,707 \cdot L_{\Pi}$, тогда $L_{\Pi-огр} / L_{\Pi} = 0,707$.

В существующих методах расчета подобных устройств, представленных например, в [1 и др.] предполагается, что при относительной величине $h^* > 0,15 \div 0,2$ плоская приточная струя имеет характеристики более близкие к свободной, чем к полуограниченной струе. И для такого случая относительный расход удаляемого воздуха следовало бы принимать $L^* > 1$.

Выполненные расчеты показывают, что и при больших величинах $h^* > 0,4$ в режиме предельного улавливания расход воздуха, достаточный для улавливания подтекающей струи близок к расходу полуограниченной струи. Этот вывод распространяется и на случай размещения блока деталей под воздушно-струйным экраном для стекания жидкости, конечно если подвешенный блок деталей не перекрывает направление развития плоской струи, формирующей этот экран.

В исследованном диапазоне соотношения геометрических величин $h^* = 0,12 - 0,5$ и $B^* = 0,06 - 0,24$ относительный расход L^* не сильно зависит от ширины всасывающей щели B^* , что, по-видимому, связано с влиянием ограничивающих поверхностей. Тем не менее, при узкой всасывающей щели требуется немного увеличенный (на 2-5 %) расход удаляемого воздуха.

В реальных условиях часто над зеркалом жидкости в ванне имеются выступающие элементы в виде подвесов, электродов и т. п. При подаче струи на небольшом расстоянии от зеркала жидкости такие элементы препятствуют формированию воздушно-струйного экрана, а при повышенном расстоянии выступающие элементы обтекаются циркуляционным потоком и не мешают образованию воздушно-струйного экрана. Кроме того, как отмечено выше увеличенное расстояние от зеркала жидкости до оси воздушно-струйного экрана создает возможность размещать под экраном блоки обрабатываемых деталей на время стекания с них жидкости.

Для практических расчетов воздушно-струйных экранов над зеркалом жидкости в промышленных ваннах может быть рекомендована величина относительного расхода удаляемого воздуха, близкая к расходу полуограниченной струи $L^*=0,83$, которая обеспечивает полную локализацию воздушно-струйного экрана, сформированного плоской приточной струей и щелевым стоком при всех значениях h^* в рассмотренном диапазоне.

В остальном при техническом расчете локализирующего воздушно-струйного экрана над зеркалом жидкости в промышленной ванне, можно пользоваться логикой и последовательностью методики расчета, представленной в [1]. В таком расчете используется понятие минимум результирующей скорости в системе струя-отсос, величина которой потребует небольшой коррекции с учетом значения относительного расхода $L^*=0,83$. Зависимости для определения минимум результирующей скорости от возмущающих факторов (температура нагретой жидкости в ванне, естественная скорость движения воздуха в помещении), по-видимому, сохраняются.

Заключение

В результате выполненного методом CFD исследования рассчитаны течения в локализуемых воздушно-струйных экранах, сформированных плоской приточной струей, истекающей из щелевого приточного отверстия и расположенным на одной оси с ним щелевым стоком над зеркалом жидкости в промышленной ванне. Установлено, что в режиме полного улавливания подтекающей струи минимальным расходом удаляемого воздуха при относительных расстояниях от зеркала жидкости до оси воздушного экрана $h^* < 0,4$ происходит настиание струи на зеркало жидкости, вблизи приточной щели формируется циркуляционная зона. При больших величинах h^* в режиме предельного улавливания линия максимальных скоростей в воздушном экране не сильно отклоняется от оси приточное отверстие – сток, а под воздушным экраном формируется обширная зона циркуляционного движения воздуха. Увеличивая высоту бортов ванны и, соответственно, расстояние от воздушно-струйного экрана до зеркала жидкости в ванне можно размещать под экраном блок обработанных деталей на время стекания жидкости, защищая воздушную среду помещения от попадания в нее вредных примесей.

Расчетами установлено, что относительный расход удаляемого воздуха изменяется в нешироком диапазоне значений от $L^*=0,71$ до $L^*=0,83$ и почти не зависит от ширины щели стока, поэтому для технических расчетов с некоторым запасом может быть принята величина $L^*=0,83$.

Список библиографических ссылок

1. Посохин В. Н. Аэродинамика вентиляции. М. : АВОК-ПРЕСС, 2008. 209 с.
2. Bronsema В. Вентиляция и курение // АВОК. 2006. № 4. С. 60–69.
3. Посохин В. Н., Кареева Ю. Р. Осесимметричная турбулентная струя в тупике // Известия вузов. Строительство. 2011. № 3. С. 64–70.
4. 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.
5. 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.
6. Варсегова Е. В., Посохин В. Н. Об условии предельного улавливания потока вредных выделений местным отсосом // Известия вузов. Строительство. 2015. № 11-12. С. 18–22.
7. 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.
8. Georgiev E., Stankov P., Markov D. On the numerical study of air curtains. Technical University, Sofia, 2013. 7 p.
9. Nitin Kardekar, Dr. Bhojwani V. K., Dr. Sane N. K. Numerical analysis of air flow velocity streamlines of air curtains // International journal of mechanical engineering and technology (IJMET). 2013. Volume 4, Issue 5, September-October. P. 150–155.
10. Polak J. Experimental study of the airflow distribution in a room with heating equipment. Norwegian University of Science and Technology. 2015. September. 88 p.

Babich E.K. – student

E-mail: babich.evgeniy1@mail.ru

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

E-mail: broida@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Interaction of air screen with a slot outlet

Abstract

Problem statement. We consider an air screen with a slot outlet up a liquid mirror in an industrial bath, which protects the room air from harmful emissions accompanying the process in the bath. The flow generated by the flat jet air supply and a slot outlet under complicated boundary conditions with the help of CFD method is calculated. We take into account: the distance between the supply device and the outlet l , the distance from the axis of the screen of the air to the liquid mirror h , the width of the slot outlet B .

Results. It is found that in the regime of the full capture of the jet with the minimum of air exhaust (limit capture) with $h^* = h/l < 0,4$ jet is laid on the liquid mirror, near the supply device the circulation zone is formed. For large values of h^* under the air-screen forms a continuous circulation area covering all the liquid mirror. By increasing the height h^* is possible to place the details under the screen at the time of fluid draining. It is determined that in the regime of limit capture the relative flow of exhaust air ranges from values of $L^* = L/L_{II} \approx 0,71$ to $L^* \approx 0,83$.

Conclusions. In a regime of limit capture the air exhaust, removed from slot outlet, approximates a flow rate of a semi-bounded jet and weakly depends on the distance from the axis «jet – outlet» to the liquid mirror, and the width of the outlet. The results can be used to calculate the air-jet screen of baths with high sides, providing protection from harmful emissions as the regime of details treatment and a liquid draining mode.

Keywords: air screen, flat jet, flow, outlet, capture, air flow.

References

1. Posohin V. N. Aerodynamics of ventilation. M. : AVOC PRESS, 2008. 209 p.
2. Bronsema B. Ventilation and smoking // AVOK. 2006. № 4. P. 60–69.
3. Posokhin V. N., Kareeva Y. R. Axially symmetric turbulent jet in a deadlock // Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. 2011. № 3. P. 64–70.
4. Posokhin V. N., Kareeva Y. R. Characteristics of a turbulent plane jet at a dead end at a different location in the supply and exhaust openings // Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. 2011. № 7. P. 27–33.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Georgiev E., Stankov P., Markov D. On the numerical study of air curtains. Technical University, Sofia. 2013. 7 p.
9. Nitin Kardekar, Dr. Bhojwani V. K., Dr. Sane N. K. Numerical analysis of air flow velocity streamlines of air curtains // International journal of mechanical engineering and technology (IJMET). 2013. Volume 4, Issue 5, September-October, P. 150–155.
10. Polak J. Experimental study of the airflow distribution in a room with heating equipment. Norwegian University of Science and Technology. 2015. September. 88 p.