Кустов Борислав Олегович – аспирант кафедры машин и аппаратов химических производств, Ангарский государственный технический университет, e-mail: nir@angtu.ru.
Бадеников Артем Викторович – к. т. н., профессор, ректор Ангарского государственного технического университета.

Borislav O. Kustov – Ph.D. student of the Subdepartment of Machines and Apparatuses of Chemical Production, Angarsk State Technical University, e-mail: nir@angtu.ru.
Artem V. Badenikov – Ph.D. of Engineering Science, Professor, Rector of Angarsk State Technical University.

DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).22-31 **УДК** 621.757.06

Исследование расходящегося потока в зазоре между стенками с образованием кольцевых зон разрежения

А. П. Черепанов[1], П. К. Ляпустин[1]✉, В. В. Ёлшин[2]
[1]*Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация*
[2]*Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация*
✉ lpk62@mail.ru

Резюме
В статье рассматривается течение потока, расходящегося в щелевом зазоре между двумя близко расположенными стенками с поперечной подачей потока в зазор через центральное отверстие в одной из стенок, приводятся основные положения гипотезы и анализируется современное состояние исследования течения потока сжимаемых сред. Принято допущение, что в зазоре поток движется безотрывно с образованием кольцевых зон разрежения. Этот процесс практически не изучен, но имеется подтверждение, что в зазоре непосредственно за кромкой сопла образуются кольцевые зоны, в которых разрежение чередуется с повышенным давлением. Исследования показали, что за первой кольцевой зоной обнаружена вторая и даже третья кольцевые зоны разрежения. Установлено также, что если одна из пластин выполнена из упругого или эластичного материала, то за счет разрежения в кольцевых зонах пластина будет совершать колебательные движения. Поэтому в предложенной работе сделана попытка изучения характера потока при его безотрывном течении между пластинами и приводится обоснование волнообразного течения потока в зазоре, которое вызывает пониженное (разрежение) и повышенное (выше атмосферного) давление в кольцевых зонах между близко расположенными пластинами. На примере упрощенной математической модели безотрывного течения потока даны определения некоторых его параметров в образующихся кольцевых зонах. Натурными исследованиями было замечено, что по мере удаления потока от питающего сопла наблюдается изменение давления расходящегося потока, исследование проводилось не с помощью манометров и вакуумметров как обычно принято, а с помощью рецепторов, содержащих дискретные струйные логические элементы, чувствительность которых несколько выше, чем, например, манометров и вакуумметров. При этом исследовались распределение потока в зазоре с образованием концентричных кольцевых зон (каверн), зависящих от давления и расхода потока, проходящего через канал питания, скорости потока в зазоре, устанавливалось наличие этих зон и их размеры. Исследования проводились на довольно простых установках, но показали некоторые возможности практического применения этого течения. Они могут быть полезны при разработке широкого спектра различных устройств, в том числе для распознавания положения, ориентации и захвата пластинчатых деталей при автоматической сборке. В работе показана также возможность осуществления эжектирования и многокомпонентного смешивания текучих сред для образования пульсаций газожидкостных смесей в тепло- и массообменных процессах при абсорбции, ректификации, диспергировании, эмульгировании, создании вибрации для очистки стенок от отложений, а также в других технологиях и устройствах.

Ключевые слова
давление, дроссель, каверна, кольцевая зона, ламинарный поток, пристенный пограничный слой, радиально-щелевой зазор, рецептор, сектор потока, смешивание, турбулентный поток, эжектирование

Для цитирования
Черепанов А. П. Исследование расходящегося потока в зазоре между стенками с образованием кольцевых зон разрежения / А. П. Черепанов, П. К. Ляпустин, В. В. Ёлшин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 22–31. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).22-31

Информация о статье
поступила в редакцию: 20.03.2020, поступила после рецензирования: 14.04.2020, принята к публикации: 12.09.2020

The study of a diverging flow in the gap between the walls with the formation of annular rarefaction zones

A. P. Cherepanov[1], P. K. Lyapustin[1]✉, V. V. Elshin[2]
[1]*Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation*
[2]*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation*
✉ lpk62@mail.ru

 © А. П. Черепанов, П. К. Ляпустин, В. В. Ёлшин, 2020

Abstract
The article considers the flow diverging in a slit gap between two closely spaced walls with a transverse flow supply to the gap through a central hole in one of the walls. It shows the main statements of the hypothesis and analyzes the current state of research on the flow of compressible media. It is assumed that the flow moves continuously in the gap with the formation of annular rarefaction zones. This process has not been studied in practice, but there is evidence that annular zones are formed in the gap directly behind the nozzle edge, in which rarefaction alternates with increased pressure. Studies have shown that behind the first annular zone, a second and even a third annular zone of rarefaction are detected. It is also established that if one of the plates is made of a resilient or elastic material, then due to the rarefaction in the annular zones, the plate will execute oscillatory movements. Therefore, the proposed work attempts to study the nature of the continuous flow between the plates and provides a justification for the undulating flow in the gap, which causes a reduced (rarefaction) and increased (above atmospheric) pressure in the annular zones between closely located plates. By the example of a simplified mathematical model of continuous flow, some of its parameters are determined in the resulting annular zones. Field studies have observed that as the flow moves away from the feed nozzle, there is a change in the pressure of the diverging flow. The study was conducted not with the help of pressure gauges and vacuum meters, as it is usually accepted, but with the help of receptors containing discrete jet logic elements, the sensitivity of which is slightly higher than, for example, pressure gauges and vacuum meters. At the same time, the distribution of the flow in the gap with the formation of concentric annular zones (cavities), depending on the pressure and flow rate passing through the feed channel, the flow rate in the gap, the presence and size of these zones were determined. Research has been conducted using fairly simple units, but it has shown some practical applications of this flow. They can be useful in the development of a wide range of different devices, and specifically for recognizing the position, orientation and capture of plate parts during automatic assembly. The paper also shows the possibility of ejecting and multicomponent mixing of fluids to form gas-liquid mixtures in heat and mass transfer processes during absorption, rectification, dispersion, emulsification, creating vibration to clean walls from deposits, as well as in other technologies and devices.

Keywords
pressure, throttle, cavity, annular zone, laminar flow, wall boundary layer, radial slit gap, receptor, flow sector, mixing, turbulent flow, ejecting

For citation
Cherepanov A. P., Lyapustin P. K., Elshin V. V. Issledovanie raskhodyashchegosya potoka v zazore mezhdu stenkami s obrazovaniem kol'tsevykh zon razrezheniya [The study of a diverging flow in the gap between the walls with the formation of annular rarefaction zones]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [*Modern Technologies. System Analysis. Modeling*], 2020, No. 3(67), pp. 22–31. 10.26731/1813-9108.2020.3(67).22-31

Article info
Received: 20.03.2020, Revised: 14.04.2020, Accepted: 12.09.2020

Введение

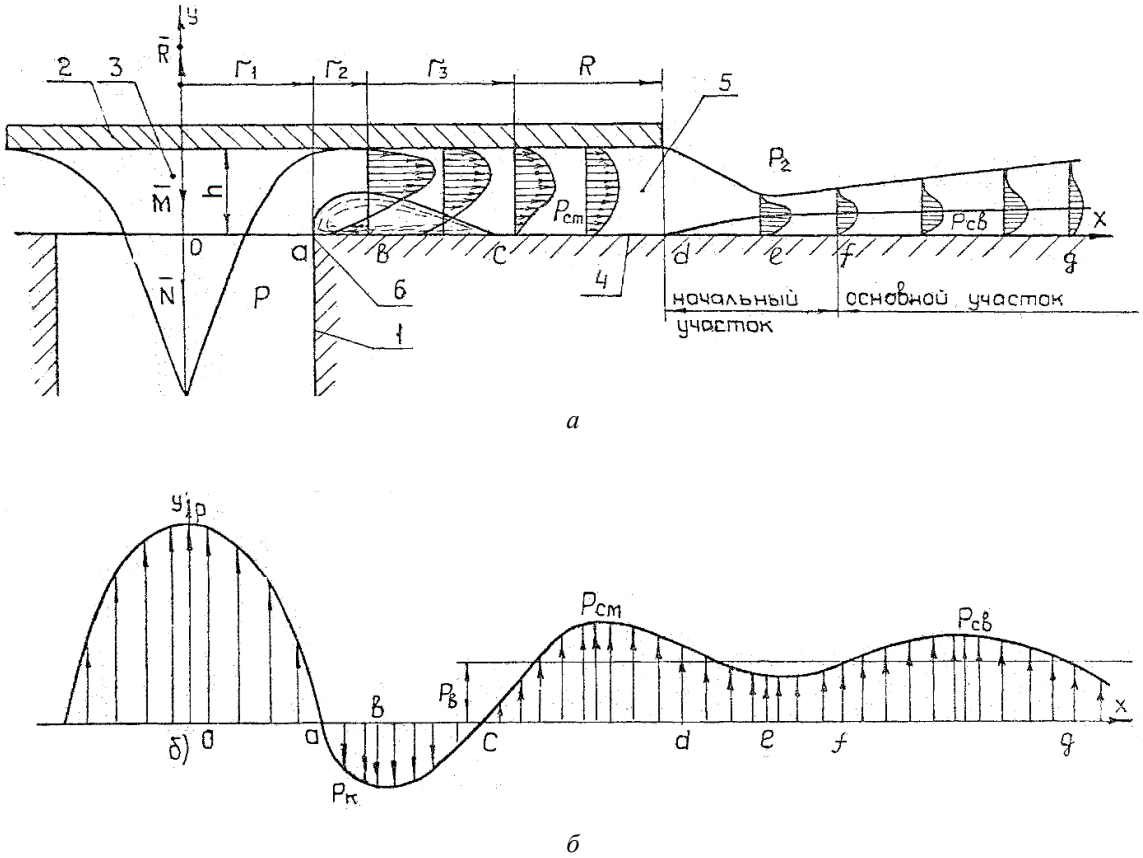
В различных отраслях присутствует необходимость применения массообменных процессов ректификации, абсорбции, очистки газов [1], смешивания компонентов и получения многокомпонентных смесей, в которых доли соединяемых компонентов строго определены природой проводимого процесса [2] и многое другое. При этом всегда есть необходимость сделать эти процессы боле выгодными с экономической стороны, сохраняя безопасность и надежность процессов работы оборудования. Существуют предложения по использованию смешения струйных насосов и вихревых эжекторов [3]. Однако подача эжектирующей среды в струйных аппаратах осуществляется за счет подачи струй [4], а в вихревых эжекторных устройствах посредством тангенциального закручивания потока [5].

Ключевым вопросом настоящей работы является изучение характера течения потока, подаваемого в радиально-щелевой зазор не параллельно, как это принято в большинстве работ, а под прямым углом. В работе [6] рассмотрено отрывное и безотрывное течение потока, подаваемого под прямым углом в радиально-щелевой зазор между параллельными плоскостями двух стенок через сопло в одной из них. Поток, отрываясь от кромки сопла, расходится в зазоре так, что за кромкой образуется зона разрежения, концентричная соплу. Течение потока в зазоре может иметь как свободный, так и безотрывный режимы. Последний в данном случае представляет наибольший интерес для исследования, поскольку ни теоретически, ни практически достаточно не был исследован.

Теоретическое обоснование

Характер истечения газа из сопла с поворотом в зазор между двумя близко расположенными стенками показан в работе [6]. Его изучение в некоторой степени проводилось и в других работах [7, 8]. Отмечалось, что в зазоре между стенками явно выражены четыре характерных участка [7], поэтому рассмотрим каждый из них отдельно.

Далее показана схема распределения потока в радиально-щелевом зазоре между двумя стенками (рис. 1). Эжектирующая среда подается через центральное сопло 1 между близко расположенными



а

б

Рис. 1. Схема распределения потока в зазоре между двумя стенками:
а – поперечное сечение потока между близко расположенными пластинами; *б* – эпюра распределения потока в зазоре между пластинами и на выходе из него
Fig. 1. Flow distribution diagram in the gap between two walls
a – the cross-section of the flow between closely spaced plates; b – the diagram of the flow distribution in the gap between the plates and when leaving it

стенками 2, 4 и расходится в зазоре 5, разворачиваясь относительно кромки 6. По оси центрального сопла 5 образуется конус потока 6. Траектория движения потока в зазоре разбита на участки: o–a – участок воздействия струи, выходящей из сопла 1 на плоскость стенки 2; a–b – участок максимального сужения основного потока при повороте его в зазор 5, и максимального расширения вихревой воны; b–c – участок расширения потока в зазоре и сужения вихревой зоны; c–d – участок установившегося движения; d–f начальный участок полузатопленной струи за кромкой 6; f–g – основной участок полузатопленной струи.

При подаче давления через сопло 1 на участке o–a происходит удар струи о стенку 2 и ее сжатие в поперечном сечении из-за потери части кинетической энергии с одновременным разворотом вдоль стенки и радиальным устремлением в зону наименьшего давления за стенкой 2. За кромкой 6 на участке a–b происходит максимальное сужение основного потока, где его скорость увеличивается согласно закону Бернулли [6], и на плоскости стенки 4 образуется разрежение. При этом в центре сечения, на участке o–a образуется конус 3, в котором также создается разрежение из-за возрастания скорости струи при развороте в зазор, а на осевой линии сопла 1 по мере приближения потока к плоскости пластины скорость потока стремится к нулю.

Наибольшее сужение потока происходит на отрезке a–b, а на участке b–c сила присасывания со стороны стенки 4 уменьшается. Участок a–c ограничен радиусом r_a и характеризуется наличием скачка уплотнения, вызываемого сужением потока при повороте эжектирующего потока в зазор. На участке a–d за счет увеличения радиуса скорость потока снижается.

В месте наибольшего сужения потока на участке a–b возникает сверхзвуковое течение, аналогичное течению в расширяющейся части сопла Лаваля [9], вследствие чего происходит не уменьшение скорости, как при несжимаемой жидкости, а наоборот, скорость потока на данном участке увеличивается.

 © А. П. Черепанов, П. К. Ляпустин, В. В. Ёлшин, 2020

На участке d–c скорость уменьшается по мере удаления от центрального канала.

Участок c–d характеризуется установившимся движением потока в зазоре между рецептором и пластиной. По мере удаления от центрального канала поток выравнивается по всему поперечному сечению [7]. Участок d–f располагается за кромкой пластины. С течением времени за счет подсоса воздуха по контуру стенки из атмосферы давление в зазоре возрастает, струя при этом становится полуограниченной [8], распределяющейся со стороны стенки 4 вдоль ее плоскости, а с противоположной стороны свободно соединяется с атмосферой. На стенках 2 и 4, как известно, струя преодолевает большее сопротивление из-за трения, что способствует образованию пристенного пограничного слоя [8]. В зависимости от режима течения пристенный пограничный слой может иметь как ламинарный, так и турбулентный режим, при этом по мере движения вдоль стенки толщина пограничного слоя возрастает. Пока она мала, течение в пограничном слое будет ламинарным, затем переходит в турбулентное [9].

Площадь кольца вихревой зоны является функцией изменения скорости потока:

$$S_{a-b-c} = f\left(v_{a-b-c}, h\right), \qquad (1)$$

где v_{a-b-c} – скорость потока в зазоре на участках a–c; h – величина зазора.

Неоднородность потока в поперечном сечении и в зазоре между стенками 2 и 4 на данном этапе достоверно возможно определить только экспериментально.

Предположим, что стенка 2 может смещаться вдоль оси y, будет изменяться зазор h, а вместе с ним и величина сопротивления потоку. В частности, зазор можно изменять в пределах $0 < h < r_1/2$, поскольку при $h - r_1/2$ площадь боковой поверхности зазора становится равной площади сопла 1, а далее наступает так называемое отрывное течение [6], при котором разрежение в кольцевой зоне создаваться не будет. В вихревой зоне при безотрывном течении ($h < r/2$) образуется разрежение, однако при весьма малом зазоре h происходит уменьшение ее сечения.

В результате наблюдений в процессе длительного испытания установки с постоянным зазором были обнаружены следы воздействия потока на поверхности пластин, которые имели вид концентрических колец, образовавшихся в местах наибольшего давления потока, соприкасающегося с поверхностями пластин. При этом диаметры концентрических колец на пластинах оказались различными. Наименьший диаметр первого кольца обнаружен на сплошной пластине, которое было больше диаметра центрального канала. Второе по диаметру кольцо находилось на пластине с центральным каналом, третье – снова на сплошной пластине, а следующее кольцо – на пластине с центральным каналом. Из этого можно сделать вывод, что поток, прижимаясь поочередно то к одной пластине, то к другой, совершает в зазоре волнообразное движение, и кольцевые зоны разрежения чередуются с зонами давления.

Исследование характера потока в зазоре

Рассмотрим взаимосвязь между величиной зазора h и параметрами потока в нем. Было бы удобнее провести прямое измерение давления непосредственно в зазоре, например, с помощью трубки Пито, однако величина зазора не позволяет завести ее в радиальном направлении. Поэтому в работе [10] наличие чередующихся волн повышенного (выше атмосферного) или пониженного давления (разрежения) в зазоре по мере удаления потока от центрального канала было предложено определять с помощью дискретных единичных сигналов.

Схема установки для исследования характера потока в зазоре между пластинами аналогичная [11] (рис. 2).

Установка содержит нижнюю 2 и верхнюю 4 пластины, установленные с зазором h. Сопло 5 выполнено в нижней пластине 2. Для этого в пластине 2 располагают отверстия для отвода части потока из зазора, выполняющие функции приемных каналов 1 и 6 рецепторов [10]. Приемный канал 1 подключен к управляющему входу струйно-логического элемента (СЛЭ) 3 через дроссель *Др1*. Приемный канал 6 подключен к управляющему входу СЛЭ 7 через дроссель *Дрп*. Таким образом, приемные каналы 1, 6…*n*, дроссели *Др1*… *Дрп*, СЛЭ 3, 7…*n* образуют, соответственно, рецепторы количеством от $i = 1$ до $i = n$, которые располагаются на расстоянии $r(1\ldots m)$ от сопла 5 по концентричным окружностям, либо в виде матрицы [11]. Дроссели *Др1*... *Дрп* служат для регулирования величины входных сигналов от *Рв*1 до *Рвi*, достаточных для срабатывания СЛЭ. Количество рецепторов определяется количеством предполагаемых волн давления и разрежения потока в зазоре.

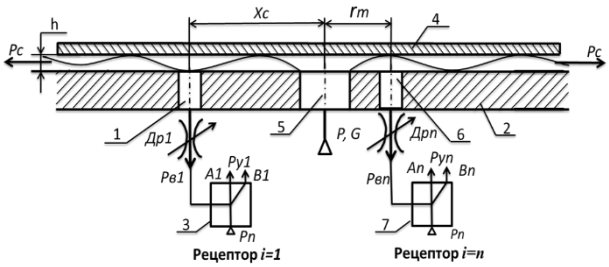


Рис. 2. Схема установки для исследования характера потока в зазоре между пластинами
Fig. 2. Unit diagram for studying the flow pattern in the gap between the plates

В качестве среды для исследования потока в зазоре применен сжатый воздух, который под избыточным давлением *P*, подается через сопло 5. В зазоре *h* между пластинами 2 и 4 образуется расходящийся поток. На различных расстояниях *Xc* от сопла 5 наблюдаются чередующиеся концентричные кольцевые волны повышенного или пониженного давления, где могут образовываться каверны, в зоне которых давление *Pc* в зазоре *h* изменяется. Соответственно и в каждом рецепторе от *i* = 1 до *i* = *n* на различных радиусах от сопла 5 создается разрежение или давление.

Предположим, что поток в зазоре создает нескольких кольцевых зон чередования разрежения и давления, причем непосредственно за каналом питания образуется разрежение на поверхности пластины 2, а на поверхности пластины 1 создается давление. Когда в приемном канале создается разрежение, достаточное для переключения соответствующих СЛЭ от 1 до *n*, то сигналы *Py* появляются на выходах *A*(1…*n*). И наоборот, когда в приемном канале создается давление, сигналы *Py* появляются на их выходах *B*(1…*n*). Например, когда *Xc* = *r*1 в зазоре *h*, присутствует волна давления *Pв*1, то в рецепторе *i* = 1 управляющий сигнал *Py*1 появляется на выходе *B*1.

Если в зазоре *h* присутствует волна разрежения, когда *Xc* = *rm*, то управляющие сигналы *Pyn* появляются в рецепторах *i* = *n* на выходе *An*. В промежуточных рецепторах матрицы также появляются управляющие сигналы *Py*1…*Pyn*., соответствующие кольцевым волнам давления и разрежения, которые затем подаются либо на индикаторы, показывающие присутствие давления или разрежения в соответствующей кольцевой волне, либо на другие устройства, регистрирующие эти волны. По мере удаления потока от сопла 5 кольцевые волны давления и разрежения в зазоре ослабевают, поэтому дросселями *Др*1... *Дрn* регулируют порог срабатывания СЛЭ [10].

Как известно, на характер распределения потока в зазоре влияют следующие факторы:

– давление *P*, подаваемое через канал 5;
– величина зазора *h*;
– размеры пластины;
– размеры сечения каналов;
– неоднородность потока в зазоре;
– другие параметры применяемой среды.

Поэтому задачей экспериментальных исследований является определение длины волн *Xc* в зазоре *h*, а также выходного давления за пределами пластины 4 *Pc*, и подтверждение того, что длины волн будут зависеть от факторов, влияющих на характер распределения потока в зазоре или за его пределами [6, 7].

Таким образом, по величине *Py* (1…*n*) управляющих сигналов множества рецепторов *i* = 1…*n* и по чередованию сигналов на их выходах *A*(1…*n*) или *B*(1…*n*) можно судить о наличии давления или разрежения в зазоре *h* между пластинами 2 и 4 на различных радиусах *r* (1…*m*) от канала 5, а также о характере изменения потока в зазоре. Преимуществом исследования с помощью рецепторов является простота составления схем, построенных на струйных элементах, выполняющих логические функции «или не или» [12], что упрощает задачу определения размеров кольцевых зон по наличию волны давления или разрежения на различных радиусах *r*(1…*m*) от канала 5.

Предположим, что на каждом выходе СЛЭ появляется выходной сигнал (давление или разрежение), тогда его функциональные свойства можно определить зависимостью

$$y = X \cdot K_x, \qquad (1)$$

где *y* – выходной сигнал; *X* – входное управляющие воздействие; K_x – передаточный коэффициент рецептора, выраженный через управляющий сигнал.

Далее представим расчетную модель установки (рис. 3). Поскольку волнообразный поток в зазоре распределяется в виде концентрических колец, то взаимодействие волны потока в этих кольцах можно представить в виде щелевого дросселирующего элемента с переменным проходным сечением.

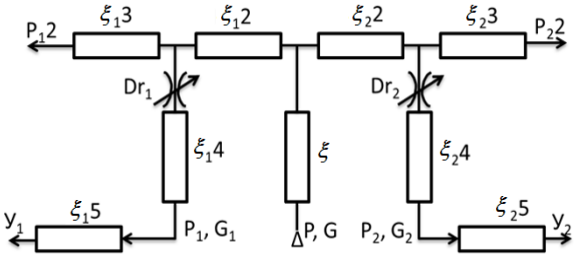


Рис. 3. Расчетная модель исследования характера потока в зазоре
Fig. 3. Computational model for studying the flow pattern in the gap

Выразим величину суммарного сопротивления потоку в питающем сопле через некоторые его составляющие. Достоверно определяемыми величинами являются давление *P* и расход потока *G* на входе центрального канала питания 5, которые легко измерить. Другие характеристики потока в зазоре, в частности ширину кольцевых зон, теоретически определить сложно из-за множества факторов, например, размера фасок, шероховатости стенок, гидравлических сопротивлений и др.

На первом этапе исследований будем считать, что воздух расходится равномерно по всему зазору, но в зоне каналов рецепторов происходит утечка части потока через приемные каналы. Этот фактор также пока сложно оценить, так как процесс распределения потока между ними не известен, поэтому им можно пренебречь.

Для упрощения возьмем только две симметрично

 © А. П. Черепанов, П. К. Ляпустин, В. В. Ёлшин, 2020

расходящиеся струи, тогда их общее суммарное сопротивление потоку представим как сумму двух составляющих:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 . \quad (2)$$

Составим для каждой из них обобщенные функциональные зависимости. Обозначим сопротивление потоку (см. рис. 3) отдельно для направления влево от подачи давления питания –

$$\xi_1 = f\left(\xi_1 2 \cdot \xi_1 3 \cdot \xi_1 4 \cdot \xi_1 5\right),$$

и для направления вправо от подачи давления питания –

$$\xi_2 = f\left(\xi_2 2 \cdot \xi_2 3 \cdot \xi_2 4 \cdot \xi_2 5\right),$$

где $\xi_1 2$ и $\xi_2 2$ – сопротивление, возникающее при повороте потока в зазор; $\xi_1 3$ и $\xi_2 3$ – сопротивление потоку в зазоре h; $\xi_1 4$ и $\xi_2 4$ – сопротивление ячеек рецепторов; $\xi_1 5$ и $\xi_2 5$ – сопротивление управляющих каналов СЛЭ.

Расчетным путем сложно определить каждую из составляющих величин сопротивления, достоверные данные, необходимые для определения полного сопротивления ξ (2), на данном этапе можно получить только экспериментально в связи с тем, что универсальные расчетные формулы для такого характера истечения потока недостаточно корректны.

Давление $P_в$ и расход потока $G_в$ на выходе приемного канала рецептора выразим функциями вида:

$$P_В = f(P, X_{c1}, r_m, h, d_1, \omega_i, \xi), \quad (3)$$

$$G_В = f(G, X_{c1}, r_m, h, d_1, \omega_i, \xi), \quad (4)$$

где P, G – давление и массовый расход потока в приемном канале питания; X_{c1} – расстояние от центрального канала питания, которое соответствует длине волны, находящейся в зоне приемного канала рецептора; r_m – расстояние между центральным каналом питания и приемным каналом рецептора; h – величина зазора между пластинами; d_1 – диаметр приемного канала рецептора; ω_i – площадь сечения i-го сектора распределения расходящегося потока в зазоре; ξ – суммарное сопротивление потоку.

Достоверные данные давления $P_в$ и расхода потока $G_в$ на выходе приемного канала рецептора на данном этапе можно определить только экспериментально [11] в связи с тем, что не определено суммарное сопротивление потоку.

Разобьем весь расходящийся поток на секторы, ограниченные шириной каналов рецепторов, приняв условие неперетекания воздуха из одного сектора в другой за счет равного бокового давления соседних секторов на искомый сектор. Получим разветвленную систему (аналогично трубе) секторов, а каждый из них можно принять как расходящийся насадок, ограниченный со стороны стенок 2, 4 и с боков соседними секторами. Примем в расчет два симметричных сектора относительно центрального канала питания и получим схему тройного разветвления (см. рис. 3).

Далее при прохождении потока в секторе над приемным отверстием получается еще одно тройное разветвление. В классическом тройном разветвлении рассматривается жесткая система трубопроводов заданного сечения и поток в ней определяется как для отдельных трубопроводов при формировании граничных условий в местах разветвлений, а параметры потока усредняются по всему разветвлению [13].

Однако в отличие от классической схемы тройного разветвления в случае ограничения потока с двух сторон одна из пластин может перемещаться относительно приемного канала, и изменяющаяся площадь сектора будет вызывать перераспределение потока в приемном канале рецептора. С термодинамической точки зрения течение в зазоре можно принять адиабатическим, поскольку при большой скорости на коротком участке теплообмен между движущимся потоком и внешним пространством имеет ничтожно малую величину, тогда массовый расход через кольцевую полость можно определить по формуле:

$$G = \pi \cdot R \cdot S \cdot \rho_1 \cdot v_1 \quad (5)$$

где $S = h\ r_m$ – площадь боковой поверхности зазора между плоскостью и деталью; ρ_1 – плотность воздуха в центральном канале питания; v_1 – средняя скорость течения потока в зазоре [14].

Течение потока в зазоре принимается изоэнтропным, при котором с учетом движения без трения [14] плотность воздуха в центральном канале питания можно определить как

$$\rho_1 = \rho_2 \cdot (P / P_C)^{1/k}, \quad (6)$$

где k – показатель изоэнтропы (для воздуха k = 1,4 [12]); ρ_2 – плотность воздуха в зазоре; P_C – давление на выходе из зазора.

Закон распределения статического давления в зазоре примем как условие распределения параметров потока:

$$P_C = f(P, G, h, R),$$

где R – радиус пластины 2.

Теоретически статическое давление в зазоре при отсутствии чередующихся волн давления и разрежения согласно [14] можно определить по формуле:

$$P_c = \sqrt{A \cdot \ln \frac{R}{r_m} + P_2^2} \quad (7)$$

где $A = \dfrac{12\mu \cdot G \cdot P_2}{\pi \cdot h^3 \cdot \rho_2}$; μ – коэффициент динамической вязкости.

Среднюю скорость потока, веерообразно расходящегося в зазоре h, можно определить по формуле:

$$v_1 = \frac{Ah^2}{25\mu r_m \sqrt{A \cdot \ln \frac{R}{r_m} + P_2^2}}. \qquad (8)$$

Разобьем длину окружности l_0 радиусом r_m на участки с длиной l_c, близкой к величине диаметра d_1 приемного канала рецептора, и получим сектор, ограниченный углом β касательными, выходящими из центра сопла питания, к приемному каналу рецептора, по которому поток движется в зазоре. Покажем сектор, ограниченный приемным каналом рецептора (рис. 4).

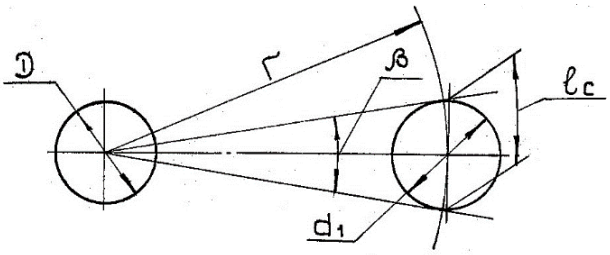


Рис. 4. Сектор, ограниченный приемным каналом рецептора
Fig. 4. Sector bounded by the receptor receiving channel

Из отношения $\frac{l_0}{l_c} = \frac{\beta}{360^o}$ получим

$$\frac{l_0}{l_c} = 2r \cdot \sin\left(\frac{d_1}{2r}\right). \qquad (9)$$

Площадь сечения секторного щелевого зазора на текущем радиусе r определим как

$$\omega_1 = 2r_m h \sin\frac{d_1}{2r_m}. \qquad (10)$$

Подстановкой в формулу (5) выражений (6) и (10) получим расход воздуха в секторе, ограниченном углом β:

$$G_C = v_1 \rho_2 \left(\frac{P}{P_2}\right)^{1/k} 2r_m h \sin\frac{\mu_1}{2r_m}. \qquad (11)$$

Подставив в выражение (11) формулу (7) и проведя преобразования, окончательно получим уравнение расхода воздуха в секторе, ограниченном приемным каналом рецептора:

$$G_C = \left(\frac{P}{P_2}\right)^{1/k} \frac{0{,}96GP_2}{\pi P_C} \sin\frac{d_1}{2r_m} \qquad (12)$$

Схема распределения параметров потока на входе в зазор, в зазоре и на выходе приемного канала рецептора показана далее (рис. 5).

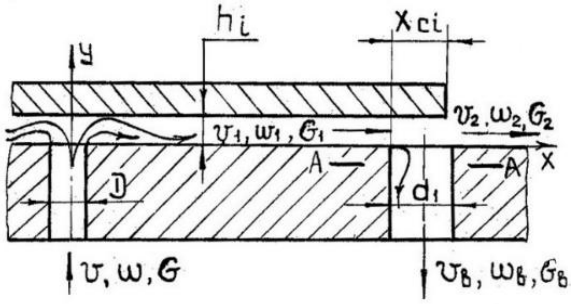


Рис. 5. Распределение параметров потока в зазоре и на выходе рецептора
Fig. 5. Distribution of flow parameters in the gap and at the output of the receptor

Составляющие скорости v_1, площади сечения секторного щелевого зазора ω_2, массового расхода G_c определяют статические и динамические характеристики потока в процессе перемещения его в зазоре между пластинами и перетекании части потока в приемный канал рецептора. В свою очередь эта часть потока имеет параметры v_B и ω_B в зоне приемного канала и вызывает изменение давления P_B и расхода G_B на управляющем входе СЛЭ.

Местные потери напора в ответвлении, которое в данном случае является приемным каналом рецептора, появляются при развороте транзитной струи из зазора в приемный канал (аналогично вихревой зоне b, показанной на рис. 1) и ее сжатии в сечении А–А (см. рис. 5). При этом потеря напора сосредотачивается только на участке струи за сжатым сечением А–А. В соответствии с формулой Борда потеря напора составит

$$h = \zeta \frac{v^2}{2g} \qquad (13)$$

Площадь ω_{A-A} неизвестна, так как аналитически не определена величина зазора h. Это означает, что практически определить геометрическую форму узла сопряжения для разветвления с жесткой фиксацией трубопроводов постоянного сечения в общем случае затруднительно. Тем более весьма проблематично определение аналитическим путем местного сопротивления ζ для тройного разветвления с перекрытием приемного канала рецептора поверхностью пластины. Учитывая приведенные соображения, Вейсбах предложил любую местную потерю напора вычислять по формуле (13), а коэффициент местного сопротивления ζ, входящий в эту формулу, определять экспериментальным путем.

Далее показана схема распределения потока в зоне приемного канала рецептора (рис. 6). Подсасывание воздуха происходит тангенциально по

 © А. П. Черепанов, П. К. Ляпустин, В. В. Ёлшин, 2020

направлению стрелок и вызывает повышение давления в ответвлениях на величину ΔP_{γ}, тогда давление на выходе из ответвления будет составлять:

$$P_{\text{отв}} = P_c + \Delta P_{\gamma}, \quad (14)$$

где P_c – давление потока в рассматриваемом секторе до разветвления.

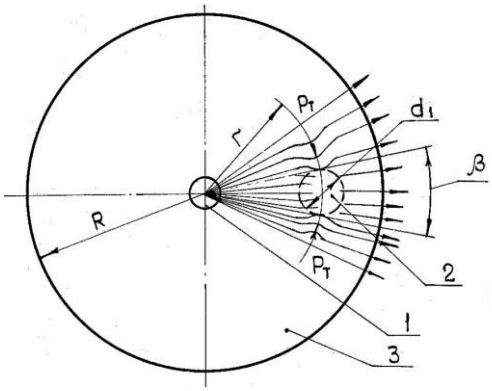


Рис. 6. Схема распределения потока в зоне приемного канала рецептора
Fig. 6. Flow distribution scheme in the area of the receiving channel of the receptor

Коэффициент подсоса воздуха в приемный канал из соседних секторов можно определить из отношения

$$k_n = \frac{P_B}{P_C}. \quad (15)$$

Указанное повышение давления в данной работе учитывается при определении давления P_B в приемном канале рецептора экспериментальным путем.

Необходимо учесть, что при втекании воздуха в приемный канал, в зазоре образуется падение давления, вызывающее подсос воздуха из соседних секторов в этот канал (см. рис. 6), что можно определить экспериментально, но в большинстве случаев перетекание из соседних секторов не столь существенно и может не учитываться.

Результаты исследования эжектирования

Величина разрежения при безотрывном течении потока в радиально-щелевом зазоре была определена только в первой кольцевой зоне разрежения многофакторным экспериментом и представлена в виде линейного уравнения:

$$P_B = 0{,}23563 + 0{,}083039 \cdot P - 0{,}207397 \cdot h. \quad (16)$$

График зависимости разрежения от величины зазора h в первой кольцевой зоне от центрального сопла при давлении питания P = 1 кгс/см^2 и P = 3 кгс/см^2 также показан (рис. 7).

График показывает, что при давлении воздуха, подаваемого в зазор между двумя пластинами P = 1 кгс/см^2, разрежение составит $P_в$ = 0,38 кгс/см^2 при величине зазора между пластинами h = 0,2 мм. При давлении P = 4 кгс/см^2 разряжение составляет $P_в$ = 0,45 кгс/см^2 при величине зазора между пластинами h = 0,3 мм.

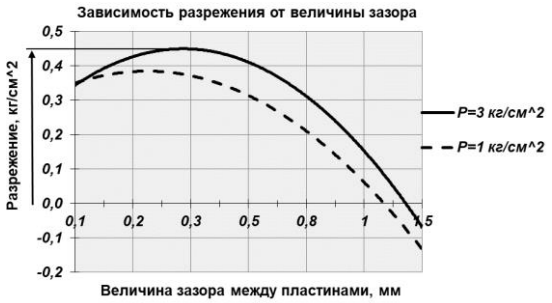


Рис. 7. График зависимости разрежения в первой кольцевой зоне от центрального сопла
Fig. 7. Graph of the dependence of the rarefaction in the first annular zone on the central nozzle

Обсуждение результатов применения безотрывного течения потока в зазоре

Рассмотрим эжектирование среды.

В эжекторе поток всасывается в зазор через кольцевые каналы, расположенные на одинаковых радиусах от эжектирующего сопла и не учитывается влияние чередующихся кольцевых зон, что снижает его производительность [15].

Способ эжектирования и его устройство [16] имеют преимущество в том, что эжектируемый поток подает в область чередующихся кольцевых зон разряжения то на одной, то на другой стенках, а кольцевые каналы располагают в шахматном порядке. Ширину зон разрежения регулируют изменением давления эжектирующего потока или величиной зазора.

Применение в массообменных процессах путем образования пульсаций фаз газожидкостной смеси, которая создается изменением зазора при перетекании потока из перепускного отверстия в пространство за клапаном, рассмотрено в работе [17]. Клапан из жесткого материала может быть закреплен на тарелке подвижно, из неупругого или упругого материала – неподвижно.

Рассмотрены новые возможности использования безотрывного течения потока жидкости в узком зазоре между пластинами [18], приведен пневматический резонатор упругих колебаний пластин [19]. Системы очистки внутренних стен циклона от отложений мелкодисперсной древесной пыли [20] разработаны с применением упругих колебаний пластинчатых резонаторов, приводимых в действие безотрывным течением потока или пара.

Заключение

Исследование расходящегося в щелевом зазоре между двумя близко расположенными стенками с поперечной подачей потока в зазор через центральное отверстие в одной из стенок показало

возможности практического его использования в различных технологических процессах.

Способ эжектирования и его устройство [16] повышают разрежение смешиваемых потоков при более низких потерях кинетической энергии и увеличивают производительность. Например, при равных диаметрах эжектирующих сопел и с одной кольцевой зоной он создает разрежение в 4 раза выше, чем сопло Лаваля.

Пульсация контактирующих фаз [17] повышает эффективность массообменных процессов, абсорбции, ректификации, очистки газов и смешивания различных компонентов.

Новые возможности открываются в области многокомпонентного смешивания разнородных сред, очистки поверхностей бункеров и циклонов от отложений и льда, а также в других полезных устройствах.

Список литературы

1. Галушко А.С., Абиев Р.Ш., Курилова Т.А. Массоперенос на границе газ – жидкость в аппарате с периодически изменяющимся поперечным сечением // Математические методы в технике и технологии : тез. докл. межд. конф. Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2007. С. 92–93.
2. Лагуткин М.Г. Михальченкова А.Н., Бутрин М.М. Влияние конструктивных и режимных параметров работы вихревого аппарата на величину коэффициента эжекции // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 3 (107). С. 48–53.
3. Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. М. : Энергомаш, 2000. 412 с.
4. Соколов Е.Я. Зингер Н.М. Струйные аппараты. 3-е изд., перераб. М. : Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
5. Цегельский В.Г. К теории газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения // Изв. высш. учебных заведений. 2012. № 2. С. 46–71.
6. Чупраков Ю.И. Гидропривод и средства гидроавтоматики : учеб. пособ. для вузов по специальности «Гидропривод гидроавтоматика». М. : Машиностроение, 1979. 232 с.
7. Черепанов А.П. Струйно-логические устройства автоматической ориентации плоских деталей при сборке : автореф. дис. … канд. техн. наук. Иркутск, 1993. 20 с.
8. Лебедев И.В., Трескунов С.Л., Яковенко В.С. Элементы струйной автоматики. М. : Машиностроение, 1973. 360 с.
9. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. Ч. 2. Методы аэродинамического расчета. М. : Высш. шк., 1980. 416 с.
10. Черепанов А.П. Земченко А.В. Исследование рабочего процесса взаимодействия элементарной поверхности детали с распознающей ячейкой рецептора струйно-логического ориентирующего устройства (СЛОУ). Вестн. Читин. политехн. ин-та. Вып. 3. М. : Изд-во Москов. гос. горного ун-та, 1996. С. 317–328.
11. Черепанов А.П., Ляпустин П.К., Быргазов П.Н. Исследование потока в зазоре между пластинами струйно-логическими элементами // Современные технологии и научно-технический прогресс : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. им проф. В.Я. Баденикова. Ангарск. Изд-во АнГТУ. 2019. С. 102–103.
12. Герц. Е.В. Пневматические устройства и системы машиностроения : справочник. М. : Машиностроение, 1981. 218 с.
13. Гогричиани Г.В. Пневматический струйно-тензометрический датчик положения // Механизация и автоматизация производства. 1988. № 12. С. 15–16.
14. Пикнер М.Я. Исследование аэродинамического эффекта для струйных захватных питателей // Известия вузов. 1968. № 10. С. 16–169.
15. Патент US 5584668 A (Volkmann) МКИ F04F 5/16; F04F 5/22; F04F 5/00; F04F 005/00 17.12.1996.
16. Пат. 2705695 Рос Федерации, МПК F04F 5/44. Способ эжектирования потока и устройство для его осуществления // А.П. Черепанов ; заявитель: ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет» ; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 32.
17. Патент 2657301 Рос. Федерации, МПК B01D 3/14. Способ образования пульсаций газожидкостной смеси и устройство для его осуществления // А.П. Черепанов ; заявитель: ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет» ; опубл. 19.06.2018, Бюл. № 17.
18. Черепанов А.П. Новые возможности использования безотрывного течения потока жидкости в узком зазоре между пластинами // Современные технологии и научно-технический прогресс : тез. докл. науч.-техн. конф. Ангарск, 1994. С. 30.
19. Черепанов А.П. Пневматический резонатор упругих колебаний пластин // Современные технологии и научно-технический прогресс : тез. докл. науч.-техн. конф. Ангарск, 1995. С. 17.
20. Басова Е.В., Часовских В.П. Контролируемые параметры системы очистки внутренних стен циклона от отложений мелкодисперсной древесной пыли // Вестник КрасГАУ. 2012. № 5. С. 375–380.

References

1. Galushko A.S., Abiev R.Sh., Kurilova T.A. Massoperenos na granitse gaz – zhidkost' v apparate s periodicheski izmenyayushchimsya poperechnym secheniem [Mass transfer at the gas - liquid interface in an apparatus with a periodically changing cross section]. *Mat. metody v tekhnike i tekhnologii: tez. dokl. mezhd. konf.* [*Mat. methods in engineering and technology: abstracts of reports of int. conf.*]. Yaroslavl': YaSTU Publ., 2007. Pp. 92–93.
2. Lagutkin M.G., Mikhal'chenkova A.N., Butrin M.M. Vliyanie konstruktivnykh i rezhimnykh parametrov raboty vikhrevogo apparata na velichinu koeffitsienta ezhektsii [Influence of design and operating parameters of the vortex apparatus on the value of the ejection coefficient]. *Energosberezhenie i vodopodgotovka* [*Energy saving and water treatment*]. Moscow: «Sam Poligrafist» Publ., 2017. No. 3 (107). Pp. 48–53.
3. Piralishvili Sh.A. Vikhrevoi effekt. Eksperiment, teoriya, tekhnicheskie resheniya [Vortex effect. Experiment, theory, technical solutions]. Moscow: Energomash Publ., 2000. 412 p.

 © А. П. Черепанов, П. К. Ляпустин, В. В. Ёлшин, 2020

4. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. Struinye apparaty [Jet devices]. 3rd ed., revised. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989. 352 p.

5. Tsegel'skii V.G. K teorii gazovykh ezhektorov s tsilindricheskoi i konicheskoi kamerami smesheniya [On the theory of gas ejectors with cylindrical and conical mixing chambers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii* [*The bulletin of higher educational institutions*], 2012, No. 2. Pp. 46–71.

6. Chuprakov Yu.I. Gidroprivod i sredstva gidroavtomatiki: ucheb. posob. dlya vuzov po spetsial'nosti «Gidroprivod gidroavtomatika» [Hydraulic drive and means of hydroautomatics: a textbook for universities in specialty "Hydraulic drive, hydroautomatics"]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979. 232 p.

7. Cherepanov A.P. Struino-logicheskie ustroistva avtomaticheskoi orientatsii ploskikh detalei pri sborke: avtoref. kand. dis. [Jet-logic devices for automatic orientation of flat parts during assembly: author's abstract of the Ph.D. (Engineering) diss.]. IPI. Irkutsk, 1993. 20 p.

8. Lebedev I.V., Treskunov S.L., Yakovenko V.S. Elementy struinoi avtomatiki [Elements of jet automation]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1973. 360 p.

9. Krasnov N.F. Aerodinamika. Ch. 2. Metody aerodinamicheskogo rascheta [Aerodynamics. Part 2. Methods of aerodynamic calculation]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1980. 416 p.

10. Cherepanov A.P., Zemchenko A.V. Issledovanie rabochego protsessa vzaimodeistviya elementarnoi poverkhnosti detali s raspoznayushchei yacheikoi retseptora struino-logicheskogo orientiruyushchego ustroistva (SLOU) [Investigation of the working process of interaction of the elementary surface of the part with the recognition cell of the receptor of the jet-logical orienting device (JLOD)]. *Vestnik Chitinskogo politekhnicheskogo instituta* [*The bulletin of Chita Polytechnic Institute*], Iss. 3. Moscow: Moscow State Mining Un-ty Publ., 1996. Pp. 317–328.

11. Cherepanov A.P., Lyapustin P.K., Byrgazov P.N. Issledovanie potoka v zazore mezhdu plastinami struino-logicheskimi elementami [The study of the flow in the gap between the plates with jet-logic elements]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress. Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. im prof. V.Ya. Badenikova: tez. dokl.* [*Modern technologies and scientific and technological progress. Int. scientific and technical conf. named after prof. V. Ya. Badenikov: abstracts*]. Angarsk. AnGTU Publ., 2019. Pp. 102–103.

12. Gerts E.V. Pnevmaticheskie ustroistva i sistemy mashinostroeniya: spravochnik [Pneumatic devices and mechanical engineering systems: a reference book]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 218 p.

13. Gogrichiani G.V. Pnevmaticheskii struino-tenzometricheskii datchik polozheniya [A pneumatic jet-strain gauge position sensor]. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva* [*Mechanization and automation of production*], 1988, No. 12. Pp. 15–16.

14. Pikner M.Ya. Issledovanie aerodinamicheskogo effekta dlya struinykh zakhvatnykh pitatelei [Investigation of the aerodynamic effect for jet gripping feeders]. *Izvestiya vuzov* [*Proceedings of Universities*], 1968, No. 10. Pp. 16–169.

15. Volkmann Th. Multistage ejector pump for radial flow. Patent US 5584668 A; MKI F04F 5/16; F04F 5/22; F04F 5/00; F04F 005/00 Publ. Dec 17, 1996.

16. Cherepanov A.P. *Sposob ezhektirovaniya potoka i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [*A method of ejection flow and device for its implementation*]. Patent RF No. 2705695, MPK F04F 5/44. Applicant is FSBEI HE Angarsk State Technical University. Publ.: Nov 11, 2019. Bull. No. 32.

17. Cherepanov A.P. *Sposob obrazovaniya pul'satsii gazozhidkostnoi smesi i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [*A method for the formation of pulsations of a gas-liquid mixture and a device for its implementation*]. Patent RF No. 2657301, MPK B01D 3/14. Applicant is FSBHEI HE Angarsk State Technical University. Publ.: Jun 19, 2018. Bull. No. 17.

18. Cherepanov A.P. Novye vozmozhnosti ispol'zovaniya bezotryvnogo techeniya potoka zhidkosti v uzkom zazore mezhdu plastinami [New possibilities of using continuous flow of fluid flow in a narrow gap between the plates]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress: tez. dokl. nauch.-tekhnich. konf.* [*Modern technologies and scientific and technological progress: abstracts of the scientific and technical conf.*]. Angarsk, 1994. Pp. 30.

19. Cherepanov A.P. Pnevmaticheskii rezonator uprugikh kolebanii plastin [*The pneumatic resonator of elastic vibrations of plates*]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress: tez. dokl. nauch.-tekhnich. konf.* [*Modern technologies and scientific and technical progress: abstracts of the scientific and technical conf.*]. Angarsk, 1995. Pp. 17.

20. Basova E.V., Chasovskikh V.P. Kontroliruemye parametry sistemy ochistki vnutrennikh sten tsiklona ot otlozhenii melkodispersnoi drevesnoi pyli [Controlled parameters of the system for cleaning the inner walls of the cyclone collector from deposits of fine wood dust]. *Tekhnologiya pererabotki*. *Vestnik KrasGAU* [*Technology of processing. The bulletin of KrasSAU*], 2012, No. 5. Pp. 375–380.

Информация об авторах

Черепанов Анатолий Петрович – д-р техн. наук, профессор кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: boning89@mail.ru

Ляпустин Павел Константинович **–** канд. техн. наук, заведующий кафедрой управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет», г. Ангарск, , e-mail: lpk62@mail.ru.

Елшин Виктор Владимирович **–** д. т. н., профессор, *Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск.*

Information about the authors

Anatolii P. Cherepanov **–** Doctor of Engineering Science, Professor of the Department of Road Transport Management, Angarsk State Technical University, Angarsk, e–mail: boning89@mail.ru.

Pavel K. Lyapustin – Ph.D. in Engineering Science, head of the Subdepartment of Road Transport Management, Angarsk State Technical University, Angarsk, e–mail: lpk62@mail.ru.

Viktor V. Elshin – Doctor of Engineering Science, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk