DOI: 10.17117/na.2016.03.03.187

Поступила (Received): 28.03.2016

<http://ucom.ru/doc/na.2016.03.03.187.pdf>

Федоров С.С., Кобелев Н.С., Горностаев С.И. Теоретические аспекты использования вихревой трубы в системах теплоснабжения зданий и сооружений

Fedorov S.S., Kobelev N.S., Gornostaev S.I. Theoretical aspects of use of a vortex pipe in systems of heat supply of buildings and constructions

В данной работе проведен анализ проблемных мест в системах транспортировки природного газа и рассмотрен вопрос снижения энергопотребления и увеличения надежности работы систем газоснабжения за счет применения теплообменного аппарата вихревого типа, использующего энергию перепада давления природного газа для отопления помещений ГРП (ГРШ)

Ключевые слова: вихревая труба, теплообмен, система теплоснабжения

Федоров Сергей Сергеевич

Преподаватель

Юго-Западный государственный университет

г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Кобелев Николай Сергеевич

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

Юго-Западный государственный университет

г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Горностаев Сергей Иванович

Кандидат технических наук, доцент

Юго-Западный государственный университет

г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

In this work the analysis of problem places in systems of transportation of natural gas is carried out and the question of decrease in energy consumption and increase in reliability of work of systems of gas supply due to use of the heat exchange device of the vortex type using energy of a pressure drop of natural gas for heating of rooms of GRP (GRSh) is considered

Key words: vortex pipe, heat exchange, system of heat supply

Fedorov Sergey Sergeyevich

Teacher

Southwest state university

Kursk, 50 years of October st., 94

Kobelev Nikolay Sergeyevich

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Department

Southwest state university

Kursk, 50 years of October st., 94

Gornostaev Sergey Ivanovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Southwest state university

Kursk, 50 years of October st., 94

Энерго- и ресурсосбережение во всех отраслях и сферах деятельности человека, на сегодняшний день является актуальной задачей, комплексным решением которой занимаются многие ученые и инженерные работники [1-4]. Из всех отраслей хозяйственной деятельности человека энергетика оказывает самое большое влияние на нашу жизнь. Просчеты в этой области имеют серьезные последствия. Одним из инструментов инновации в энергетике является

энергосбережение с помощью применения теплообменных аппаратов. К ним относятся различные виды теплообменников, циклонов и вихревых труб.

Опишем процесс теплообмена в вихревой трубе конического типа, рис.1.

Рис. 1. Коническая схема вихревой трубы

Пусть газ при постоянном давлении P поступает через ускоряющий цилиндр «улитки» компрессора в вихревую трубу. В результате этого внутри трубы возникает круговой вихрь, который под действием давления распространяется, образуя спиралевидное тело турбулентности газа вдоль внутренней стенки трубы. При этом образуется пристенный вихревой слой, который нагревается за счет трения и создает теплоперенос через стенку во внешнюю среду. В результате эффекта Ранка вихрь расслаивается на две части: периферийную теплую и внутреннюю холодную, расположенную по оси аппарата. Горячий поток газа, упираясь в заглушку, попадает на лопасти рассекателя, возвращается обратно вдоль оси трубы через выходное/входное отверстие аппарата. Учитывая, что подача газа происходит систематически, в трубе наступает стационарный режим теплообмена между аппаратом и окружающей средой.

Рассмотрим баланс теплообмена между трубой и окружающей средой [5, 6], для плоского вихря, рис.2, для этого рассмотрим динамическое равновесие элементарного вихря в пограничном слое. Полагаем, что элементарный вихрь можно представить в виде твердого тела, причем трение между слоями отсутствует. Одновременно пренебрегаем силой тяжести на элементарный вихрь. Такой подход допустим при значительных величинах входного давления P . Для удобства совместим начало декартовой прямоугольной системой координат с точкой касания вихря со стенкой. Проведем ось абсцисс нормально к поверхности стенки к центру трубы, а ось ординат по касательной к стенке, ось аппликат проведем нормально к плоскости рисунка параллельно оси трубы.

Рис. 2. Расчетная схема вихревой трубы

Тогда получим:

$$\begin{cases} \vec{F}_p + \vec{F}_{тр} = 0 \\ \vec{F}_{цб} + \vec{N} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где $\vec{F}_p$, $\vec{F}_{тр}$, $\vec{F}_{цб}$, $\vec{N}$ соответственно сила входного давления на элементарный вихрь, сила трения скольжения элементарного вихря о внутреннюю стенку трубы, центробежная сила инерции и сила реакции стенки трубы, действующие на элементарный вихрь, N.

Используя первое уравнение системы 1, получим соотношение в проекции на образующую трубы L:

$$F_p - F_{тр} = 0, \quad (2)$$

Из (2) следует

$$F_p = F_{тр} \quad (3)$$

Определим F_p , используя формулы Дарси из [6], [7]

$$\Delta p_{тр} = \zeta L \bar{\rho} w^2 \cos^2 \alpha, \quad (4)$$

$\Delta p_{тр}$ - потери на трение; ζ - коэффициент сопротивления трения; L, $\bar{\rho}$ - соответственно длина образующей внутренней поверхности трубы, и эквивалентный - средняя плотность газа в элементарном вихре, кг/м³; $\bar{w}$ - средняя линейная скорость периферийного теплого потока; α - угол между осью трубы и образующей трубы.

Учитывая (3) и (4), найдем силу трения скольжения элементарного вихря о внутреннюю стенку трубы $F_{тр}$ в сечении внутреннего радиуса R:

$$F_{тр} = \Delta p_{тр} \cdot \Delta S, \quad (5)$$

где ΔS - толщина нормального сечения теплого слоя определяется по формуле:

$$\Delta S = 2\pi(R-l)\cos\alpha, \quad (6)$$

где R, l - соответственно внутренний радиус трубы и радиус холодного вихря в произвольном сечении, м. Причем $R - l = d = \text{const}$ - толщина периферийного теплого потока.

$d = 2R = 2L\sin\alpha + R_0$, см. рис.2, тогда формула (4) приобретает вид:

$$\Delta p_{тр} = \zeta L 4(L\sin\alpha + R_0)\bar{\rho} w^2 \cos^2 \alpha, \quad (7)$$

где R_0 - входной внутренний радиус трубы, м.

Подставляя (6) и (7) в (5), получим:

$$F_{\text{тр}} = \zeta \pi (R - l) \rho w^2 \cos \alpha (\sin \alpha + R/l), \quad (8)$$

Учитывая, что $\frac{R_0}{L} = k_1 = \text{const}$, получим

$$F_{\text{тр}} = \zeta \pi (R - l) \rho w^2 \cos \alpha (\sin \alpha + k_1) \quad (9)$$

Дрм на входе/выходе вихревой трубы определяются по формуле:

$$\Delta p_{\text{м1}} = \zeta_1 \rho w^2, \quad (10)$$

Учитывая, что потери давления происходят на входе и выходе трубы, по-

Дрм на входе и выходе вихревой трубы по формуле:

$$\Delta p_{\text{м}} = 2\Delta p_{\text{м1}} = \zeta_1 \rho w^2 \quad (11)$$

Используя (11), найдем силу сопротивления местным потерям давления $F_{\text{м}}$ на входе/выходе вихревой трубы по формуле:

$$F_{\text{м}} = 2\Delta p_{\text{м}} \pi R^2 = 2\zeta_1 \rho w^2 \pi R^2 \quad (12)$$

Определение тепловых потерь на трение. Найдем количество тепла Q , отдаваемое вихревой трубой через стенку во внешнюю среду, используя первый закон термодинамики для теплого вихря:

$$Q = A + \Delta U, \quad (13)$$

где A , ΔU – соответственно работа сил трения газа о стенку трубы и стенки входного/выходного отверстия, изменение внутренней энергии газа при его движении, Дж.

Из (13) следует учесть, что тепло, отдаваемое теплым газом через стенки трубы, появляется за счет совершения газом работы сил трения и соответствующего уменьшения внутренней энергии газа.

а) Представим A в виде суммы:

$$A = A_1 + A_2, \quad (14)$$

где A_1 , A_2 – соответственно работа сил трения газа о стенку трубы и стенки входного/выходного отверстия, Дж.

Определим A_1 по формуле :

$$\begin{aligned} A_1 &= \int_L \vec{F}_{\text{тр}} d\vec{L} = \int_0^{L_1} |\vec{F}_{\text{тр}}| |d\vec{L}| \cos 180^\circ = \\ &= 0 L_1 F_{\text{тр}} dL = -\zeta \pi (R - l) \rho w^2 \cos \alpha (\sin \alpha + k_1) 0 L_1 dL = -\zeta \pi (R - l) \rho w^2 L_1 \cos \alpha (\sin \alpha + k_1), \end{aligned} \quad (15)$$

где L_1 – длина образующей внутренней стенки трубы, м.

Определим A_2 по формуле:

$$-F_{\text{м}} h = -2\zeta_1 \rho w^2 \pi R^2 h, \quad (16)$$

где h – длина входного/выходного отверстия, м.

Подставляя (15) и (16) в (14), получим:

$$\zeta \pi R - l \rho w^2 L_1 \cos \alpha \sin \alpha + k_1 - 2\zeta_1 \rho w^2 \pi R^2 h \quad (17)$$

б) Определим ΔU по формуле:

$$i_2 \cdot m \mu R \Delta T, \quad (18)$$

где i – число степеней свободы теплого газового потока; μ – молекулярная масса газа, кг/моль; m – масса газа в вихревой трубе, кг; R – газовая постоянная $T = T_{\text{с1}} - T_{\text{вх}}$ – соответственно разность температур внутренней стенки трубы после нагревания и входная температура газа теплого потока, К.

в) Подставляя (18) и (17) в (13), получим:

$$\zeta \pi R - l \rho w^2 L_1 \cos \alpha \sin \alpha + k_1 - 2\zeta_1 \rho w^2 \pi R^2 h + i_2 \cdot m \mu R T_{\text{с1}} - T_{\text{вх}} \quad (19)$$

Формула (19) позволяет вычислить величину полного теплового потока Q , отдаваемого в окружающую среду.

г) Зная Q , мы легко можем определить температуру внешней поверхности трубы t_{c2} по формуле:

$$Q = \alpha_{тв}(t_v - t_{c2}), \quad (20)$$

где $\alpha_{тв}$ – коэффициент теплоотдачи от материала вихревой трубы окружающей среде, Дж/К; t_v – температура окружающей среды, °С.

Выводы. Выполнено математическое моделирование, получена группа выражений, описывающих процессы, протекающие в вихревой трубе при стабильном состоянии.

Список используемых источников:

1. Федоров С.С., Сидоров И.Ю., Труханов И.П., Яргункин Д.В., Хазеев Т.Р. Автоматизация процесса управления системой теплоснабжения зданий при зависимом присоединении к тепловым сетям // Научный альманах. 2015. № 9 (11). С. 870-874.
2. Горностаев И.С., Ключева Н.В., Колчунов В.И., Яковенко И.А. Деформативность железобетонных составных конструкций с наклонными трещинами // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 5 (256). С. 60-66.
3. Ключева Н.В. Предложения к расчету живучести коррозионно-повреждаемых железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 2008. № 3. С. 22-26.
4. Федоров С.С., Ключева Н.В., Бакаева Н.В. Оптимизация процесса управления системой теплоснабжения зданий // Строительство и реконструкция. 2015. № 5 (61). С. 90-95.
5. Федоров С.С., Тютюнов Д.Н., Ключева Н.В., Студеникина Л.И. К вопросу моделирования процесса управления системой теплоснабжения ресурсоэффективных зданий // Строительство и реконструкция. 2014. № 1 (51). С. 92-95.
6. Федоров С.С., Тютюнов Д.Н., Ключева Н.В. Управление системой отопления зданий с позиции ресурсосбережения // Строительство и реконструкция. 2013. № 5 (49). С. 36-39.

© 2016, Федоров С.С., Кобелев Н.С., Горностаев С.И.
Теоретические аспекты использования вихревой
трубы в системах теплоснабжения зданий и
сооружений

© 2016, Fedorov S.S., Kobelev N.S., Gornostaev S.I.
Theoretical aspects of use of a vortex pipe in systems
of heat supply of buildings and constructions