

Основы гидравлического расчета навесных вентилируемых фасадов Fundamentals of hydraulic design for ventilated facades

магистрант Явтушенко Евгения Борисовна
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
yavtushenko_89@mail.ru
Санкт-Петербург
Российская Федерация

Graduate Student Yevgeniya Borisovna Yavtushenko
Saint-Petersburg State Polytechnical University
yavtushenko_89@mail.ru
Saint-Petersburg
Russian Federation

Ключевые слова: свободно-конвективное течение, навесной вентилируемый фасад, показатель политропы, гидравлически оптимальный канал, плотность воздуха, вентилируемая щель.

Навесные фасадные системы с вентилируемым воздушным зазором являются частным случаем ограждающих конструкций с вентилируемыми воздушными прослойками. Течение воздуха в вертикальном вентилируемом канале – свободно-конвективное. Свободная конвекция – один из наиболее экономичных и практичных методов удаления влаги из воздушного зазора.

Спрашивается, каков должен быть размер (ширина) щели, обеспечивающий пропуск максимального расхода воздуха?

В статье рассмотрен вариант определения гидравлически оптимального навесного вентилируемого канала для зданий и сооружений.

Key words: free-convective flow, ventilated facades, polytropic, an optimal hydraulically channel, density of air, ventilated gap.

Suspended facade system with ventilated air gap it is a special case of walling ventilated air gap. Flow of air is free-convection in vertical ventilated channel. Convection - one of the most economical and practical method of removing moisture from the air gap.

The question is, what should be the size (width) of the gap, which providing maximum air flow pass?

We reviewed version of the definition an optimal hydraulic hinged ventilated channel for buildings in this article.

Вентилируемый фасад - это конструкция, состоящая из материалов облицовки (плит или листовых материалов) и под облицовочной системы, которая крепится к стене так, чтобы между облицовкой и стеной образовалась вентилируемая воздушная прослойка.

Система вентилируемого фасада состоит из несущего каркаса, утеплителя и облицовочных панелей.

Навесные фасадные системы с вентилируемым воздушным зазором являются частным случаем ограждающих конструкций с вентилируемыми воздушными прослойками, которые защищают утеплитель, примыкающий к стене здания, от воздействия окружающей среды, при этом наличие конвективных движений способствует выносу влаги в атмосферу и поддержанию утеплителя в состоянии с малой влажностью [10]. Такая конструкция лишена многих недостатков, характерных для фасадов, выполненных с использованием «мокрых» технологий, и широко применяется как при ремонте, так и при возведении новых зданий.

Течение воздуха в вертикальном вентилируемом канале – свободно-конвективное или термогравитационное. Свободная конвекция – один из наиболее экономичных и практичных методов удаления влаги из воздушного зазора. Если температура поверхности выше температуры окружающей среды, то воздух, омывающий поверхность, нагревается и, становясь более легким, начинает всплывать. В этом случае плотные соседние слои воздуха заменяют поднявшийся слой. Этот принцип замещения слоев используется при проектировании воздушных прослоек [1].

Для прогнозирования влажностного режима таких конструкций необходимо иметь четкое представление картины течения воздуха в вентилируемом канале и учитывать гидравлические параметры свободно-конвективного течения воздуха в зазоре [2].

Большой вклад в изучение характеристик свободноконвективных течений (СКТ) внесли российские и зарубежные исследователи. Определению теплофизических свойств вентилируемых воздушных прослоек и их влиянию на температурно-влажностный режим ограждающих конструкций посвящены работы Михеева М. А., Эккерта Э. Р., Гершуни Г. З., Соковишина Ю. А., Мартыненко О. Г., Идельчика Е. И., Шифринсона В. Л., Жуховицкого Е. М., Остроумова Г. А., Чумакова Ю. С., Колешко С. Б., Мачинского В. Д., Фокина К. Ф., Уонга Х., Богословского В. Н., Табунщикова Ю. А., Гагарина В. Г., Козлова В. В., Цыкановского Е. Ю. и многих других специалистов [11 - 22].

В вентилируемых каналах, образованных двумя вертикальными поверхностями, свободно-конвективное течение возникает при условии, что одна из поверхностей будет нагрета или охлаждена. Движущая сила, обусловленная разностью статических давлений между поступающим в канал воздухом и покидающими его, называется естественной тягой.

Результаты исследований представляют большой интерес, но для практического применения полученных результатов требуется сформулировать общий подход для определения оптимального расстояния от экрана до стены в вертикальных щелевых каналах.

Целью настоящей работы является нахождение гидравлически оптимального вентилируемого канала.

Пусть существует вертикальная щель, образованная двумя плоскостями $y=0$, $y=h$, высотой L , имеющими температуру холодной стенки T_c и температуру горячей стенки T_h (см. рисунок 1). В этом пространстве, за счет сил плавучести, индуцируется вязкая термогравитационная конвекция воздуха, обеспечивающая создание теплоизолирующей воздушной завесы и подсушивание плоскостей $y=0$, $y=h$.

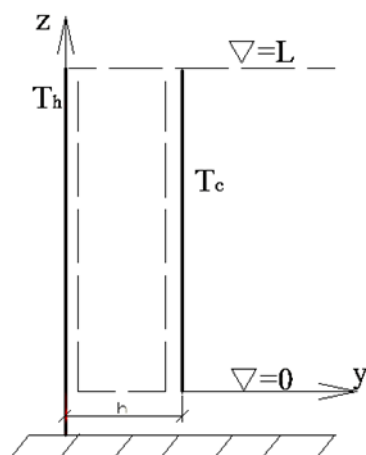


Рисунок 1. Схема вертикального канала

Свободно-конвективное течение воздуха создает восходящий воздушный поток, в котором роль «насоса» играет распределенный по высоте тепловой поток, передаваемый от плоскости $y=h$ к воздуху. Интенсивность передачи теплоты описывается дифференциальным уравнением теплопередачи [7]:

$$\frac{dT}{dz} = S_h (T_h - T) + S_c (T_c - T) \quad (1)$$

Где S_h , S_c – безразмерные коэффициенты теплопередачи (числа подобия Стентона),

$$S = \frac{\alpha}{\rho C_p v}$$

v – средняя скорость воздушного потока.

Средняя скорость воздушного потока вычисляется так:

$$v = \varphi \frac{gL}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{1}{n} - \frac{1}{k}}, \quad (2)$$

где

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda \frac{L}{h} + \sum_{(j)} \zeta_j}}$$

- коэффициент скорости для канала [3], где λ – коэффициент гидравлического трения (число Дарси).

Для существования свободно-конвективного течения в вертикальных плоских каналах должно соблюдаться условие баротропности для двух состояний воздуха: адиабатного равновесия воздуха в канале и свободно-конвективного течения, обусловленного нагревом воздуха от горячей стенки канала.

1. Получается, что при значении $n=k$, воздух находится в состоянии равновесия, т.е. в адиабатной щели свободно-конвективное течение отсутствует. Значит, если считать движение баротропным и заменить условие теплообмена (дифференциальное уравнение энергии) голономным условием баротропности [5], то $v=0$, $n=k$ (где v - скорость течения воздуха в канале; n -показатель политропы; k -показатель адиабаты);

2. Расширение воздуха в свободно-конвективном течении происходит при $n < k$; если $1 < n < k$, то расширение воздуха с подводом теплоты сопровождается его охлаждением. В таком случае свободно-конвективное течение неустойчиво. Если же $0 < n < 1$, подвод теплоты столь интенсивен, что температура воздуха по длине вертикального щелевого канала растет, свободно-конвективное течение устойчиво по всей длине (высоте) канала.

Таким образом, обобщая сказанное, можно утверждать, что если равновесному состоянию воздуха в вертикальном канале отвечает показатель политропы $n = n_1 > 0$, то при всяком значении $0 < n < n_1$ существует свободно-конвективное течение.

Расширение воздуха в свободно-конвективном течении изображается траекторией (политропой)

на плоскости переменных $\omega = \frac{\rho_0}{\rho}$, $\pi = \frac{P}{P_0}$ (рисунок 2)

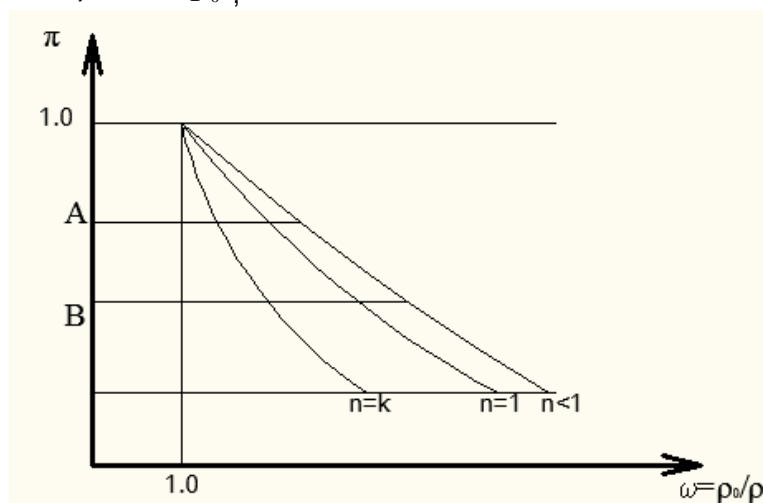


Рисунок 2. Политропное расширение воздуха в свободно-конвективном течении

Площадь между осью $\omega=0$ и траекторией изображает «механическую работу» расширения.

Если $n=k$, то работа недостаточна для перемещения (подъема) воздуха в вертикальном канале и превращается в потенциальную энергию покоящегося столба воздуха.

Если $n < k$, возникает профицит работы, реализуемый в кинетическую энергию столба воздуха. Чем больше разность $k-n$, тем больше профицит и выше скорость в свободно-конвективном течении.

Если $1 < n < k$, то расширение воздуха при свободно-конвективном течении сопровождается его охлаждением, как, например, при движении в печной трубе (подвод теплоты от топочного пространства недостаточен для расширения с увеличением температуры по длине дымохода).

Если $0 < n < 1$, подвод теплоты обеспечивает монотонный рост температуры воздуха по длине канала. Такая ситуация характерна для обогреваемых каналов, например, для вентилируемых каналов систем навесных вентилируемых фасадов.

Интенсивность теплообмена и показатель политропы n связаны тождеством [4]:

$$n = \frac{1}{1 + \frac{R}{gh} \frac{dT}{dz}}, \quad \bar{z} := \frac{z}{h} \in \left(0, \frac{L}{h}\right), \quad (3)$$

С учетом (1) равенство (3) можно так записать:

$$n = \frac{1}{1 + \frac{R}{gh} (S_h (T_h - T) + S_c (T_c - T))}, \quad (4)$$

В силу (2), (3), (4):

$$v = \varphi \frac{gL}{\sqrt{RT_c}} \sqrt{\frac{R}{gh} \frac{dT}{dz} + \frac{k-1}{k}}, \quad (5)$$

$$v = \varphi \frac{gL}{\sqrt{RT_c}} \sqrt{\frac{R}{gh} (S_h (T_h - T) + S_c (T_c - T)) + \frac{k-1}{k}}, \quad (6)$$

Из формул (5), (6) выясняется влияние интенсивности теплопередачи и температурных напоров на среднюю скорость течения в вертикальном щелевом канале НВФ.

Возникает следующий вопрос. Пусть известны предельные температуры, вертикальный размер канала, интенсивность передачи теплоты, коэффициент скорости φ . Спрашивается, каков должен быть размер (ширина) щели, обеспечивающий пропуск максимального расхода воздуха $q = hv$? Такая экстремальная задача приводит к понятию канала гидравлически оптимальной ширины. Именно, вертикальный щелевой канал называется гидравлически оптимальным в том и только в том случае, если, при заданных значениях $L, S_h, S_c, T_c, T_h, T_0$, он обеспечивает пропуск максимального массового расхода воздуха в условиях свободно-конвективного течения и баротропного течения воздуха.

Тогда, как доказано в [4] и [8], показатель политропы n удовлетворяет тождеству:

$$\frac{1}{n_{op}} = \frac{1}{\Lambda} - \frac{k-1}{k}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{n_{op}} - \frac{1}{k} = \frac{RT_c}{gL} - 1, \quad (8)$$

где $\Lambda := \frac{gL}{RT_c}$, где Λ - приведенная длина.

В этом случае, силу (2) и (7), в вертикальном щелевом канале устанавливается средняя скорость течения [9]:

$$v = \varphi \frac{gL}{\sqrt{RT_c}} \sqrt{\frac{RT_c}{gL} - 1} = \varphi \sqrt{gL - \frac{(gL)^2}{RT_c}}, \quad (9)$$

Понятие об оптимальном канале позволяет получить оценку для калибра гидравлически длинного щелевого канала. Эта оценка выглядит так:

$$\frac{h}{L} = \sqrt[3]{\frac{\lambda}{gL} \left(\frac{T_h - T_c}{T_c} \frac{\alpha_h}{\rho C_p} \right)^2}, \quad (10)$$

В эту оценку входят коэффициенты теплопередачи α_h и гидравлического трения λ , сами зависящие от параметров потока в НВФ. Для размеров оптимальных щелей выполняется, в силу (10) условие подобия:

$$\frac{h_1}{\sqrt[3]{L_1^2}} = \frac{h_2}{\sqrt[3]{L_2^2}},$$
 позволяющее пересчитывать, например, размеры с модели на натуру.

Естественно, полученные оценки занижены, т.к. при расчете сопротивления вертикального щелевого канала НВФ не учитываются местные потери напора (на вход, на выход, потери на крепежных кронштейнах и пр.).

Установлено, что чем короче канал, тем больше должна быть величина теплового потока, прогревающего воздух и создающего вертикальную тягу и, наоборот, в длинном канале тяга создается при меньшем тепловом потоке и, соответственно, при меньшем отклонении показателя политропы от равновесного значения n_e .

Известно, что для существования СКТ необходимо разность плотностей воздуха в начальном и в конечном сечениях вертикального канала. Эта разность плотностей создает подъемную силу (тягу), перемещающую частицы воздуха вдоль вертикального канала. На входе в канал интенсивность передачи теплоты велика (за счет перепада температуры между потоком и горячей стенкой), показатель политропы мал, а градиент средней скорости максимален [6].

По высоте канала поток прогревается, вследствие чего плотность воздуха понижается, а средняя скорость растет и пульсации затухают, что характерно для конфузорного течения.

При прогреве потока $n \rightarrow k$ и вблизи выходного сечения канала градиент средней скорости уменьшается. К выходу из канала возникает некая диффузорность за счет потерь напора на резкое расширение.

Для того чтобы минимизировать потери напора на расширение потока в выходном сечении канала, нам необходимо чтобы средняя скорость СКТ была постоянной $V = const$, тогда в этом случае h будет расти. Вообще говоря, с точки зрения минимизации потерь (увеличения φ - коэффициента скорости) необходимо иметь навесной вентилируемый фасад с вентилируемой щелью, расширяющейся снизу вверх.

Литература

1. Петриченко М. Р., Петrochenko М. В. Гидравлика свободно-конвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8(26). С. 51-56
2. Солощенко С. С. Влияние вентилируемого зазора на теплофизические характеристики систем наружного утепления фасадов зданий с применением тонкослойной штукатурки // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2(20). С. 39-41.
3. Петrochenko М. В. Основы гидравлического расчета СКТ в ограждающих строительных конструкциях. Автореферат дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н. Спец:05.23.16. СПб, 2012. 20 с.;
4. Петриченко М. Р., Петrochenko М. В. Достаточные условия существования СКТ в вертикальном щелевом канале // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2-2(147), 2012. С. 276-282;
5. Петросова Д. В., Неизотермическая фильтрация воздуха через ограждающие конструкции замкнутых помещений. Автореферат дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н. Спец. 05.23.16. СПб., 2012. 21 с.
6. Петриченко М. Р., Петросова Д. В., Петrochenko М. В., Фильтрационный перенос воздухом консервативной примеси (температуры и теплоты) сквозь стену. // НТВ. №4. 2012. С.221-225;
7. Страхович К. И. Термогазодинамика. Ч.3. Теория теплообмена. Л.: ЛПИ, 1966. 168 с.
8. Соковишин Ю. А., Березовский А. А., Мартыненко О. Г. Теория струй вязкой жидкости. Минск: Наука и техника, 1984. 256 с.
9. Мартыненко О. Г., Соковишин Ю. А., Свободно-конвективный теплообмен. Справочник. Минск: Наука и техника, 1982. 400 с.

10. Лапин В. Г., Лапин С. В. Расчет конвективного движения воздуха в канале вентилируемого фасада при наличии горизонтальных щелей между плитками облицовки // Приволжский научный журнал. 2012. №2(22). С. 85-92.
11. Богословский В. Н. Строительная теплофизика. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2006. 400 с.
12. Гагарин В. Г. О некоторых теплотехнических ошибках, допускаемых при проектировании вентилируемых фасадов // АВОК. 2005. № 2. С. 52-58.
13. Гагарин В. Г., Козлов В. В., Цыкановский Е. Ю. Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором // АВОК. 2004. № 2. С. 20-25.
14. Гагарин В. Г., Козлов В. В., Цыкановский Е. Ю. Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором // АВОК. 2004. № 3. С. 20-26.
15. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи М.: Энергия, 1977. 344 с.
16. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.
17. Табунщиков Ю. А., Климовичий М. С. Расчет теплового режима помещения при раздельном учете конвективной и лучистой составляющих теплообмена // Сборник трудов. Тепловой режим и долговечность зданий. М., 1987. 133 с.
18. Уонг Х. Основные формулы и данные для теплообмена для инженеров. Справочник. М.: Атомиздат, 1979. 212 с.
19. Elenbaas W. Heat dissipation of Parallel plates by free Convection // Physica. 1942. Vol. 9. Pp. 1-28.
20. Naylor D., Tarasuk J. D. Natural Convective Heat Transfer in a Divided vertical channel Part-I – Numerical Study // Journal of Heat Transfer. 1993. Vol. 115. Pp. 377-387.
21. Naylor D. A., Floryan J. D., Tarasuk J. D. Numerical study of Developing Free convection Between Isothermal vertical plates // Journal of Heat Transfer. 1991. Vol. 113. Pp. 620-626.
22. Sparrow E. M., Azevedo L. F. A. Vertical channel natural convection spanning between fully-developed limit and the single-plate boundary-layer limit // International Journal Heat Mass Transfer. 1985. Vol. 28. Pp. 1847-1857.
23. Tanda G. Natural Convection Heat Transfer in vertical channels with and without transverse square ribs // International Journal of Heat Mass Transfer. 1997. Vol. 40. No. 9. Pp. 2173-2185.

References

1. Petrichenko M. R., Petrochenko M. V. Hydraulics of natural convection flows in building walling with air gap // Magazine of Civil Engineering. 2011. No. 8(26). Pp. 51-56. (rus)
2. Soloschenko S. S. Vliyaniye ventiliruemogo zazora na teplofizicheskiye harakteristiki sistem naruzhnogo utepleniya fasadov zdaniy s primeneniem tonkoslojnoj shtukaturki [Influence of a ventilated gap on heatphysical characteristics of systems of external warming of facades of buildings with application of thin layer plaster] // Magazine of Civil Engineering. 2011. No. 2(20). Pp. 39-41. (rus)
3. Petrochenko M. V. Osnovy gidravlicheskogo rascheta SKT s ograzhdavushchih konstruktivnykh [Bases of hydraulic calculation of SKT in protecting construction designs]. Synopsis of Ph.D's dissertation. Specialization code: 05.23.16. SPb, 2012. 20 p. (rus)
4. Petrichenko M. R., Petrochenko M. V. Dostatochnyye usloviya suschestvovaniya SKT v vertikal'nom shelevom kanale // NTV SPbSPU. Vol. 2. No. 147. 2012. Pp. 276-282. (rus)
5. Petrosova D. V. Neizotermicheskaya filtratsiya vozduha cherez ograzhdavushchiye konstruksii zamknutykh pomesheniy [Nonisothermal filtration of air through the building envelope enclosed spaces]. Synopsis of Ph. D's dissertation. Speciality number: 05.23.16. SPb., 2012. 21 p. (rus)
6. Petrichenko M. R., Petrosova D. V., Petrochenko M. V. Filtratsionnyy perenos vozduhom konservativnoy primesi (temperatury i teploty) skvoz stenu [Filtrational transfer by air of conservative impurity (temperature and warmth) through a wall] // NTV SPbSPU. No. 4. 2012. Pp. 221-225. (rus)
7. Strahovich K. I. Thermogasodinamika [Thermogas dynamics] Part 3. Leningrad: Polytechnical University, 1966 Pp. 168. (rus)
8. Sokovishin Y. A., Berezovskiy A. A., Martynenko O. G. Teoria struj vyazkoj zhidkosti [The theory of streams of viscous liquid]. Minsk: Nauka i tehnika, 1984. 256 p. (rus)
9. Martynenko O. G., Sokovyshin Y. A. Svobodnokonvektivnyy teploobmen [Free and convective heat exchange]. Reference book. Minsk: Nauka i tehnika, 1982. 400 p. (rus)

10. Lapin V. G., Lapin S. V. Air convective movement calculation in the channel of the ventilated facade with repeated horizontal holes in the lateral wall // *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2012. Vol. 2(22). Pp. 85-92. (rus)
11. *Bogoslovskiy V. N. Thermal physics in construction*. SPb.: AVOK North-West, 2006. 400 p. (rus)
12. *Gagarin V. G. O nekotorykh teplotehnikeskikh oshibkakh, dopuskayemykh pri proektirovanii ventiliruemyykh fasadov* [About some heattechnical mistakes allowed at design of ventilated facades] // AVOK. 2005. No. 2. Pp. 52-58. (rus)
13. *Gagarin V. G., Kozlov V. V., Zykanovskiy E. Y. Raschet teplozaschity fasadov s ventiliruemym vozdushnym zazorom* [Calculation of a heat-shielding of facades with a ventilated air gap] // AVOK. 2004. No. 2. Pp. 20-25. (rus)
14. *Gagarin V. G., Kozlov V. V., Zykanovskiy E. Y. Raschet teplozaschity fasadov s ventiliruemym vozdushnym zazorom* [Calculation of a heat-shielding of facades with a ventilated air gap] // AVOK. 2004. No. 3. Pp. 20-26. (rus)
15. *Miheev M. A., Miheeva I. M. Osnovy teploperedachi* [Heat transfer bases] M.: Energiya, 1977. 344 p.
16. *Tabunschikov Y. A., Brodach M. M. Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya teplovoj effektivnosti zdaniy* [Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings]. M.: AVOK-PRESS, 2002. 194 p. (rus)
17. *Tabunschikov Y. A., Klimovichkij M. S. Raschet teplovogo rezhima pomesheniya pri razdelnom uchete konvektivnoy i luchistoy sostavlyayushih teploobmena* [Calculation of a thermal mode of the room at the separate accounting of convective and radiant components of heat exchange] // *Proceedings: A thermal expansion and durability of buildings*. Moscow, 1987. Pp.133 (rus)
18. *Wang X. Basic formulas and data for heat exchange for engineers*. Reference book. M.: Atomizdat, 1979. 212 p. (rus)
19. *Elenbaas W. Heat dissipation of Parallel plates by free Convection* // *Physica*. 1942. Vol. 9. Pp. 1-28.
20. *Naylor D., Tarasuk J. D. Natural Convective Heat Transfer in a Divided vertical channel Part-I – Numerical Study* // *Journal of Heat Transfer*. 1993. Vol. 115. Pp. 377-387.
21. *Naylor D. A., Floryan J. D., Tarasuk J. D. Numerical study of Developing Free convection Between Isothermal vertical plates* // *Journal of Heat Transfer*. 1991. Vol. 113. Pp. 620-626.
22. *Sparrow E. M., Azevedo L. F. A. Vertical channel natural convection spanning between fully-developed limit and the single-plate boundary-layer limit* // *International Journal Heat Mass Transfer*. 1985. Vol. 28. Pp. 1847-1857.
23. *Tanda G. Natural Convection Heat Transfer in vertical channels with and without transverse square ribs* // *International Journal of Heat Mass Transfer*. 1997. Vol. 40. No. 9. Pp. 2173-2185.