Http://www.engstroy.spb.ru – полнотекстовая версия журнала в сети Интернет. Бесплатный доступ, обновление с каждым новым выпуском.

Инженерно-строительный журнал
научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

Свидетельство о государственной регистрации: ПИ №ФС77-38070, выдано Роскомнадзором

Специализированный научный журнал

Включен в Перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ

Периодичность: 8 раз в год

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Адрес редакции:

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 226А

Главный редактор:

Вера Михайловна Якубсон

Научный редактор:

Николай Иванович Ватин

Литературный редактор:

Александра Дмитриевна Федорак

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф., зав. каф. ФГБОУ ВПО СПбГПУ Н.В. Арефьев;
д.т.н., проф., ректор ГОУ СГАСУ М.И. Бальзанников;
к.т.н., проф., проректор по перспективным проектам ФГБОУ ВПО СПбГПУ А.И. Боровков;
д.т.н., проф., Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Э.К. Завадскас;
д.т.н., проф., зав. каф. ФГБОУ ВПО СПбГПУ В.В. Лалин;
к.т.н., директор РУП «Институт БелНИИС» М.Ф. Марковский;

и другие.

Полный список редсовета и редколлегии – на веб-сайте журнала.

Установочный тираж 1000 экз.

Тел.: +7(812) 297-59-49

E-mail: engstroy@inbox.ru

Содержание

КОНСТРУКЦИИ

Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Тепловые потери подземных канальных теплопроводов в условиях деформации слоя тепловой изоляции с учетом радиационного теплообмена в полости канала 2

Мотузене В.В., Валанчюс К.Э., Рынкун Г.З. Комплексный анализ энергоэффективности общественных зданий на примере ВГТУ (англ.) 9

МЕТОДЫ

Корниенко С.В. Тестирование метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на результатах натурных измерений параметров микроклимата помещений 18

Петросова Д.В. Фильтрация воздуха через ограждающие конструкции 24

Сотников А.Г., Боровицкий А.А. Теоретически-экспериментальное обоснование метода оптимизации воздухообменов в системах промышленной вентиляции 32

РАСЧЕТЫ

Абсалямов Д.Р. Повышение надежности инженерных систем методом формализации поиска отказов 39

Самарин О.Д., Азивская С.С. Влияние закона регулирования на годовой расход теплоты автоматизированными климатическими системами 48

Калякин А.М., Чеснокова Е.В. Новая зависимость для определения коэффициента гидравлического сопротивления в переходной зоне сопротивления (от ламинарного режима к турбулентному) 51

АНАЛИЗ

Михалев М.А. Скорость свободного движения плохообтекаемых тел в жидкости 56

Мильцын Д.А. Динамика потока воды, возникающего при опорожнении камеры судоходного шлюза 61

ИНФОРМАЦИЯ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ 68

© ФГБОУ ВПО СПбГПУ. Все права защищены.
Материалы, помеченные знаком ®, публикуются на правах рекламы.

На обложке: внутренние инженерные сети общественного здания, г. Миккели, Финляндия.

Http://www.engstroy.spb.ru – full-text open-access version in Internet. It is updated immediately with each new issue.

Magazine of Civil Engineering
scientific and applied edition

ISSN 2071-4726

Peer-reviewed scientific and technical journal

Start date: 2008/09

8 issues per year

Publisher:

Saint-Petersburg State Polytechnical University

Corresponding address:

226a Hydro Building, 29 Polytechnicheskaya st., Saint-Petersburg, 195251, Russia

Editor-in-chief:

Vera M. Yakubson

Science editor:

Nikolay I. Vatin

Copy editor:

Alexandra D. Fedorak

Editorial board:

N.V. Arefev, Saint-Petersburg State Polytechnical University, Russia
M.I. Balzannikov, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia
A.I. Borovkov, Saint-Petersburg State Polytechnical University, Russia
E.K. Zavadskas, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania
V.V. Lalin, Saint-Petersburg State Polytechnical University, Russia

M.F. Markovskiy, Republic Unitary Enterprise "Institute BelNIIS", Belarus

B.E. Melnikov, Saint-Petersburg State Polytechnical University, Russia

V.I. Morozov, State Architecturally-Building University, Russia

G.V. Nesvetayev, Rostov State Civil Engineering University, Russia

and others. The full list of editorial board is available on the website.

Contact us:

+7(812) 535-52-47

engstroy@inbox.ru

Contents

STRUCTURES

Kuznetsov G.V., Polovnikov V.Yu. Heat loss of underground channel heat pipelines with strained thermal insulation layer, taking into account radiative heat transfer in the cavity of the channel (rus) 2

Motuziene V., Valancius K., Rynkun G. Complex analysis of energy efficiency of public buildings: case study of VGTU 9

METHODS

Korniyenko S. V. Testing of calculation method of the enclosing structures temperature-humidity conditions on the results of indoor climate in-situ measurements (rus) 18

Petrosova D. V. Air filtering through the building envelope (rus) 24

Sotnikov A. G., Borovitskiy A. A. Theoretical and experimental validation of the air changes in industrial ventilation optimization method (rus) 32

CALCULATIONS

Absalyamov D. R. Improving the engineering systems reliability by formalizing the failure search (rus) 39

Samarin O. D., Azivskaya S. S. The influence of control algorithm on the annual energy consumption of automated climate systems (rus) 48

Kalyakin A. M., Chesnokova E. V. New relationship for determining the coefficient of hydraulic resistance in the transition zone of resistance (from laminar to turbulent flow) (rus) 51

ANALYSIS

Mikhalev M. A. Free flow velocity of high-drag particles in liquid (rus) 56

Miltsin D.A. Dynamics of the water flow, appearing during navigation lock chamber drawdown (rus) 61

ENGLISH BLOCK 68

© Saint-Petersburg State Polytechnical University. All rights reserved.

On the cover: inside building services, public building, Finland

Тепловые потери подземных канальных теплопроводов в условиях деформации слоя тепловой изоляции с учетом радиационного теплообмена в полости канала

Д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой Г.В. Кузнецов;
к.т.н., доцент В.Ю. Половников*,
ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Ключевые слова: математическое моделирование; теплопровод; тепловые потери; теплоизоляция

Наиболее слабым звеном централизованных систем теплоснабжения являются теплопроводы и трубопроводы горячего водоснабжения. Схемы и средства транспортировки теплоносителя в системах централизованного теплоснабжения, построенные в СССР, характеризуются недостаточной надежностью, высокой повреждаемостью трубопроводов тепловой сети и большими тепловыми потерями в них [1].

По различным оценкам [2], потери тепла при транспортировке теплоносителя составляют от 10 до 30 % и более. В тепловых сетях теряется вся экономия от комбинированной выработки тепла и электроэнергии на ТЭЦ. В связи с этим, вопросы, связанные с анализом тепловых режимов и тепловых потерь теплопроводов, эксплуатируемых в различных условиях, приобретают особую актуальность.

Основными причинами роста тепловых потерь теплопроводов являются увлажнение [3], деформация и нарушения целостности слоя тепловой изоляции [4]. Масштабы потерь тепла теплотрубопроводов, эксплуатирующихся с увлажненной изоляцией, и факторы, оказывающие основное влияние на интенсификацию тепловых потерь в подобных условиях, установлены и приведены в [5, 6]. Однако до настоящего времени не опубликовано результатов каких-либо теоретических или экспериментальных исследований тепловых режимов и тепловых потерь систем транспортировки тепла, работающих с частично разрушенной или деформированной тепловой изоляцией.

Целью данной работы является численный анализ масштабов тепловых потерь подземных канальных теплопроводов в условиях деформации слоя тепловой изоляции с учетом радиационного теплообмена в полости канала.

Постановка задачи

Рассматривается широко распространенная в РФ конфигурация подземного теплопровода [7], размещенного в непроходном канале и теплоизолированного минеральной ватой. Схематическое изображение области решения приведено на рис. 1.

Деформация изоляции теплопровода имитировалась путем снижения толщины слоя тепловой изоляции в верхней части и провисанием (с образованием воздушной прослойки) теплоизоляции в нижней части теплопровода. Подобное состояние теплоизоляционной конструкции теплопроводов является достаточно распространенным и отражает реальную геометрию изоляции теплопроводов тепловых сетей [8].

Для рассматриваемой области (рис. 1) решается двумерная сопряженная стационарная задача кондуктивно-конвективно-радиационного теплопереноса [9, 10] в системе «подземный канальный теплопровод с деформированной изоляцией – окружающая среда». Целесообразность перехода к сопряженным постановкам задач [9, 10] при прогностическом моделировании тепловых режимов работы теплопроводов описана в [11, 12]. В [11, 12] показаны обоснованность предложенного перехода, существенное влияние распределений температур и теплового излучения в полости канала на формировании теплового режима рассматриваемых систем и необходимость учета этого фактора при проектировании и анализе работы тепловых сетей.

Следует отметить, что решение нестационарной задачи теплопереноса для рассматриваемой системы (рис. 1) не является целесообразным, поскольку нестационарные режимы работы теплопроводов наблюдаются только при вводе тепловых сетей в эксплуатацию после плановых или внеплановых остановок и не являются характерными режимами их работы.

При постановке задачи приняты следующие основные допущения.

1. Теплофизические характеристики материалов, используемые при численном анализе, являются постоянными и известными величинами.
2. Воздух, заполняющий полость канала, является сухим, несжимаемым и удовлетворяющим приближению Буссинеска [13].
3. В воздушной прослойке, образовавшейся в результате деформации слоя тепловой изоляции, расчет теплопередачи производится с использованием эффективного коэффициента теплопроводности [14], учитывающего интенсификацию теплообмена, вызываемую свободной конвекцией.

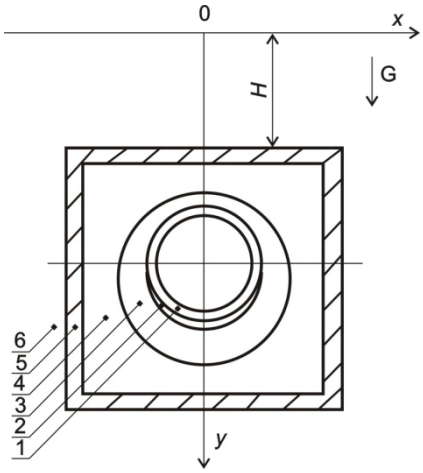


Рисунок 1. Схема области решения задачи: 1 – стенка трубы; 2 – воздушная прослойка; 3 – слой деформированной тепловой изоляции; 4 – воздушная полость канала; 5 – железобетонная стенка канала; 6 – грунт

Принятые допущения, с одной стороны, не накладывают принципиальных ограничений на физическую модель рассматриваемой системы, а с другой – позволяют определенным образом упростить алгоритм и метод решения поставленной задачи.

Математическая модель

В предлагаемой постановке процесс переноса тепла в рассматриваемой области решения будет описываться:

- для воздуха в полости канала – уравнениями энергии, движения и неразрывности:

$$C_a \rho_a \left(\vec{w}, \nabla T_a\right) = \lambda_a \nabla^2 T_a , \tag{1}$$

$$(\vec{w}, \nabla)\vec{w} = -\frac{1}{\rho_a}\nabla p + \nu_a \nabla^2 \vec{w} + \vec{F} , \tag{2}$$

$$\nabla \vec{w} = 0 ; \tag{3}$$

- в стенке трубы, слое тепловой изоляции, воздушной прослойке, стенах канала и грунте – уравнениями теплопроводности:

$$\nabla^2 T_p = 0 , \tag{4}$$

$$\nabla^2 T_i = 0 , \tag{5}$$

$$\nabla^2 T_{ai} = 0 , \tag{6}$$

$$\nabla^2 T_c = 0 , \tag{7}$$

$$\nabla^2 T_g = 0 . \tag{8}$$

При постановке задачи предполагалось, что на внутренней поверхности трубы поддерживается постоянная температура, равная температуре теплоносителя:

$$T_{p,1} = T_{in} = \text{const} . \tag{9}$$

На границах слоев реализуются условия идеального теплового контакта:

$$\lambda_{\mathrm{p}}\,\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{p},2}\right)=\lambda_{\mathrm{i}}\,\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{i},2}\right),\quad T_{\mathrm{p},2}=T_{\mathrm{i},2}\,, \tag{10}$$

$$\lambda_{\mathrm{p}}\,\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{p},3}\right)=\lambda_{\mathrm{ef}}\,\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{ai},3}\right),\quad T_{\mathrm{p},3}=T_{\mathrm{ai},3}\,, \tag{11}$$

$$\lambda_{\mathrm{ef}}\,\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{ai},4}\right)=\lambda_{\mathrm{i}}\,\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{i},4}\right),\quad T_{\mathrm{ai},4}=T_{\mathrm{i},4}\,, \tag{12}$$

$$\lambda_{\mathrm{a}}\,\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{a},6}\right)=\lambda_{\mathrm{g}}\,\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{g},6}\right),\quad T_{\mathrm{a},6}=T_{\mathrm{g},6}\,. \tag{13}$$

На границе раздела «слой изоляции – полость канала» учтен теплообмен излучением:

$$\lambda_{\mathrm{i}}\,\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{i},5}\right)=\lambda_{\mathrm{a}}\,\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{a},5}\right)+\varepsilon_{\mathrm{res}}\sigma\left(T_{\mathrm{i},5}^{4}-T_{\mathrm{a},5}^{4}\right),\quad T_{\mathrm{i},5}=T_{\mathrm{a},5}\,. \tag{14}$$

На поверхности раздела «грунт – окружающая среда» реализуются условия конвективного теплообмена:

$$-\lambda_{\mathrm{g}}\,\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{g},7}\right)=\alpha\left(T_{\mathrm{g},7}-T_{\mathrm{ex}}\right). \tag{15}$$

Для стенки трубы, воздушной прослойки и слоя тепловой изоляции выполняются условия симметрии:

$$\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{p}}\right)=0\,, \tag{16}$$

$$\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{ai}}\right)=0\,, \tag{17}$$

$$\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{i}}\right)=0\,. \tag{18}$$

На достаточно большом расстоянии от теплопровода градиенты температур в грунте равны нулю:

$$\mathrm{grad}\left(T_{\mathrm{g}}\right)=0,\quad x\to\pm\infty,\ y\to-\infty\,. \tag{19}$$

Скорость движения воздуха на внешней поверхности изоляции трубопровода, а также на внутренней поверхности стенок канала равна нулю (условия прилипания):

$$w_{\mathrm{a},5}=w_{\mathrm{a},6}=0\,. \tag{20}$$

Эффективный коэффициент теплопроводности воздушной прослойки вычислялся из соотношения [14]:

$$\lambda_{\mathrm{ef}}=0.18\,\lambda_{\mathrm{a}}\left(\mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr}\right)^{0.25}. \tag{21}$$

Обозначения: T – температура, К; x, y, – координаты; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); С – теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м^3; p – давление, Па; w – скорость, м/с; ν – кинематическая вязкость, м^2/с; G – ускорение силы тяжести, м/с^2; β – коэффициент температурного расширения, К$^{-1}$; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К), Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля; F – массовые силы, Н/кг: F_x=0, F_y=G β ($T_{\mathrm{a},\ 5}$ – $T_{\mathrm{a},\ 6}$); ε – степень черноты; σ=5.67·10^{-8} Вт/(м^2·К^4) – постоянная Стефана – Больцмана.

Индексы: p – стенка трубы; i – слой тепловой изоляции; ef – эффективный; ai – воздушная прослойка; a – полость канала; c – стенка канала; g – грунт; in – внутренний; ex – внешний; res – приведенный; 1 – внутренняя поверхность трубы; 2 – 7 –соответственно границы разделов «стенка трубы – изоляция», «стенка трубы – воздушная прослойка», «воздушная прослойка – изоляция», «изоляция – стенка канала», «стенка канала – грунт», «грунт – окружающая среда».

Метод решения и исходные данные

Задача (1)-(21) решена методом конечных элементов [15] с использованием аппроксимации Галеркина. Исследования проводились на неравномерной конечно-элементной сетке, состоящей из 15492 элементов. Воздушная полость канала содержала 4640 элементов. Количество элементов выбиралось из условий сходимости решения, сгущение сетки проводилось методом Делоне [16].

Исследования проводились для трубопровода с диаметром условного прохода 600 мм, изготовленного из стали 10 (толщина стенки 9 мм), тепловая изоляция – минеральная вата (толщина 70 мм) [7]. Теплопровод размещался в канале марки КЛс 120-120 [7]. Расстояние от поверхности грунта до верхней части канала составляло H = 1 метр. Температура внутренней поверхности трубы считалась равной T_{in}=363К и соответствовала среднегодовой температуре теплоносителя в подающих трубопроводах водяных тепловых сетей при их работе по температурному графику [17] – 150/70 °С. Температура окружающей среды во всех вариантах численного анализа принималась равной средней температуре воздуха за отопительный период в городе Томск [17] – T_{ex}=264,2 К. Средний коэффициент теплоотдачи на поверхности раздела «грунт – окружающая среда» составлял α=5 Вт/(м^2·К).

Несмотря на то, что при постановке задачи предполагалось использование области решения неограниченных размеров (выражение (19)), при проведении численного моделирования использовалась расчетная область размерами 6 м в глубину и по 5 м в стороны от оси симметрии. Размеры расчетной области выбирались на основании серии предварительных численных экспериментов таким образом, чтобы относительное изменение температур на границах области решения не превышало 0,5 %.

Наличие деформации изоляции теплотрубопровода учитывалось снижением толщины слоя в верхней части и провисанием теплоизоляции в нижней части теплопровода на величину, равную полутолщине изоляции (35 мм). Размер воздушной прослойки соответствовал размеру слоя тепловой изоляции, на который была уменьшена толщина теплоизоляции в верхней части конструкции.

В таблице 1 приведены значения теплофизических характеристик [18, 19], использованных при проведении численных исследований тепловых потерь рассматриваемой системы.

Таблица 1. Теплофизические характеристики материалов [18, 19]

Материал	Тепловая изоляция	Покровный слой	Стенка канала	Грунт				
				Глинистый		Песчаный		Суглинок с массовой влажностью 42 %
				Талый	Мерзлый	Талый	Мерзлый	
λ, Вт/(м·К)	0,059	0,87	1,54	1.1	1.3	2.3	3.7	1.5
C, Дж/(кг·К)	670	837	887	1231	959	1486	1005	1150
ρ, кг/м^3	206	1750	2200	1700	1700	2000	2000	1960
ε	–	0,8	0,85	–	–	–	–	–

Результаты численного моделирования

Основные результаты численного исследования тепловых потерь теплопроводов в рассматриваемых условиях приведены в таблице 2.

Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, выполнения условий баланса энергии на границах области расчета, а также подтверждается проведенной ранее проверкой [11] адекватности предложенного подхода к анализу тепловых режимов теплопроводов. Относительная погрешность расчетов тепловых потерь во всех вариантах численного анализа не превышала 0,5 %, что можно считать приемлемым при проведении численных исследований тепловых потерь систем транспортировки тепла.

В таблице 2 приведены величины тепловых потерь теплопровода, тепловая изоляция которого не деформирована Q, деформирована без учета Q_1 и с учетом Q_2 радиационного

теплообмена в полости канала, а также тепловые потери Q_{rul}, рассматриваемого объекта, рассчитанные с использованием действующих правил по проектированию тепловой изоляции трубопроводов [17].

Таблица 2. Результаты расчета тепловых потерь рассматриваемой системы (рис. 1)

Грунт		Q_{rul}, Вт/м	Q, Вт/м	Q_1, Вт/м	Q_2, Вт/м	$\frac{Q_{rul}-Q}{Q_{rul}}100\%$	$\frac{Q_1-Q}{Q_1}100\%$	$\frac{Q_2-Q}{Q_2}100\%$
Глинистый	Талый	117.5	114.7	124.0	146.6	2.4	7.5	21.8
	Мерзлый	122.8	119.5	129.7	152.3	2.7	7.7	21.5
Песчаный	Талый	137.8	132.8	145.9	169.1	3.6	9.0	21.5
	Мерзлый	146.6	140.6	154.1	179.8	4.1	8.8	21.8
Суглинок с массовой влажностью 42 %		127.1	123.2	133.7	156.8	3.1	7.8	21.4

Результаты численного моделирования, приведенные в таблице 2, свидетельствуют о закономерном увеличении тепловых потерь теплопроводов при их прокладке в грунтах, имеющих более высокую теплопроводность (таблица 1). Сопоставление результатов численного анализа тепловых потерь теплопровода с недеформированной тепловой изоляцией Q с тепловыми потерями Q_{rul}, вычисленными по методике [17], позволяет сделать вывод о том, что расхождение между ними (таблица 2) не превышает 4.1 %, что в целом подтверждает адекватность предлагаемой в данной работе математической модели и методики анализа тепловых потерь теплопроводов.

Сопоставление Q с Q_1 (таблица 2) свидетельствует о том, что относительно небольшое изменение геометрических характеристик теплоизоляционной конструкции рассматриваемой системы приводит к увеличению тепловых потерь рассматриваемого теплопровода на 7.5-9.0 %. Учет теплообмена излучением в полости канала теплопровода (таблица 2) для рассматриваемых в данной работе условий позволяет говорить о возрастании тепловых потерь Q_2 до 21.8 % по сравнению с Q.

Поскольку рассматриваемые условия работы теплопроводов являются достаточно распространенными [8], а протяженность тепловых сетей в крупных городах и промышленных центрах составляет десятки [1], а иногда и сотни километров [5], суммарные потери тепла, связанные с деформацией тепловой изоляции, могут достигать существенных значений. Величины тепловых потерь, приведенные в таблице 2, для теплопроводов, эксплуатируемых в условиях достаточно умеренной деформации слоя тепловой изоляции, определенным образом объясняют существующий в настоящее время уровень тепловых потерь в тепловых сетях [1-6, 8, 11, 12].

Анализ температурных полей в зоне прокладки теплопровода и структуры течения воздуха в полости канала свидетельствует о том, что распределение изотермических линий в рассматриваемой области решения качественно согласуется с результатами численного моделирования [11, 12], а наличие деформации тепловой изоляции теплопровода не вносит заметных изменений в структуру течения и поле скоростей воздуха в полости канала [11, 12].

Заключение

Проведен численный анализ влияния деформации слоя тепловой изоляции и наличия теплообмена излучением в полости канала на тепловые режимы и тепловые потери подземных канальных теплопроводов.

Установлено, что в рамках предложенной модели тепловые потери теплопровода в условиях деформации изоляции с учетом радиационного теплообмена в полости канала возрастают на 21.4-21.8 %.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о перспективности применения разработанной модели и методики численного анализа для оценки масштабов тепловых потерь теплопроводов, работающих с деформированной тепловой изоляцией.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ (проект № МК-1284.2011.8).

Литература

1. Слепченок В. С., Петраков Г. П. Повышение энергоэффективности теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей северных и северо-восточных регионов России // Инженерно-строительный журнал. 2011. №4(22). С. 26–32.
2. Кузнецов Л. А., Григорьева Л. А. Определение потерь тепловой энергии через изоляцию трубопроводов теплофикационной воды в результате тепловых испытаний // Новости теплоснабжения. 2006. № 3. С. 51–52.
3. Яковлев Б. В. Предотвращение коррозионной повреждаемости теплосетей канальной прокладки // Новости теплоснабжения. 2009. № 3. С. 39–41.
4. Байбаков С. А., Тимошкин А. С. Основные направления повышения эффективности тепловых сетей // Электрические станции. 2004. № 7. С. 19–25.
5. Kuznetsov G. V., Polovnikov V. Yu. Numerical Simulation of the Thermal State of a Flooded Pipeline Taking into Account Unsteadiness of the Process of Heat Insulation Saturation with Moisture // Thermal Engineering. 2008. Vol. 55. No. 5. Pp. 426-430.
6. Kuznetsov G. V., Polovnikov V. Yu. Numerical analysis of heat losses by main heat pipelines under conditions of complete or partial flooding // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2008. Vol. 81.No. 2. Pp. 323-331.
7. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей. Курган: Интеграл, 2010. 357 с.
8. Шойхет Б. М., Ставрицкая Л. В. Обследование технического состояния и реконструкция тепловой изоляции эксплуатируемых магистральных теплопроводов // Энергосбережение. 2002. № 3. С. 60-62.
9. Luikov A. V. Conjugate convective heat transfer problems // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1974. Vol. 17. Pp. 257-265.
10. Lee J. R., Ha M. Y. A numerical study of natural convection in a horizontal enclosure with a conducting body // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 48. Pp. 3308-3318.
11. Кузнецов Г. В., Половников В. Ю. Численный анализ влияния радиационного теплообмена на тепловые режимы и тепловые потери теплопроводов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 5–6. С. 12–20.
12. Kuznetzov G. V., Polovnikov V. Yu. Numerical Investigation of Thermal Regimes in Twin-Tube-Channel Heat Pipelines Using Conductive-Convective Model of Heat Transfer // Thermal Engineering. 2012. Vol. 59. No. 4.Pp. 310-315.
13. Spiegel E. A., Veronis G. On the Boussinesq approximation for a compressible fluid // Astrophys. J. 1960. Vol. 131. No. 5. Pp. 442-447.
14. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 415 с.
15. Самарский А. А., Гулин А. Н. Численные методы математической физики. М.: Научный мир, 2000. 316 с.
16. Шайдуров В. В. Многосеточные методы конечных элементов. М.: Наука, 1989. 288с.
17. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. М.: Госстрой России, 2001. 42 с.
18. Гува А. Я. Краткий теплофизический справочник. Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. 300 с.
19. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник. М.: Энергия, 1974. 472 с.

**Вячеслав Юрьевич Половников, г. Томск, Россия*

Тел. раб.: (3822) 42-08-33; эл. почта:polov@tpu.ru

Программный комплекс «ГРАСТ» – современный и эффективный ответ на проблемы эксплуатации водяных сетей теплоснабжения

Разработанный специалистами ООО «Компания «ИнБи» комплекс программ обеспечивает реальное решение задач энергосбережения и стабилизации работы тепловых сетей на основе глубокого анализаэксплуатируемых систем, а также применим на этапахих проектирования, реконструкции и наладки.

ПК «ГРАСТ» позволяет:

- проводить расчет гидравлического и теплового режимов тепловых сетей любой сложности с несколькими источниками;
- моделировать расчетный, эксплуатационный и аварийный режимы работы сети;
- проводить анализ работы сети и выявлять нарушения по ряду параметров: завоздушивание трубопроводов, вскипание теплоносителя, недотоп или перетоп помещений и т.д.;
- обеспечивает выдачу рекомендаций по изменению диаметров трубопроводов, режимов работы источников тепла и насосных станций;
- проводить расчет потокораспределения в сети, определение скорости теплоносителя, потерь по длине и в местных сопротивлениях участков;
- определять давление в камерах сети и на абонентских вводах;
- определять температуру теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах;
- определять тепловые потери на участках в зависимости от способа прокладки и температуры наружного воздуха и грунта;
- проводить паспортизацию всех объектов тепловой сети;
- проводить расчет энергетических характеристик (ПСВ, ТП, УРЭ, УРСВ, T_2, Δt) тепловой сети.

ПК «ГРАСТ» доступен для обычного пользователя ПК, не требует специальной поддержки программистов, устанавливаетсяна любом ПК, оснащенном операционной системой Windows (версии 95,98, 2000,NT, XP). Комплекс имеет модульную структуру, что позволяет получить полную картину эксплуатируемой сети – от эскиза трассы до детального описания каждого участка и объекта теплоснабжения с привязкой к реальной геоподоснове. Данный подход к построению комплекса дал возможность не только обеспечить быстроту обучения персонала и высокую производительность работы пользователя, но и позволил эффективно конфигурировать систему.

Основные модули, составляющие ядро базового комплекта «ГРАСТ» – это модуль графического редактора, расчетный модуль, модули графического и табличного представления результатов, а дополнительные прикладные программы в виде модулей анализа, паспортизации объектов теплоснабжения и модуля расчета энергетических характеристик (ПСВ, ТП, УРЭ, УРСВ, T_2, Δt) позволяют наращивать возможности базового комплекта в соответствии с задачами, стоящими перед Заказчиком.

Оценить простоту ввода исходных данных объектов тепловой сети и удобство в работе с ПК «ГРАСТ» Вы можете, скачав демоверсию комплекса с нашего сайта www.in-bi.com и самостоятельно проведя расчет сегмента Вашей сети.

ПК «ГРАСТ» также зарекомендовал себя как обучающая программа и активно используется в учебном процессе в МЭИ и МГСУ. Последние внедрения комплекса при эксплуатации городских тепловых сетей прошли в Барнаульских тепловых сетях и в ОАО «СибИАЦ» СУЭК (г. Кемерово). При поставке комплекса мы применяем гибкую ценовую политику, учитываем специфику и требования своих Заказчиков при внедрении комплекса как для нужд мегаполисов, так и для тепловых сетей в небольших населенных пунктахи на промышленных площадках.

При поставке ПК «ГРАСТ» в высшие средние учебные заведения широко применяется льготное ценообразование. В случае необходимости наши специалисты бесплатно проведут контрольный расчет и анализ сегмента (до 50 участков) Вашей сети любой сложности. Наши цены вполне конкурентноспособны и варьируютсяв зависимости от поставленных пользователем задач. Мы гарантируем оперативную поставку наших программных продуктов, а также обучение специалистов Вашей организациии сопровождение программного комплекса. Наша продукция зарегистрирована Роспатентом как программы для ЭВМ и имеет сертификаты соответствия.

Мы всегда готовы ответить на Ваши вопросы.

Тел.: 8 (499) 245-45-31; e-mail: compinbi@yandex.ru

Complex Analysis of Energy Efficiency of public buildings: case study of VGTU

D.Sc., associated professor V. Motuzienė;
D.Sc., associated professor K. Valančius;
lecturer G. Rynkun*,
Vilnius Gediminas Technical University

Keywords: energy efficiency; public buildings; energy audits; indoor climate; elements thermal characteristics; measurements; economical evaluation

Introduction

Buildings consume approx. 40 % of the whole final energy consumed in the European Union (EU) [1]. Therefore the energy efficiency is at the heart of the EU's 2020 strategy for smart, sustainable and inclusive growth [2]. Energy efficiency is seen as one of the biggest EU's energy resources. Meanwhile, the biggest energy saving potential lies in buildings and high attention should be paid to the existing old buildings, which need to be refurbished [3, 4].

Directive 2010/31/EU (EPBD) [1] requires construction just nearly zero energy buildings starting from 2020, there are also energy efficiency requirements for the refurbished buildings. It should be mentioned that scope of the directive is just energy efficiency. But there exist also other issues related to climatic zones, urbanistic traditions, and economic indicators to be considered in the regions when developing sustainable buildings. International Energy Agency [5] for analysis of the future sustainable buildings proposed a Globally Optimised, Locally Designed (G.O.L.D) principle. Similar approach is also proposed in "Concept of Moscow city "green" construction" [6] and by Dall'O' et al. [7]. It is easier to implement these principles in new built buildings and for the existing inefficient buildings these principles can be partly implemented through energy audit – one of the key elements of the process of refurbishment.

The energy audit is a versatile assessment of the present condition of the building, evaluation of the gained results in terms of the energy efficiency and proposition of economically and ecologically efficient, socially acceptable organizational and technical measures pursuing to reduce energy consumption. Beggs [8] found analogy between building and a complaining patient, and energy auditing is the research work very similar to the research work of the medical doctor. Therefore, the right way to make energy audit is firstly to examine the building, state problems and then to suggest measures to eliminate these problems.

There exists a problem that at the process of energy audit such parameters as internal temperature, air change rate and thermal characteristics of envelopes usually are presumed theoretically based on the auditor's experience or standards. Therefore, incorrect assessment of one parameter impacts other parameters and the overall result. That in consequence may skew the savings expected after the refurbishment. The scientific task of the research presented in this paper was solution of this problem – creating more precise energy auditing methodology.

Researchers of Vilnius Gediminas Technical University (VGTU) have been participating in the EEI project "USE Efficiency" since 2009 [9, 10] and in frames of that project they have significantly contributed to the promotion of the energy audit. The project is oriented towards students, efficient energy use and implementation of energy efficiency measures in university buildings.

Young researchers were encouraged to perform audits of analyzed buildings as more precise and original as possible and thus they were gaining experience in the performance of the audits. Therefore the high attention was paid to the estimation of the real parameters of the building as well as proper selection of measured parameters, points of measurements, methods to be used, duration and time of measurements. These tasks enabled students to go more deeply into the energy audit as well as analyze energy characteristics of the university buildings, identify existing problems and their scale.

For this purpose, the equipment of the newly established VGTU Center of Civil Engineering Sciences was used. The kit consists of the measurement devices used to define real energy consumption, characteristics of the building, user behavior and indoor climate conditions.

Methodology

In the frames of the project, each university, participating in the project USE Efficiency, had to perform two level's audits for its buildings [11]. 1st level audit was performed according to the operational energy consumption of the building. This kind of audit enables to identify the critical buildings. Such identification is an important step, if investor has a limited amount of money and wants to refurbish a building, especially when country has no benchmarks for energy efficiency of buildings. And this is the case of Lithuania.

Total energy consumption of the building is influenced by construction and equipment of the building, building management, building use and building users (see Fig. 1), meanwhile asset rating enables to evaluate just energy consumption related to constructions and equipment. Therefore the most appropriate way to make energy audit of the building is to take into account both operational and asset rating energy consumption and make a balance between them. Thus many unknown values should be found. If possible, the best way to find them is measurement. Construction of the precise balance of the energy consumption enables to make precise evaluation of energy saving measures.

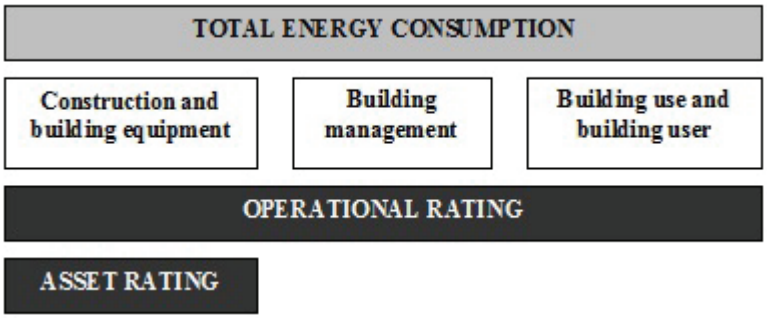


Figure 1. Rating of energy consumption of the building

The 2nd level detailed energy audits of 6 VGTU buildings (Fig. 2) were performed. Methodology of such level of accuracy is usually applied in industrial processes auditing (including mechanical and electrical systems, energy processes, supply systems, etc.) [12]. Such complex energy audits are also recently used in USA for public buildings [13]. The main features of the detailed (complex) energy audit are the next:

1) description of all energy using systems, no matter if energy savings are found or not;
2) it is allowed to ignore some less important areas just after the whole energy balance is found;
3) presentation of all profitable energy saving measures;
4) performance of the detailed calculation of energy savings and investments;
5) performance of the diagnostic evaluation of each energy using system and specification of the energy consumption;
6) description of the alternative energy saving measures, object, energy production and consumption, related schedules and balances.

Some authors [14] claim that energy auditing has to be a systematic continuous process (energy management).

When performing energy audits for the VGTU buildings, following tasks were set and realized:

1) analysis of the current state of the building and collection of the data;
2) measuring of the energy related parameters and data processing;
3) technical analysis of the heating energy consumption and related expenses as well as formation of the energy balance of the energy consumption;
4) recalculation of the actual heating energy consumption according to the heating season of the standard year;
5) selection of the energy saving measures and calculation of the expected savings;
6) evaluation of the economical efficiency of the energy saving measures.

Some authors, instead of performing sufficient number of measurements, supplement their detailed energy audits with occupants' surveys or building energy simulations [15-17]. Tronchin and Fabri [18] concluded that using dynamic energy simulations is preferable for energy audits because of their accuracy.

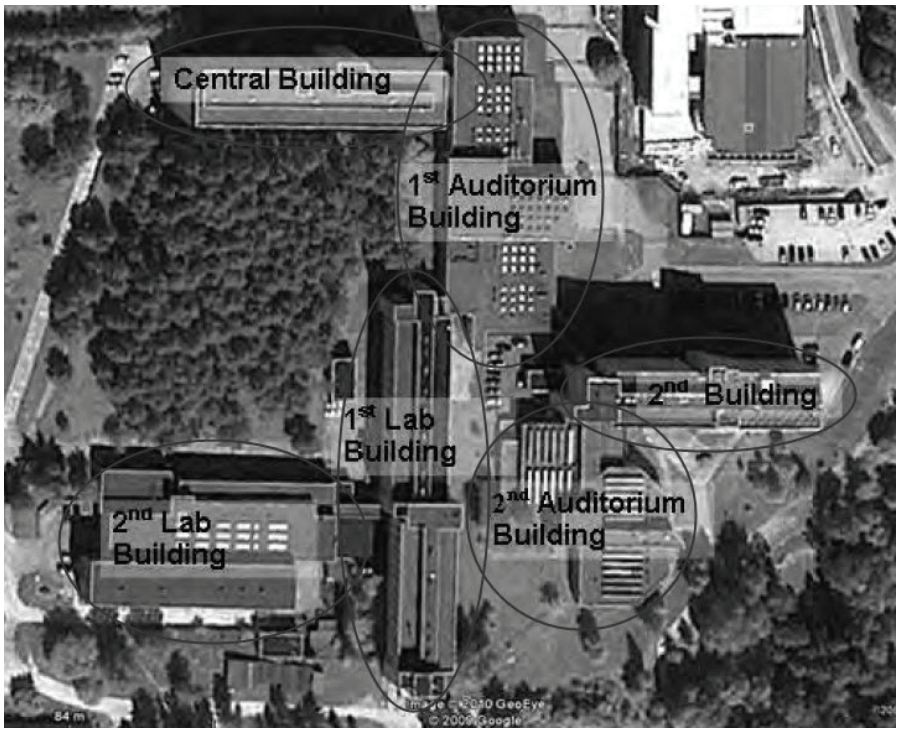


Figure 2. Analysed buildings of VGTU campus

Working in groups and consulting with the supervisor for one semester, young researchers (Master students) proposed simple, but clear sequence of the energy audit performance (Fig. 3). In the data collection phase researchers were collecting information about physical characteristics (dimensions of walls and windows, dimensions of rooms, etc.), structure of the elements (walls, floor, roof, etc.). Also at this stage they performed measurements of thermal characteristics of building's elements (thermal conductivity of walls, windows, the roof and the floor; exploration of the ventilation system, etc.) and indoor conditions (temperature, relative humidity, lighting levels, CO_2 concentrations, air exchange rates).

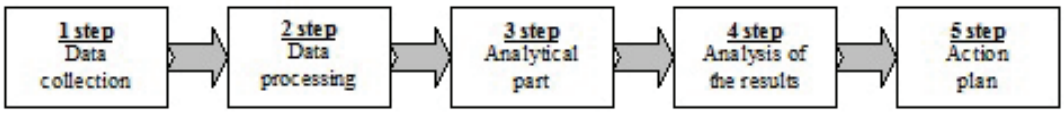


Figure 3. Energy audit chain

Afterwards (step 2) the results of measurements were structured, processed and analysed comparing them with analogical results (for example, with the data of the other room). Main final results gained were: average temperature and humidity for the measured period, actual U-values (heat transmittance), actual air exchange rate and lighting level.

When these characteristics are defined, it is possible to perform calculations (step 3) with the purpose to form the energy balance of the building. The main equation used for this (1):

$$\sum Q_{SV,f} = \left(\sum A_i \cdot U_i + c \cdot \rho \sum V_j \cdot n_j\right)\left(\Theta_{i.f.} - \Theta_{e.f.}\right) \cdot z - \psi_P \left(Q_{P,ext} + Q_{P,\text{int}}\right) - Q_{RES} - \\ - \sum \sum \psi_{R,k} \cdot Q_{NR,k} + \sum Q_{Nf,k} \,. \quad (1)$$

In this equation, variables, which usually are not exactly known and are changed in order to make balance between actual and theoretically defined energy consumption, are: U_i – heat transmittance of elements, W/(m²·K); n_j – air exchange rate, h^{-1}; $\Theta_{i.f.}$ – internal temperature, °C; Ψ_P – heat gains coefficient; Q_{RES} – renewable energy, kWh; $\Psi_{R,k}$ – heat exchanger efficiency. In this case, measurements enabled to have quite precise values of the most of these parameters. That fact made balancing much easier and more precise.

After energy balance is formed, the final results are analysed (step 4) in order to define the problematic parts of the building's systems and to define, where the highest potential for savings after implementing certain energy saving measures is.

Finally (step 5), the action plan with the packages of energy saving measures was proposed. Measures are listed according to their priority – from the highest priority to the lowest. For each proposed package savings are defined as well as technical difficulties of their implementation and changes of the indoor conditions. This phase also includes evaluation of the economical effect of the proposed measures – definition of the simple payback period, discounted pay-back period and saved energy cost.

Measurements

Performed audits were supported by VGTU Centre of Civil Engineering Sciences, which allowed young researches to use newly bought measuring equipment: ALMEMO [19], TinyTag and HOBO data loggers, HOBO meteorological station, Thermacam FLIR B660, thermocouples, CO_2 sensors, blow door, etc.

Before the auditing, each group has got a thermovision picture of the analyzed building (see example in Fig. 4). These pictures gave the possibility to define the problematic places of the building and to choose points for measurements. Totally in all analysed buildings measurements of indoor climate parameters were carried out in 24 premises and thermal characteristics of 18 elements were measured.

The main measured parameters were: internal temperature and relative humidity and heat transmittance of different elements. It is most common to change these parameters when heat balance of the building is formed. Less attention was paid to the measurement of CO_2 concentration; it was used for measurements during lectures. Observing the time, when CO_2 concentration drops down to the initial level, the air exchange rate was calculated and the value was used for further energy consumption calculations.

When performing indoor climate parameters measurements, it was decided to keep data loggers in laboratories, auditoriums and offices for 3–5 days, with the measurement time step – 30 minutes, as a result drawing the graph and defining average dominant value of the measured parameter. When measuring heat transmittance, data loggers were connected according to the scheme showed in Fig. 5.

In this case data were measured and stored by data loggers every 5 minutes. Data of each measurement were analysed graphically, defining the night time interval with the highest measurement reliability and the smallest fluctuations of parameters. During the day, the heat flow is highly influenced by internal heat gains related to occupants and external solar heat gains; therefore, the best period for measurement is night. When having the measured parameters, the actual heat transmittances were calculated.

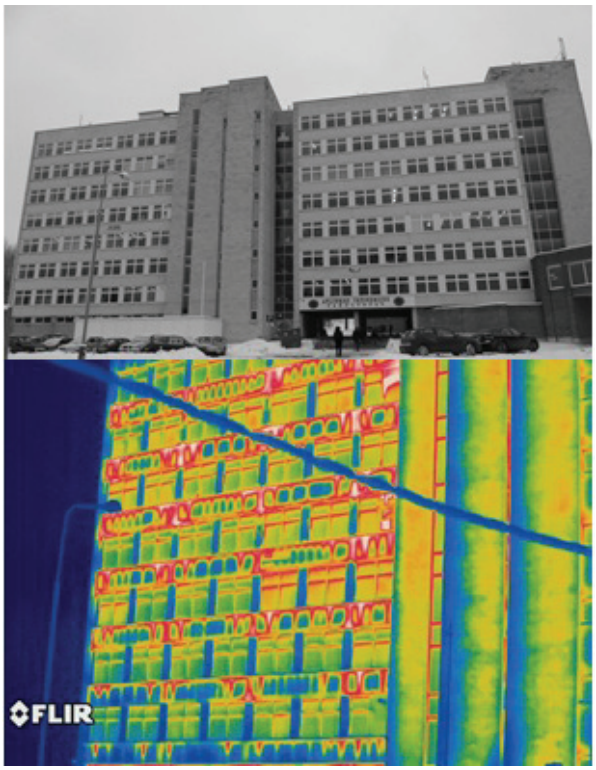


Figure 4. Pictures of 2nd (SRK-II) building

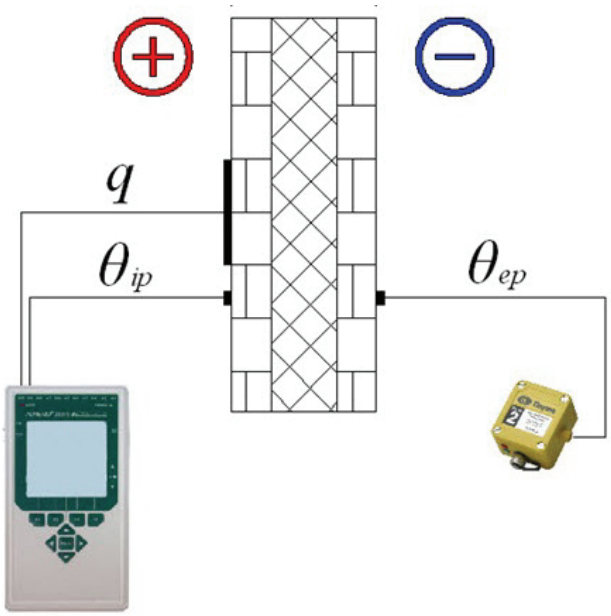


Figure 5. Measurement of heat transmittance

Results

1st level audit enabled to compare buildings according to thermal and electrical energy consumption in one common diagram (see Fig. 6). The comparison was made both per the area unit and volume unit, but since university has many premises with high ceilings – the correct way to compare energy consumption is per volume unit.

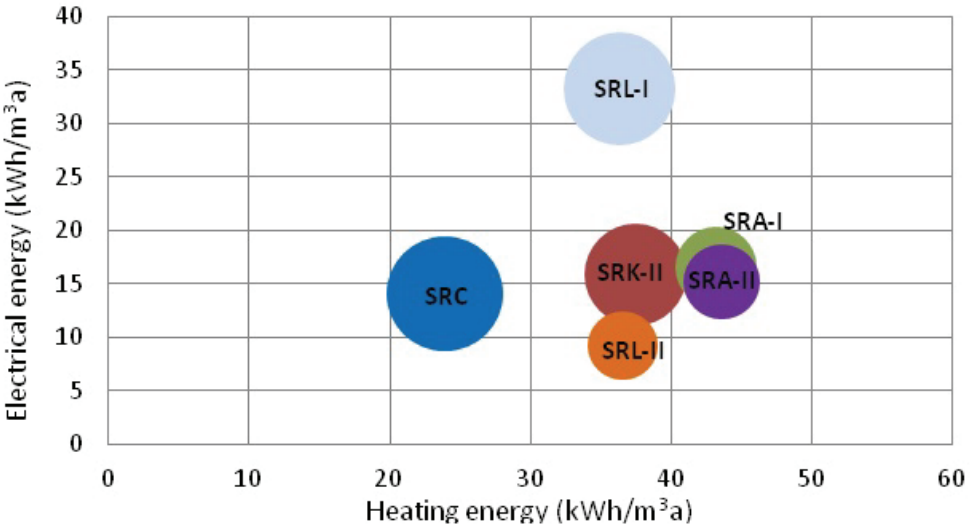


Figure 6. Energy use per volume unit

It can be seen (Fig.6) (size of the circle corresponds to the volume of the building) that SRL-I building has relatively high electrical energy consumption. This can be explained by the fact that in the building dominate laboratories with a lot of electricity using old and ineffective experimental stands and other equipment. Also, a distinguishing building, as can be seen, is – SRK-II. These two buildings mentioned above are the critical ones.

Results of measurements have shown that in all 6 buildings the average internal temperature varies between 14.9 °C and 20.0 °C, meanwhile the relative humidity varies from 25.2 % to 36.3 %. According to the national norm [20], the internal temperature for the heating season must be 20–22 °C and the relative humidity – 40–60 %. Thus, it can be stated that practically in all analysed buildings standard requirements are not satisfied.

CO_2 and blow door tests have shown that, when the difference between external and internal air pressure is 4 Pa (condition of natural ventilation), the air exchange rate is less than 0.2 h^{-1}. Such a small air exchange rate is explained by a non-functioning mechanical ventilation system and new tight plastic frame windows. Fig. 7 shows the measured parameters of one classroom (in the 2nd (SRK-II building)) during the lecture. Classroom was occupied from 10:20 till 11:55. During this period, the lecture was held, therefore CO_2 concentration increased. Before the lecture CO_2 concentration was about 700 ppm, while after the lecture it has increased to 1900 ppm. So in the end of the lecture CO_2 concentration rate exceeded the permissible one 1.9 times.

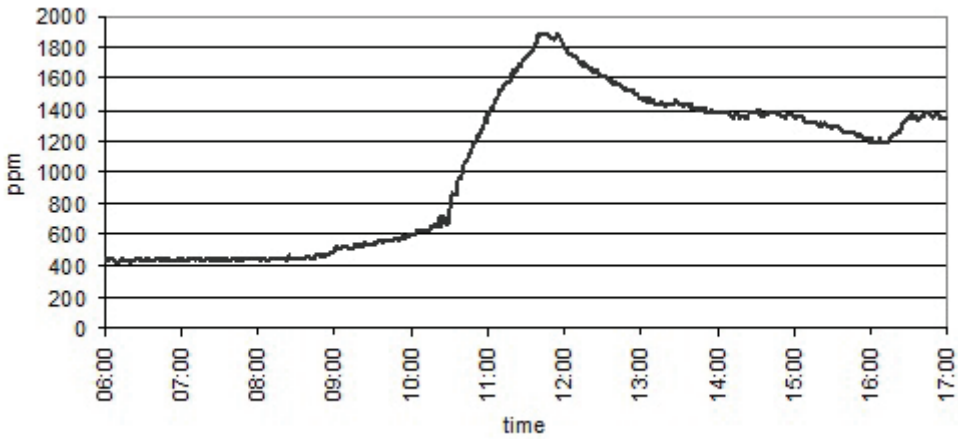


Figure 7. CO_2 concentration measured in the classroom

Other indoor climate characteristic – air exchange rate – can be calculated using CO_2 concentration measurement data. Air exchange rate is calculated using (3.1) equation:

$$n = \frac{(\ln(c_p - c_e) - \ln(c_g - c_e)) \cdot 3600}{t}, \quad (2)$$

where n – air exchange rate, h^{-1}; c_p – measured CO_2 concentration at the beginning, (1803 ppm); c_g – measured CO_2 concentration at the end, (1193 ppm); c_e – outdoor air CO_2 concentration, (400 ppm); t – time of measurement.

According to the national hygienic norm [20], air exchange rateis 0.7 h^{-1}, while the calculated one is 0.14 h^{-1}. So air exchange rate is 5 times smaller than required.

The defined actual U-values correspond to the design values and calculated theoretical values (when design values were unknown) with a deviation of ±10 %. As an example, measurement results of one classroom's U-values are shown in Fig. 8. The two ordinate axes (one with external temperature and the other with calculated U-values) enable to show the dependency of the U-value on the internal and external heat gains. Therefore, three nights with time intervals from 01:00 h to 05:00 h were used for the calculations.

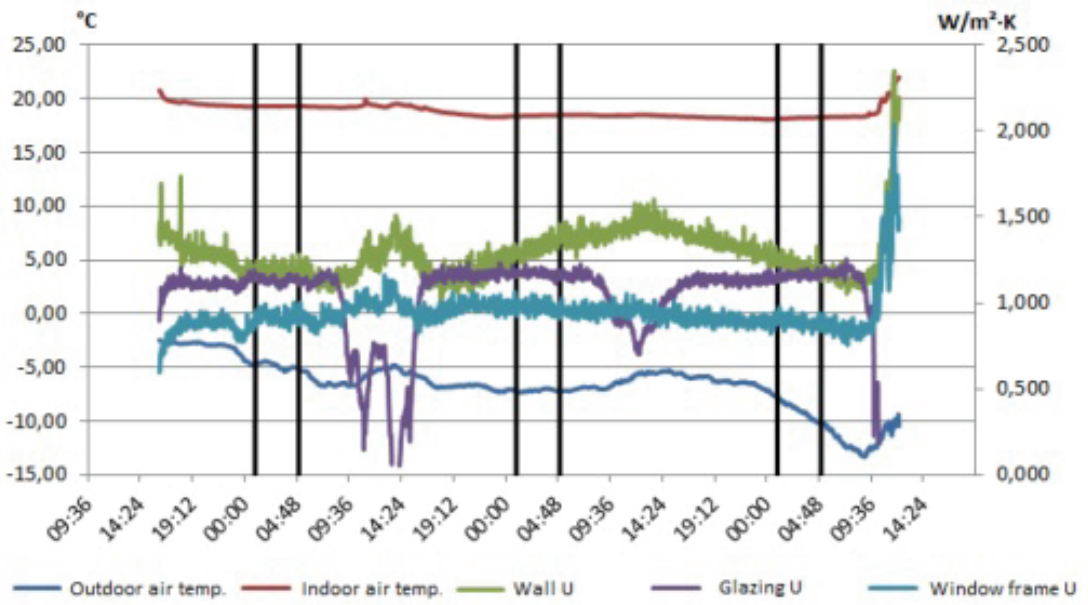


Figure 8. Results of measurements of envelopes thermal characteristics

When having main parameters measured, there were no difficulties to form the heat balance for each building. For example, for 2nd (SRK-II) building the discrepancy between measured (by heat counter) actual heat consumption and calculated was just around 7 % and this value satisfies the requirement of the national auditing methodology [21], which allows difference up to 8 %.

Finally, the groups of researchers proposed packages of energy saving measures. The greatest attention was paid to the reduction of heating energy demand. For all buildings, the same as for the critical 2nd building, the most common proposed energy saving measure was insulation of external envelopes (walls, basement, and roof) to satisfy requirements of current standards. And also all of the groups have considered the possibility of installing effective mechanical ventilation system to increase the comfort.

For the 2nd building, as the most efficient, proposed measures were: insulation of the envelope, renovation of the heating system and combination of both of these measures as complex renovation. Insulation of the envelope gives highest energy savings – up to 53 % and just renovation of the heating system gives quit small savings – 14 %, since its effect is higher just if envelope is also insulated. Therefore the most efficient renovation is when both measures are applied together. Then we have 60 % energy savings (see Fig. 9). To make a final decision, economical evaluation of these measures is needed.

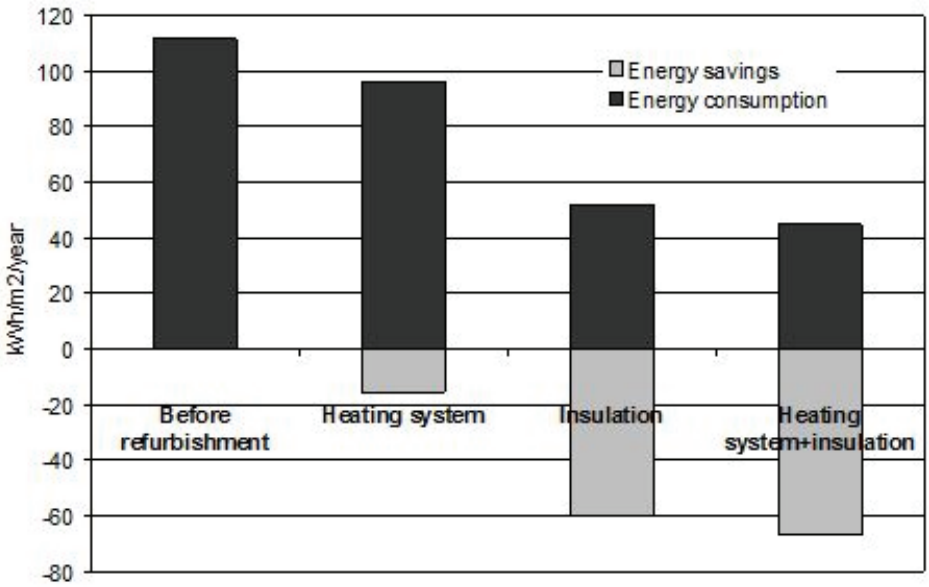


Figure 9. Energy consumption and savings before and after the refurbishment

Economical evaluation of the energy saving measures

The proposed energy saving measurements were assessed according to the following indicators:

- Simple pay-back period (SPB);
- Discounted pay-back period (DPB);
- Saved energy cost (SEC).

Simple pay-back period of separate energy saving measures or their package is a simple indicator of economical efficiency. Simple pay-back period (SPB) gives a number of years in which individual energy efficiency measures or pack of them saved energy funds will cover the initial investment, but this method ignores the time value of money perspective. Meanwhile, discounted pay-back period (DPB) enables to evaluate length of time required to recover the initial cash outflow from the discounted future cash inflows. Discounted pay-back period is calculated:

$$DPB = \frac{-\ln\left(1 - d \times \frac{I_o}{\Delta S}\right)}{\ln(1+d)}, \tag{3}$$

where I_o – investment on the first year of the of the value, €; d – discount rate (-0,0741); ΔS – planned annual savings, €.

Saved energy cost criterion (SEC) can also be used for the assessment of energy efficiency measures cost-effectiveness. This criterion assesses measures life time and the cost of borrowing money. Saved energy cost is calculated:

$$SEC = \frac{I}{Q_S} \times \frac{d}{1-(1+d)^{-n}}, \tag{4}$$

where I – investment, €; Q_s – saved energy per year, MWh; n – life time of the measure, year.

If SEC exceeds current price of energy, then energy saving measure is considered as economically efficient.

Economical indicators for the critical building SRK-II are shown in the table below.

Table 1. Economical indicators for the 2nd building (critical)

	Investment, €	Planned savings, €/year	SPB	DPB	SEC
Thermal envelope insulation	121714	17191	7,1	10,1	3,69
Heating system renovation	102984	8785	11,7	>15	6,11
Complex renovation	169512	28035	6,0	8,2	3,15

As it is seen from the Table 1, insulating just envelopes seems acceptable option, but such pay-back period (10,1 years) is considered by some authors as unattractive (too long) [15, 22]. Renovation of the heating system without renovation of the envelopes without any doubts is unattractive option since it pays back more than after 15 years. Complex renovation requires more investments than just renovation of the heating system or envelope. But such complex renovation enables to save more energy thus making investments more attractive if taking into account discounted payback time which is 8.2 years. Some authors, when selecting energy efficiency measures, are already taking into account climate change [23, 24]. Pay-back of energy saving measures is also dependent not just on location [25], but also on the climate change. Example of the dependency of energy efficiency saving measures discounted pay-back time on climate change in Moscow is shown in [24].

Conclusions

Energy audits of 6 University buildings enabled to define their weak points, operational energy consumption and characteristics of the elements as well as to propose relevant energy saving measures. Used measurement devices enabled to define very detailed parameters related to building elements and indoor climate. That made further calculations much easier and precise. The methodology presented in the paper is also recommended to use in all public buildings.

It was defined that in different buildings average dominant internal temperature is from 14.9 °C to 20.0 °C, and relative humidity – from 25.2 % to 36.3 %. Such values do not satisfy requirements of the hygienic norms. Air exchange rate in buildings is around 0.2 h^{-1}. Such value is not sufficient to ensure indoor comfort. Measured heat transmittance coefficients of envelopes differ from the theoretically calculated values just by ~10 %. But still these heat transmittance coefficients do not satisfy requirements of current regulations.

The analysis of the different energy saving measures and their combination, as well as different payback periods calculations showed that complex renovation requires more investments than just renovation of the heating system or envelope. But such complex renovation enables to save more energy thus making investments more attractive.

References

1. Directive 2010/31/EU (2011) of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union*. 2011. OL 153/13.
2. *Energy Efficiency Plan 2011*. Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels: 2011. [Electronic resource]. URL: http://eur-lex.europa.eu. Date of request: 14.03.2012.
3. Korotkova L. I., Pavlova G. A., Moreva Y. A. *Vestnik MGSU* [Scientific and technical magazine: Bulletin of MGSU]. 2011. No. 7. Pp. 75-79. (rus)
4. Krupnov B. A. *Vestnik MGSU, Moscow* [Scientific and technical magazine: Bulletin of MGSU]. 2011. No. 7. Pp. 85-89. (rus)
5. ESBSC (IEA Energy Conservation in Buildings & Community Systems Programme). *Strategic Plan 2007-2012: Towards Near-Zero Primary Energy Use & Carbon Emissions in Buildings & Communities*. St Albans: Faber Maunsell Ltd, 2008. 17 p.
6. Vasilev G. P. *Energosberezheniye* [Energy saving]. 2011. No. 8. Pp. 26–32. (rus)
7. Dall'O' G., Speccher A., Bruni E. The Green Energy Audit, a new procedure for the sustainable auditing of existing buildings integrated with the LEED protocols. *Sustainable Cities and Society*. 2010. doi:10.1016/j.scs.2012.02.01.

8. Beggs C. *Energy: management, supply and conservation*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 84 p.

9. Valancius K., Mikucionienė R. Energy efficiency in EU universities – results of the 1st level audit. *Science – Future of Lithuania, Environmental Engineering.* 2010. Vol. 5, No. 2. Pp. 115-118.

10. Valancius K., Paulauskaite S., Vaicaitis A. *Vestnik MGSU* [Scientific and technical magazine: Bulletin of MGSU]. 2011. No. 7. Pp. 50-58. (rus)

11. *Universities and students for energy efficiency*. [Electronic resource]. URL: http://www.useefficiency.eu/en/about-use-eff-project/scheduling. Date of request: 14.03.2012.

12. Martinaitis V., Rogoža A., Čiuprinskas K. *Pastatu energijos vartojimo auditas* [Building Energy Audit*:* study book]. *Vilnius: Technika*, 2010. 110 p. (lit).

13. Shapiro I. Energy audit of large public buildings. *Magazine of energy savings.* 2009. No. 4. Pp. 60-67. (rus)

14. Kustova A. A. *Energosberezheniye* [Energysaving]. 2008.No.8. Pp. 40-44. (rus)

15. Alajmi A. Energy audit of an educational building in a hot summer climate. *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 47, No. 47. Pp. 122–130.

16. Rahman M. M., Rasul M. G., Khan M. M. K. Energy conservation measures in an institutional building in sub-tropical climate in Australia. *Applied Energy*. 2010. No. 87. Pp. 2994–3004.

17. Zhu Y. Applying computer-based simulation to energy auditing: a case study. *Energy and Buildings.* 2006. No. 38. Pp. 421–428.

18. Tronchin L., Fabbri K. A Round Robin Test for buildings energy performance in Italy. *Energy and Buildings*. 2010. No. 42. Pp. 1862–1877.

19. *Ahlborn Product Catalog.* Ahlborn Mess, Regelungstechnik GmbH. Germany: 2009.

20. *Hygiene regulation HN 42:2009 Microclimate of dwelling and public buildings.* 2009-12-31. No. 159-7219. (lit)

21. *Requisition of Minister of Economy of the Republic of Lithuania: Methodology of Comprehensive Energy, Energy Sources and Cold Water Consumption Audit Performance in Public Buildings*. Vilnius: 2008, April 29. No. 4-184. (lit)

22. Prokhorov V. I. *Teoreticheskiye osnovy teplogazosnabzheniya ventilyatsii. Tretya mezhdunarodnaya tekhnicheskaya konferentsiya. Sbornik dokladov.* [Theoretical foundations of heat and gas supply and ventilation. The 3rd International scientific and technical forum. Proceedings]. Moscow, 2009. Pp. 30-32. (rus)

23. Short C. A., Cook M., Cropper C. P., Al-Maiyah S. Low energy refurbishment strategies for health buildings. *Journal of Building Performance Simulation.* 2010. Vol. 3,No. 3. Pp. 197-216.

24. Samarin O. D. *Teoreticheskiye osnovy teplogazosnabzheniya ventilyatsii. Tretya mezhdunarodnaya tekhnicheskaya konferentsiya. Sbornik dokladov.* [Theoretical foundations of heat and gas supply and ventilation. The 3rd International scientific and technical forum. Proceedings]. Moscow, 2009. Pp. 51-54. (rus).

25. Samarin O. D., Zaicev N. N. *Teoreticheskiye osnovy teplogazosnabzheniya ventilyatsii. Tretya mezhdunarodnaya tekhnicheskaya konferentsiya. Sbornik dokladov.* [Theoretical foundations of heat and gas supply and ventilation. The 3rd International scientific and technical forum. Proceedings]. Moscow, 2009. Pp. 54-58. (rus).

** Genrika Rynkun, Vilnius, Lithuania*

Phone number: +3(705)274-47-18; e-mail: pastatu.energetika@vgtu.lt

Тестирование метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на результатах натурных измерений параметров микроклимата помещений

К.т.н., доцент С.В. Корниенко*,
ФГБОУ ВПО Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

Ключевые слова: температурно-влажностный режим ограждающих конструкций; параметры микроклимата помещений; компьютерная программа

Проблема снижения энергозатрат и повышения энергоэффективности зданий тесно связана с необходимостью исследования процессов тепломассообмена, прогноза температурно-влажностного режима ограждающих конструкций и повышения надежности теплотехнических расчетов. Большой вклад в решение этой проблемы внесли В.Н. Богословский [1], А.В. Лыков [2], А.У. Франчук [3], С.В. Александровский [4], К.Ф. Фокин [5], В.М. Ильинский [6], В.И. Лукьянов [7], В.Г. Гагарин [8], А.И. Ананьев [9], А.Г. Перехоженцев [10], О. Кришер [11]. Следует также отметить работы [12–16].

Автором разработан метод расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций зданий [17–21] на основе физико-математической модели совместного нестационарного тепловлагопереноса, описываемой системой дифференциальных уравнений в частных производных и краевыми условиями. Указанная модель основана на теории потенциала влажности В.Н. Богословского [1] с применением шкалы абсолютного потенциала влажности, разработанной автором. Использование шкалы абсолютного потенциала влажности [17, 20] позволяет существенно упростить модель тепловлагопереноса. Разработанная физико-математическая модель реализована в компьютерной программе [19], которая позволяет производить расчет трехмерных нестационарных температурных и влажностных полей в краевых зонах ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности и температуры при сложных граничных условиях. Указанный метод позволяет учесть влияние краевых зон на теплозащитные свойства ограждений.

В данной статье приведены результаты натурных измерений параметров микроклимата помещений, которые использованы для тестирования (верификации) метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций [17–21].

Объектом натурного обследования является 3-комнатная квартира, расположенная на 4-м этаже 5-этажного жилого дома в г. Волжском Волгоградской области. Площадь жилых помещений принята по проекту: 1 – 9,2 м^2; 2 – 15,6 м^2; 3 – 13,4 м^2. Конструктивная система здания объемно-блочная, с применением объемных блоков типа «колпак». Стены объемных блоков выполнены из тяжелого бетона плотностью 1800 кг/м^3 толщиной 70 мм с навесными панелями наружных стен из керамзитобетона плотностью 900 кг/м^3 толщиной 210 мм, с эффективным утеплителем и наружной облицовкой из металлосайдинга. Заполнение проемов наружных стен выполнено оконными блоками из однокамерных стеклопакетов в ПВХ профилях. Система отопления централизованная однотрубная, с нижней разводкой подающей и обратной магистралей. В качестве отопительных приборов использованы чугунные радиаторы типа МС–140×108 с ручным регулированием расхода теплоносителя. Система вентиляции приточно-вытяжная канальная, с естественным регулируемым притоком воздуха через вентиляционные клапаны в наружных стенах и удалением воздуха через вытяжные каналы. Проектные параметры систем отопления и вентиляции обеспечивают выполнение санитарно-эпидемиологических требований согласно СП 54.13330.2011 (п. 9) в указанной квартире.

Натурные измерения параметров микроклимата жилых помещений проведены в холодный период года с 10.12.2011 по 17.12.2011 в дневное время суток при пасмурной погоде. Продолжительность натурного обследования соответствует требованию ГОСТ 26254–84 по тепловой инерции наружных стен здания. Параметры наружного климата приняты усредненными за время измерений по данным ближайшей метеостанции:

- температура воздуха – минус 4,7°С;
- относительная влажность воздуха – 96 %;
- скорость ветра – 4 м/с;
- облачность – 9 баллов.

Натурные измерения параметров микроклимата помещений выполнены методом неразрушающего контроля с применением современных цифровых измерительных приборов. Температура и относительная влажность воздуха измерены цифровым термогигрометром «Testo 610» с погрешностью: по температуре ±0,5 °С, по относительной влажности ±2,5 %. Температура внутренней поверхности ограждающих конструкций и отопительных приборов измерена цифровым поверхностным термометром «Testo 905–Т2» с погрешностью ±1,0 °С. Для измерения скорости движения воздуха использован цифровой термоанемометр «Testo 405» с погрешностью ±(0,1 м/с + 5 % от измеренного значения). Влагосодержание внутреннего поверхностного слоя наружных стен измерено диэлькометрическим методом по ГОСТ 21718–84 электронным измерителем влажности «Влагомер МГ 4Б» с погрешностью ±0,8 % (в диапазоне 1…10 %). Все измерения выполнены при закрытых окнах и вентиляционных клапанах наружных стен приборами, прошедшими регистрацию и имеющими сертификат.

Измерения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха выполнены в центре жилых помещений, на высоте 1,1…1,5 м от пола. Результирующая температура определена по температуре воздуха в помещении и радиационной температуре согласно ГОСТ 30494–96. Площадь внутренней поверхности ограждающих конструкций и отопительных приборов определена по проекту. Температура поверхностей измерялась в соответствии со схемой, представленной на рис. 1:

- на внутренней поверхности наружной стены – в центре участков, образованных линиями, продолжающими грани откосов светопроема (точки 1–8), и в зоне сопряжений наружной стены с внутренними стенами (точки 9–14);
- в центре остекления (точка 15);
- в центре отопительного прибора (точка 16);
- в центре внутренних стен и перегородок (точки 17–19);
- в центре пола (точка 20) и потолка (точка 21).

Влагосодержание внутреннего поверхностного слоя наружной стены измерялось в соответствии со схемой рис. 1 в точках 1–8.

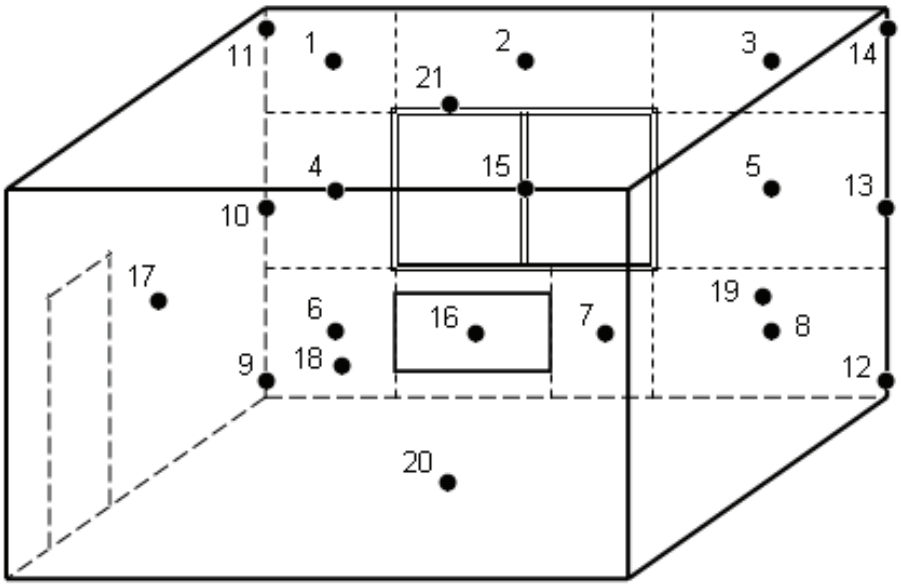


Рисунок 1. Схема замеров температуры и влагосодержания (стояки отопления условно не показаны)

Результаты измерений указанных параметров приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерений температуры и влагосодержания

Ограждающая конструкция, отопительный прибор	Номер точки	Площадь A_i, м^2, температура t_i, °С, внутренней поверхности ограждений и отопительных приборов и влагосодержание w_i, % М, внутреннего поверхностного слоя наружной стены для жилых помещений								
		1			2			3		
		A_i	t_i	w_i	A_i	t_i	w_i	A_i	t_i	w_i
Наружная стена	1	0,185	22,5	1,3	0,135	21,4	1,6	0,2	23,9	1
	2	0,313	21	1,8	0,438	21,4	1,9	0,313	21,2	1,6
	3	0,275	20,6	1,8	0,2	22,4	1,4	0,26	21	2
	4	1,07	22,5	1,4	0,783	21,9	1,4	1,16	23,8	1,2
	5	1,6	21,2	1,4	1,16	23,2	1,3	1,51	22,1	1,3
	6	0,555	21,4	1,6	0,405	21	1,5	0,6	24,1	1,6
	7	0,638	21,8	1,4	1,01	21,6	1,2	0,638	22,4	1,2
	8	0,825	21,1	1,6	0,6	23,7	1,2	0,78	21,8	1,3
	9		20,8			20,3			21,4	
	10		22,1			21,4			23,5	
	11		22,2			21			23,2	
	12		17,9			20,8			19,1	
	13		20			22,6			21,7	
	14		19,8			21,6			19,9	
Окно	15	1,81	16,5		2,54	16,9		1,81	15,7	
Отопительный прибор	16	0,3	41,5		0,3	42,3		0,3	44,5	
Внутренняя стена	17	7,3	23		12,3	24,2		10,6	24,6	
	18	7,57	24		7,57	24,1		7,57	24,5	
	19	7,3	24		12,3	24		10,6	24,8	
Пол	20	9,2	23,8		15,6	24,5		13,4	24,3	
Потолок	21	9,2	23,9		15,6	24,5		13,4	23,7	

Анализ полученных результатов измерений (табл. 1) показывает, что по мере приближения к краевым зонам температура на внутренней поверхности наружных стен снижается по сравнению с гладью ограждений. Минимальная температура на внутренней поверхности стены наблюдается в краевых зонах сопряжений наружной стены с внутренними стенами и междуэтажными перекрытиями: в помещении 1 – 17,9 °С (точка 12); в помещении 2 – 20,3 °С (точка 9); в помещении 3 – 19,1 °С (точка 12). В зоне размещения отопительных приборов и стояков отопления температура повышается по сравнению с гладью стены. Максимальная температура на внутренней поверхности стены отмечается в зоне размещения стояков отопления: в помещении 1 – 22,5 °С (точки 1, 4); в помещении 2 – 23,7 °С (точка 8); в помещении 3 – 24,1 °С (точка 6). Температура на внутренней поверхности остекления меняется от 15,7 °С (в помещении 3) до 16,9 °С (в помещении 2). Температура на внутренней поверхности отопительного прибора меняется от 41,5 °С (в помещении 1) до 44,5 °С (в помещении 3). Температура на поверхности внутренних стен, пола и потолка близка к температуре воздуха в помещениях.

Минимальное влагосодержание внутреннего поверхностного слоя наружной стены наблюдается в зоне прохождения стояков отопления: в помещении 1 – 1,3 % (точка 1); в помещении 2 – 1,2 % (точки 7, 8); в помещении 3 – 1 % (точка 1), что полностью согласуется с физикой процесса совместного тепловлагопереноса. Максимальное влагосодержание отмечается в краевой зоне сопряжения наружной стены с междуэтажным перекрытием (рис. 1). Среднее влагосодержание внутреннего поверхностного слоя наружных стен соответствует условиям эксплуатации, принятым в проектной документации.

Результаты сравнения измеренных (фактических) и нормируемых параметров микроклимата жилых помещений приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение измеренных и нормируемых параметров микроклимата жилых помещений

Параметр	Фактические значения параметра для жилого помещения			Нормируемые значения параметра
	1	2	3	
1. Температура воздуха, °С	23,7	24,7	24,9	20…22 (18…24)
2. Результирующая температура, °С	23,5	24,3	24,5	19…20 (17…23)
3. Относительная влажность, %	45,8	43,6	39,8	30…45 (не более 60)
4. Скорость движения воздуха, м/с	0,01	0,03	0,04	не более 0,15 (не более 0,2)
5. Приведенный температурный перепад, °С, между температурами внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружной стены	3,46	3,74	3,44	не более 4,0
6. Приведенная минимальная температура наружной стены в краевой зоне, °С	10,8	13,3	11,2	не ниже 9,28
7. Приведенная температура внутренней поверхности окна (в зоне остекления), °С	8,55	8,06	6,01	не ниже 3,0

Примечания

1. Параметры 5–7 приведены к расчетным условиям согласно ГОСТ 26254–84.
2. Значения параметров 1–4, приведенные в скобках, соответствуют допустимым нормам микроклимата.
3. Нормируемое значение параметра 6 соответствует температуре точки росы внутреннего воздуха при температуре 20°С и относительной влажности 50 % для жилых зданий (СП 54.13330.2011).

Из табл. 2 видно, что параметры микроклимата в жилых комнатах отвечают оптимальным нормам по скорости движения воздуха, а также оптимальным (помещения 2, 3) и допустимым (помещение 1) нормам по относительной влажности воздуха. Вместе с тем следует отметить, что в ряде жилых комнат температура воздуха и результирующая температура выше допустимых значений, что указывает на перегрев. Обеспечение в жилых помещениях температуры воздуха в пределах оптимальных параметров может быть достигнуто за счет регулирования расхода теплоносителя в системе отопления, а также с помощью имеющихся в квартире автономных стеновых воздушных клапанов с регулируемым открыванием. Наружные ограждающие конструкции жилых комнат отвечают требованиям тепловой защиты согласно СНиП 23–02–2003 в части санитарно-гигиенического показателя. Таким образом, в процессе эксплуатации указанной квартиры обеспечены безопасные условия для проживания в соответствии с Федеральным законом № 384–ФЗ.

Используем полученные результаты натурных измерений для тестирования метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций [17–21].

Выполним расчет температурно-влажностного режима фрагмента теплозащитной оболочки здания – узла сопряжения наружной стены с внутренней (рис. 2). Расчет выполнен по компьютерной программе [19] при фактических параметрах микроклимата помещений и наружного климата. Теплофизические характеристики материалов ограждающих конструкций рассчитаны по методике [20] на основе данных проектной документации. Граничные условия тепловлагообмена поверхностей ограждающих конструкций с окружающей средой приняты в соответствии с [20]. Начальные условия соответствуют моменту ввода конструкции в эксплуатацию.

Результаты расчета температурно-влажностного режима рассматриваемого фрагмента теплозащитной оболочки здания приведены на рис. 3 в виде графиков распределения температуры (рис. 3, а) и влагосодержания (рис. 3, б) по внутренней поверхности краевой зоны, полученных путем обработки данных интерполяцией кубическими сплайнами [22] (сплошные линии). На том же рисунке маркерами показаны результаты натурных измерений. Координатная ось направлена от стыка наружной стены с внутренней к глади наружной стены вдоль внутренней поверхности конструкции. Согласно расчету минимальная температура (18,8 °С) отмечается на стыке ограждений (рис. 3, а). По мере удаления от стыка температура повышается, достигая 23,5 °С по глади наружной стены. Максимальное влагосодержание (1,9 %) отмечается также на стыке ограждений (рис. 3, б). По мере удаления от стыка влагосодержание уменьшается до 1,2 % по глади наружной стены.

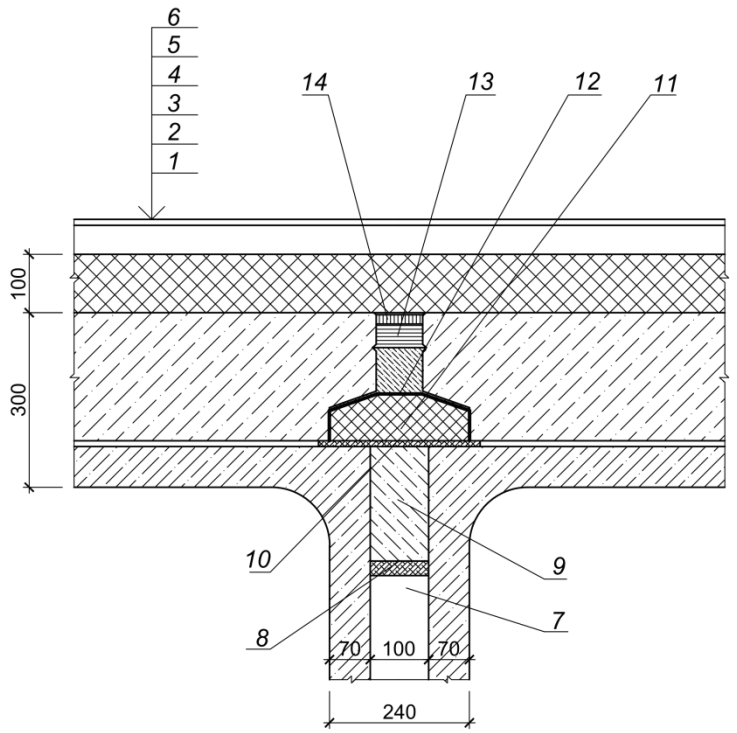


Рисунок 2. Схема проектного решения узла сопряжения наружной стены с внутренней (крепление облицовки фасада условно не показано):
1 – наружная облицовка;
2 – вентилируемая воздушная прослойка;
3 – эффективный утеплитель;
4 – навесная панель из керамзитобетона;
5 – цементно-песчаный раствор;
6 – железобетонная конструкция объемного блока;
7 – замкнутая воздушная прослойка;
8 – деревянная рейка;
9 – бетонная шпонка;
10 – герметизирующая прокладка;
11 – теплоизоляционный вкладыш;
12 – воздухозащитная лента;
13 – заделка устья стыка бетоном;
14 – защитное покрытие стыка

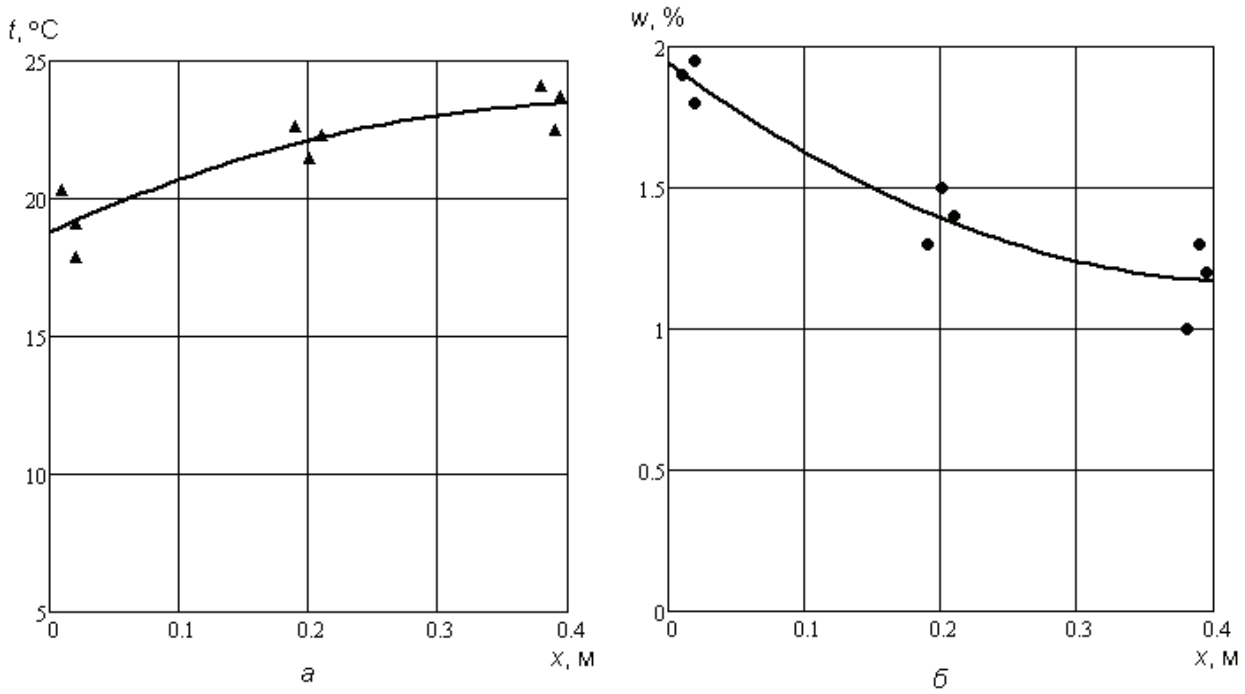


Рисунок 3. Графики распределения температуры (а) и влагосодержания (б) по внутренней поверхности узла сопряжения наружной стены с внутренней

Сравнение результатов расчета, полученных в компьютерной программе [19], с данными натурных измерений показывает их хорошее согласование. Максимальная относительная ошибка функций температуры $t(x)$ и влагосодержания $w(x)$ на данных узлах составляет соответственно 6,9 и 15 %.

Проведенное тестирование разработанного метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на результатах натурных измерений параметров микроклимата помещений подтверждает его достоверность, что позволяет использовать указанный метод в проектной практике.

Литература

1. Богословский В. Н. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979. 248 с.
2. Лыков А. В. Теоретические основы строительной теплофизики. Минск: Издательство АН БССР, 1961. 520 с.
3. Франчук А. У. Вопросы теории и расчета влажности ограждающих частей зданий. М.: Госстройиздат, 1957. 188 с.
4. Александровский С. В. Долговечность наружных ограждающих конструкций. М.: НИИСФ РААСН, 2003. 332 с.
5. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / Под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. 5-е изд., пересмотр. М.: АВОК–ПРЕСС, 2006. 256 с.
6. Ильинский В. М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий). М.: Высшая школа, 1974. 320 с.
7. Лукьянов В. И. Нестационарный массоперенос в строительных материалах при решении проблемы повышения защитных качеств ограждающих конструкций зданий с влажным и мокрым режимом: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.23.01. М.: 1993. 48 с.
8. Гагарин В. Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.23.01, 05.23.03. М.: НИИСФ РААСН, 2000. 48 с.
9. Ананьев А. И. Научно-технические основы повышения теплозащитных качеств и долговечности наружных ограждающих конструкций зданий из штучных материалов: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.23.01, 05.23.03. М.: НИИСФ РААСН, 1998. 40 с.
10. Перехоженцев А. Г. Теоретические основы и методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий. Научное издание. Волгоград: ВолгГАСУ, 2008. 212 с.
11. Кришер О. Научные основы техники сушки. М.: Издательство иностранной литературы, 1961. 540 с.
12. Горшков А. С., Ватин Н. И., Глумов А. В. Влияние физико-технических и геометрических характеристик штукатурных покрытий на влажностный режим однородных стен из газобетонных блоков // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 1 (19). С. 28–33.
13. Гринфельд Г. И., Морозов С. А., Согомонян И. А., Зырянов П. С. Влажностное состояние современных конструкций из автоклавного газобетона в условиях эксплуатации // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 2 (20). С. 33–38.
14. Rode C., Burch D. M. Empirical validation of a transient computer model for combined heat and moisture transfer // Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Building VI, December 4–8. Clearwater Beach, FL: 1995. Pp. 283–295.
15. Künzel H. M., Kießl K. Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components // International Journal of heat and mass transfer. 1997. No. 1. Pp. 159–167.
16. Künzel H. M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Stuttgart: IRBVerl., 1995. 65 p.
17. Корниенко С. В. Потенциал влажности для определения влажностного состояния материалов наружных ограждений в неизотермических условиях // Строительные материалы. 2006. № 4. С. 88–89.
18. Корниенко С. В. Решение трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса для ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. 2007. № 10. С. 54–55.
19. Корниенко С. В. Совместный влаготеплоперенос (СОВТ) / Свидетельство № 2011611175 о государственной регистрации программы для ЭВМ. М.: ФИПС, 2011.
20. Корниенко С. В. Методы инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций на основе теории потенциала влажности. Научное издание. Волгоград: ВолгГАСУ, 2011. 100 с.
21. Корниенко С. В. Оценка влияния краевых зон ограждающих конструкций на теплозащиту и энергоэффективность зданий // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 8 (26). С. 5–12.
22. Гурский Д. А. Вычисления в MathCAD. Минск: Новое знание, 2003. 814 с.

**Сергей Валерьевич Корниенко, Волгоград, Россия*

Тел. раб.: +7(8442)96-98-16; эл. почта: svkorn2009@yandex.ru

Фильтрация воздуха через ограждающие конструкции

Аспирант Д.В. Петросова*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: воздухопроницаемость; фильтрация воздуха; ограждающие конструкции; скорость фильтрации; поперечная фильтрация; фильтрационный перенос тепла

В настоящее время происходит интенсивная смена строительных конструкций, поиск новых возможностей для повышения энергоэффективности зданий. Широкое применение получили ограждающие конструкции с использованием эффективных утеплителей с низкими коэффициентами теплопроводности, в том числе легкие ограждающие конструкции [1], позволяющие повысить тепловую защиту зданий. Новые ограждающие конструкции требуют всестороннего исследования, поскольку считавшиеся ранее малозначительными особенности конструкций часто начинают оказывать существенное влияние на их эксплуатационные свойства.

Несущим элементом такой ограждающей конструкции является легкий тонкостенный профиль, заполнение выполнено с применением эффективного утеплителя с невысокой плотностью. Снижение плотности утеплителя сопровождается повышением воздухопроницаемости. Для уменьшения воздухопроницаемости в конструкции используются ветрозащитные пленки. Однако влияние фильтрации воздуха на теплозащитные свойства таких конструкций ранее не рассматривалось.

Исследования, посвященные данному вопросу применительно к различным ограждающим конструкциям в нашей стране производились с конца XIX века. Основоположниками в данной области были гигиенисты в лаборатории Эрисмана. В основу научной разработки вопросов фильтрации воздуха был положен закон сопротивления при фильтрации жидкости, закон Дарси.

В 30-е годы изучением воздухопроницаемости строительных материалов и ограждающих конструкций занимались П.Я. Брянцев, Б.Ф. Васильев, С.И, Ветошкин, Д. Галанин, С.И. Идашкин, М.И. Субботкин, П.С. Философов. За рубежом данную тему в то же время в своих работах затронул E. Raisch [2]. Исследования различных аспектов воздухопроницаемости и фильтрации были выполнены Р. Е. Брилингом [3]. В частности, он экспериментально определил воздухопроницаемость большинства строительных материалов и конструкций стен, применявшихся в то время. Математическая модель одномерного теплопереноса в конструкции при поперечной фильтрации воздуха была предложена Ф. В. Ушковым [4]. Им же был разработан метод расчета распределения температуры по толщине конструкции при поперечной фильтрации воздуха.

Вопросы воздухопроницаемости и фильтрации воздуха исследовались также в работах В.П. Титова [5], Ю.А. Калядина [6,7], В.С. Беляева [8], М.Д. Артемова [9], Е.В. Веселовацкой [10], А.Д. Кривошеина [11]. Исследования влияния продольной фильтрациивоздуха в ограждающих конструкциях на теплозащитные свойства проведены В.В. Гагариным, В.В. Козловым, А.В. Садчиковым[12,13]. В работе А.В. Садчикова была разработана методика учета влияния продольной фильтрации воздуха в утеплителе на теплозащитные свойства стен с навесными вентилируемыми фасадами [14].В работе Петриченко М. Р., Петроченко М. В.[15] рассмотрена гидравлика свободноконвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором. Солощенко С.С.[16] исследовал влияние вентилируемого зазора на теплофизические характеристики систем наружного утепления фасадов зданий с применением тонкослойной штукатурки, но влияние воздухопроницаемости на конструкции остается не изученным.

Авторами работ по исследованию воздухопроницаемости оболочки зданий за рубежом являются Iain S. Walker, David J. Wilson, Max H. Sherman [17], Silberstein A., Hens H. [18], Mei H. T. [19] и др.

При использовании воздухопроницаемых ограждающих конструкций тепловой поток выносится, в том числе, и за счет фильтрации воздуха. Предлагается учитывать конвективный механизм переноса теплоты, соизмеримый с кондуктивным механизмом переноса теплоты.

Уравнение переноса теплоты имеет вид:

$$a\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \kappa\frac{\partial H}{\partial x}\frac{\partial T}{\partial x}, \qquad (1)$$

где $a = \dfrac{\lambda}{\rho c_p}$ – коэффициент температуропроводности, м^2/с;

k – коэффициент фильтрации, м/с.

Воздухообмен осуществляется только за счет воздухопроницаемости ограждений,а теплопередача – за счет теплопроводности и конвекции. Воздух двигается по порам и капиллярам медленно (числа Рейнольдса много меньше 1), тогда средняя скорость воздуха сквозь ограждение будет вычисляться по формуле Дюпюи:

$$v = k \cdot I\,, \tag{2}$$

где I – градиент напора;
v – скорость фильтрации, м/с.

Средняя скорость воздушного потока на фронте ограждающей конструкции определяется следующим образом:

$$v = \frac{Q}{A}\,, \tag{3}$$

где Q – расход воздуха в помещение (проходящий через стены, пол и потолок), м^3/час;
A – площадь стен, пола и потолка, м^2.

Расход воздуха на воздухообмен не известен, но известен перепад давления, создаваемый вентилятором.

Перепад давления в гидравлике оценивается следующим образом:

$$\Delta p = \rho \frac{v^2}{2} \zeta\,, \tag{4}$$

где Δp – перепад давления внутри и снаружи помещения, Па;
ζ – эффективный коэффициент сопротивления ограждения.

Эффективный коэффициент сопротивления зависит от числа Рейнольдса слоя. Эффективный коэффициент сопротивления либо известен, либо зависит от коэффициента фильтрации $\zeta = \zeta(I)$:

$$\zeta = \frac{(g\delta)^2}{\kappa^2} \frac{2\rho}{\Delta P}\,. \tag{5}$$

Для определения коэффициента фильтрации k и эффективного коэффициента сопротивления ограждения ζ необходимо знать значение расхода воздуха, проходящего через конструкцию, определить перепад давления нанаружной и внутренней поверхностях и установить связь между перепадом давления и расходом воздуха.

Цель экспериментального исследования, описанного далее, – определение коэффициента фильтрации через ограждающую конструкцию.

Описание эксперимента

Объектом натурных исследований являлся коттедж в Ленинградской области поселка Коробицино, построенный строительной организацией ООО «Авекс Плюс». Здание коттеджа двухэтажное с чердаком (рис. 1).

Для испытаний были выбраны два помещения на первом и втором этажах. На первом этаже рассматривалось помещение бытового назначения, расположенное в осях D-E и 1-2, на втором этаже – жилая комната в осях A-B и 2-3. Помещения, в которых проводились испытания ограждающих конструкций на воздухопроницаемость, выделены цветом на планах этажей (рис. 2, 3).

Рисунок 1. Коттедж, Ленинградская область, поселок Коробицино

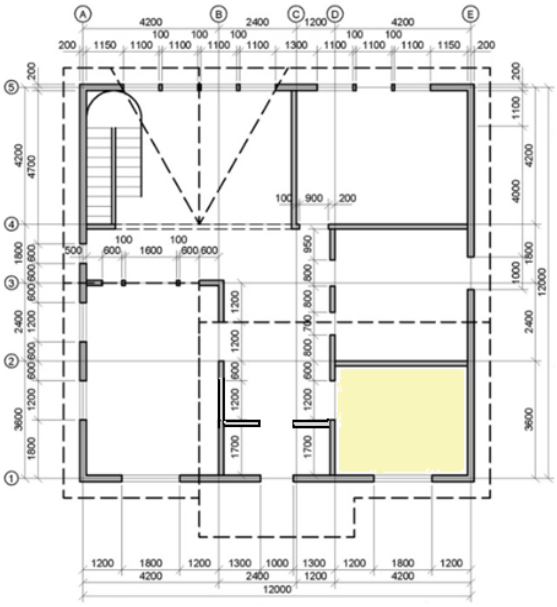


Рисунок 2.План первого этажа

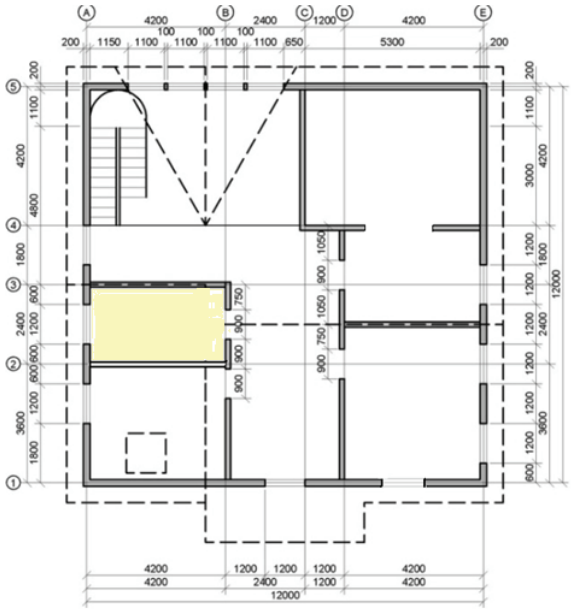


Рисунок 3. План второго этажа

Геометрические характеристики помещений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические характеристи кипомещений

№ п/п	Наименование помещения	Площадь помещения, м^2	Объем помещения, м^3	Площадь наружных ограждений, м^2
1	Помещение первого этажа	12,60	34,02	21,6
2	Помещение второго этажа	10,08	29,16	7,2

Толщина ограждающей конструкции $\delta_2 = 300$ мм (рис. 4). Проектное сопротивление теплопередаче наружных стен коттеджа $R_0 = 4{,}6$ (м^2°С)/Вт. Несущим элементом ограждающей конструкции является легкий тонкостенный профиль с просечками, выполненными в шахматном порядке, – так называемый термопрофиль 1. К нему саморезами крепится горизонтальная обрешетка 3. С наружной стороны к обрешетке 3 таким же образом крепится вертикальная обрешетка 4, к которой, в свою очередь, крепится вагонка 5. Внутри термопрофилей укладывается утеплитель 2. Термопрофили расположены с шагом 600 мм. Толщина утеплителя составляет $\delta_1 = 200$ мм. В качестве утеплителя применен плитный карбамидный пенопласт с теплопроводностью $\lambda = 0{,}045$ Вт/(м °С). Высота стенки термопрофиля коттеджа $\delta_1 = 200$ мм обусловлена конструктивными расчетами. Высота термопрофиля совпадает с толщиной утеплителя. С внутренней стороны к обрешетке 3 саморезами крепятся стекломагнезит и гипсокартонные листы 6.

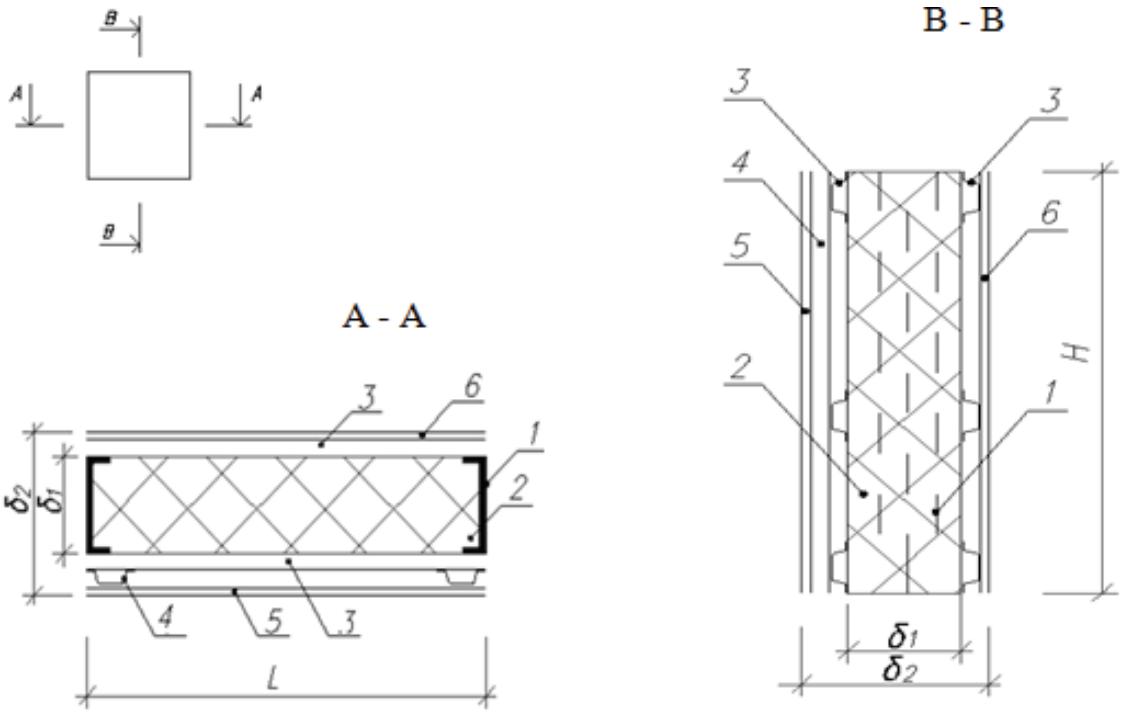


Рисунок 4. Ограждающая конструкция:
1 – термопрофиль; 2 – утеплитель (150 мм); 3 – горизонтальная обрешетка;
4 – вертикальная обрешетка;5 – вагонка; 6 – два листа ГКЛ (2х12,5 мм);
L –длина, мм; Н – высота, мм; δ_1 – толщина утеплителя, мм; δ_2 – толщина конструкции, мм.

Заполнение оконных проемов выполнено однокамерными стеклопакетами. В здании предусмотрена естественная вентиляция. Система отопления горизонтальная двухтрубная, от отопительного котла. Полы коттеджа утепленные.

Испытания проведены в натурных условиях в соответствии с ГОСТ 31167-2003 «Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натурных условиях». Для выполнения работ по определению воздухопроницаемости ограждающих конструкций здания и объемов фильтрации использованы следующие контрольно-измерительные приборы и оборудование: испытательный стенд для определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций зданий «MinneapolisBlowerDoor», термогигрометр CENTER 314, анемометр Meterman TMA10, рулетка измерительная металлическая STAYER, персональный компьютер RoverBookNautiluus E400 WH. Испытания проведены 30 ноября 2010 г. В указанный период температура воздуха в помещениях коттеджа составляла 24°С, температура наружного воздуха составляла минус 7°С, скорость ветра – 1,5 м/с. На период испытаний в помещении были герметизированы вытяжные каналы вентиляции и технологические отверстия в стенах и перекрытиях. С помощью тепловизора ThermaCAM P60 зав. № 23400825 была проведена тепловизионная съемка, которая позволила установить, что щели отсутствуют, а воздушный поток фильтруется через стены.

Обработка эксперимента

Посредством вентилятора в помещении с площадью наружных стен А=21,6 м^2 и 7,2 м^2 создавался перепад давления между помещением и наружной средой.При помощи регулировки расхода воздуха $Q = \mathrm{var}$ создавалось ступенчатое изменение давления $\Delta P = \mathrm{var}$. При фиксированном перепаде давления между испытываемым объемом и наружной средой измерялся расход воздуха через вентилятор.

Результатыиспытаний, полученные при разности давлений наружного и внутреннего воздуха 50 Па, приведены в таблице 2. Графики с экспериментальными данными и их аппроксимацией показаны на рисунках 5 – 6.

Таблица 2. Воздухообмен при разности давлений наружного и внутреннего воздуха 50 Па

	Объемный расход воздуха при разности давлений DP = 50 Па		**Кратность воздухообмена при разности давлений DP = 50 Па, n50**		**Требование норматива СНиП 23-02-2003, n50, не более**
	м³/час	**погрешность**	**час-1**	**погрешность**	**час-1**
Помещение первого этажа					
Понижение давления	68	+/- 7 %	2,0	+/- 9 %	≤ 2
Повышение давления	63	+/- 7 %	1,9	+/- 9 %	
Среднее		68	+/- 7 %	2,0	
Помещение второго этажа					
Понижение давления	59	+/- 7 %	2,0	+/- 9 %	≤ 2
Повышение давления	56	+/- 7 %	1,9	+/- 9 %	
Среднее		58	+/- 7 %	2,0	

Средняя воздухопроницаемость ограждающих конструкций при закрытых вентиляционных каналах в испытанных помещениях здания и разности давлений внутреннего и наружного воздуха 50 Па обеспечивает воздухообмен кратностью:

$$n_{50} = 1{,}95 \pm 0{,}18\ ч^{-1}.$$

Воздухопроницаемость конструкций и кратность воздухообмена в испытанных помещениях соответствует нормативным требованиям.

Условия обработки эксперимента:

1) живое сечение – это стены, пол и потолок за вычетом окон, через которые фильтрация не происходит;
2) скорость – это плотность расхода на поверхность А, м^2;
3) поскольку в расчете применяется средняя скорость, за основу принята гидравлическая модель фильтрации Дюпюи;
4) все вытяжные отверстия герметично закрыты, окна идеально плотные, щели отсутствуют.

Для перепада давления воздуха внутри и снаружи помещения 50 Па расход воздуха равен 56 м^3/ч, площадь живого сечения А = 58,32 м^2 (помещение второго этажа); расход воздуха 62 м^3/ч и площадь живого сечения А = 75,24 м^2 (помещение первого этажа).

Тогда скорость фильтрации воздуха равняется:

$v = 0{,}27 \cdot 10^{-3}\ \frac{м}{с}$ для помещения второго этажа;

$v = 0{,}23 \cdot 10^{-3}\ \frac{м}{с}$ для помещения первого этажа.

Коэффициент фильтрации воздуха равняется:

$k = 1{,}9 \cdot 10^{-5}\ \frac{м}{с}$ для помещения второго этажа;

$k = 1{,}6 \cdot 10^{-5}\ \frac{м}{с}$ для помещения первого этажа.

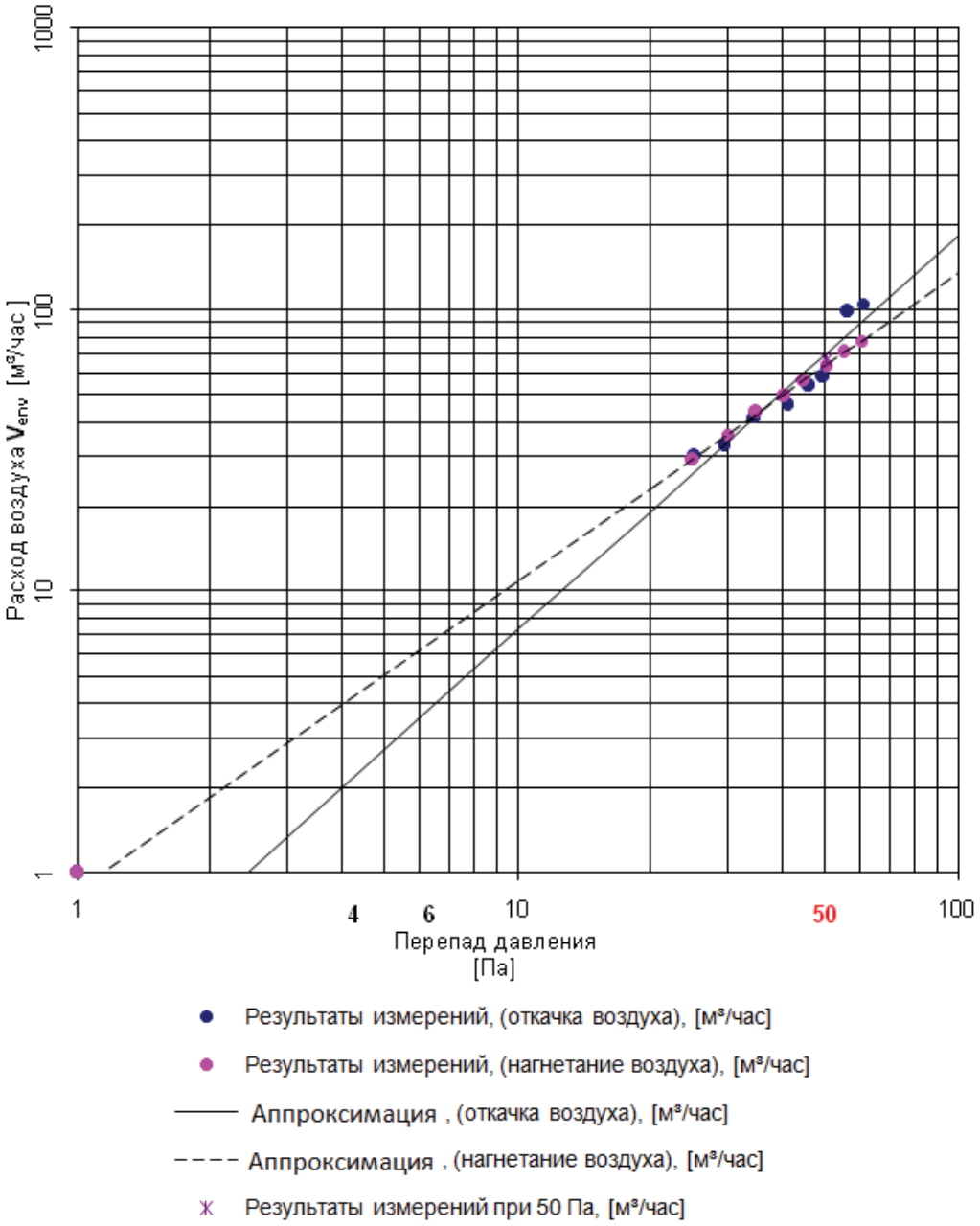


Рисунок 5. График зависимости объемного расхода воздуха через ограждающую конструкцию от разности давлений между испытываемым объемом и наружной стеной. Помещение первого этажа

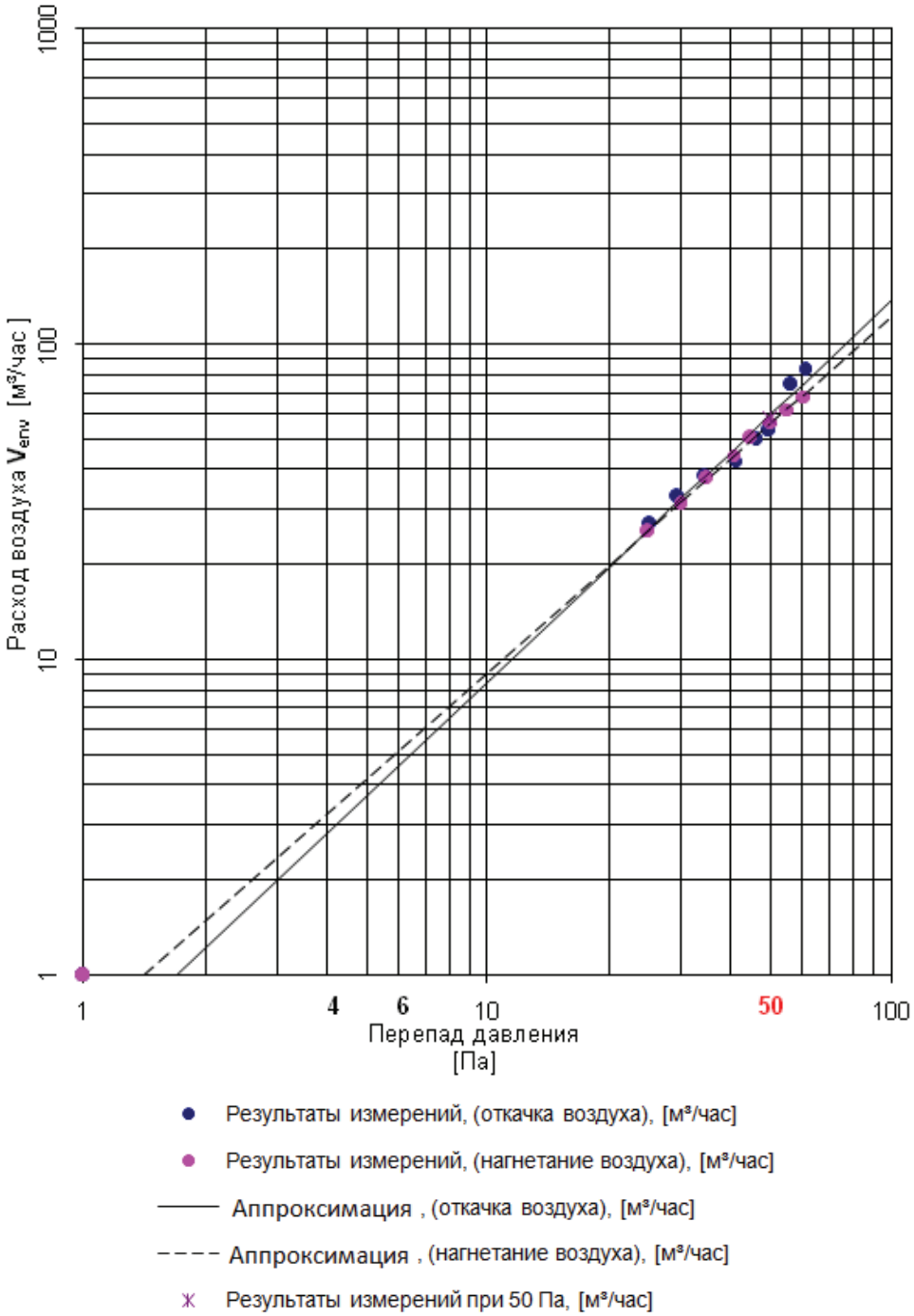


Рисунок 6. График зависимости объемного расхода воздуха через ограждающую конструкцию от разности давлений между испытываемым объемом и наружной стеной. Помещение второго этажа

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Установлено подобие, которое позволяет, используя экспериментально определенный коэффициент фильтрации для одной конструкции, математически вычислить его для другой конструкции.
2. Получено эмпирическое выражение для коэффициента фильтрации $\lg_{10}\zeta \cdot \lg_{10}(k \cdot 100000) = 2{,}3$, связывающеекоэффициент потерь напора и коэффициент фильтрации.
3. Получено значение коэффициента фильтрации воздушного потока через легкую ограждающую конструкцию $k = 1{,}8 \cdot 10^{-5}\,\frac{м}{с}$.

Литература

1. Кузьменко Д. В., Ватин Н. И. Ограждающая конструкция «нулевой толщины» – термопанель // Инженерно-строительный журнал. 2008. №1. С. 13-21.
2. Raisch E. Die Luftdurchlassigkeit von baustoffen. Gesundheits-Ingenieur. 1928. №30. Pp. 481-489.
3. Брилинг Р. Е. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов. М.: Стройиздат, 1948. 90 с.
4. Ушков Ф. В. Влияние воздухопроницаемости на теплозащиту стен // Строительная промышленность. 1951. №8. С. 16-19.
5. Титов В. П. Теплотехнический расчет наружных стен с учетом инфильтрации воздуха // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1962. №3.С. 137-147.
6. Калядин Ю. А. Исследование влияния внутренней фильтрации воздуха на температурный режим наружных стеновых панелей, утепленных воздухопроницаемыми материалами: Автореферат дис. канд. техн. наук. М.: 1966. 20 с.
7. Калядин Ю. А. Методы учета влияния внутренней фильтрации воздуха на теплотехнические свойства наружных стен, утепленных воздухопроницаемыми материалами // Сб. науч. тр. / НИИМОССТРОЙ. Вып. 3. 1966.С. 147-155.
8. Беляев В. С. Теплопередача в наружных стенах при продольной фильтрации воздуха // Теплотехнические свойства и микроклимат жилых зданий: Сб. науч. тр. / ЦНИИЭП жилища. М.: 1982. С. 18-22.
9. Артемов М. Д. К вопросу воздухопроницаемости ограждающих конструкций // Тепловой режим. Теплоизоляция и долговечность зданий: Сб. науч.тр. / НИИСФ. М.: 1981. С. 51-55.
10. Веселовацкая Е. В. Особенности теплопередачи через воздухопроницаемую теплоизоляцию трехслойных ограждающих конструкций: Дис. канд. техн. наук. М.: 1985. 223 с.
11. Кривошеин А. Д. Производственные сельскохозяйственные здания с воздухопроницаемыми ограждающими конструкциями: Дис. канд. техн. наук. Омск: 1993.200 с.
12. Гагарин В. Г., Козлов В. В., Садчиков А. В. Учет продольной фильтрации воздуха при оценке теплозащиты стены с вентилируемым фасадом // Промышленное и гражданское строительство. 2005.№ 6. С. 42-45.
13. Гагарин В. Г., Козлов В. В., Садчиков А. В., Мехнецов И. А. Продольная фильтрация воздуха в современных ограждающих конструкциях // АВОК. 2005. №8. С. 60-70.
14. Садчиков А. В. Влияние продольной фильтрации воздуха в утеплителе на теплозащитные свойства стен с навесными вентилируемыми фасадами. Дисс. канд. техн. наук. М.: 2007. 248 с.
15. Петриченко М. Р., Петроченко М. В. Гидравлика свободноконвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8(26). С. 51-56.
16. 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.
17. Walker Iain S., Wilson David J., Sherman Max H. A comparison of the power law to quadratic formulations forair infiltration calculations // Original Research Article Energy and Buildings. 1998. Vol. 27. Is. 3. Pp. 293-299.
18. Silberstein A, Hens H. Effects of air and moisture flows on the thermalperformance of insulations in ventilated roofs and walls // Journal of ThermalInsulation and Building Envelopes. 1996. Vol.19. Pp. 367-385.
19. Mei H. T. Ventilated wall and window test passive-solar concept. Technical Report / Lamar Univ. Dept. of Mechanical Engineering.Beaumont, TX (USA): 1982. 44p.

**Дарья Владимировна Петросова, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(905)211-44-17; эл. почта: d_kuzmenko@list.ru

Теоретически-экспериментальное обоснование метода оптимизации воздухообменов в системах промышленной вентиляции

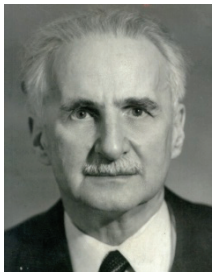
Д.т.н., профессор А.Г. Сотников*,
НП «АВОК – Северо-Запад»;
аспирант А.А. Боровицкий,
ФГБОУ ВПО Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

Ключевые слова: воздухообмен; вредность; концентрация; местный отсос; эффективность; оптимизация; вентиляция; минимум функции; эквивалентно-эффективная скорость

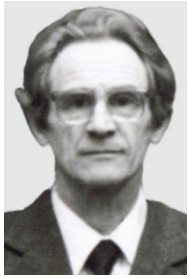
Многочисленные исследователи аэрохимических процессов и местных отсосов в системах промышленной вентиляции (СПВ) с 30-х гг. XX в и до наших дней, частично указанные в этой статье, к сожалению, практически не касались аналитической проблемы оптимизации как математической задачи. Это можно объяснить тем, что не было предложено единых методов анализа, сравнения и аналитического описания эффективности местных отсосов разных конструкций. Наиболее признанный и цитируемый идеолог термодинамической оптимизации систем микроклимата А.А. Рымкевич [1 – 3 и др.] также не рассматривал ее, изначально четко оговорив контрольную поверхность системами кондиционирования воздуха и общеобменной вентиляции, т.е. не промышленной вентиляции.

Такое положение нам представляется не случайным и объясняется как своеобразием и сложностью аэрохимических, диффузионных и тепловых процессов распространения вредных веществ в воздухе, так и многообразием и различием способов их улавливания местными отсосами. Поэтому перенос метода термодинамической оптимизации напрямую невозможен, хотя соответствующий подход к процессам обработки воздуха остается в силе. Читатель этот материал сможет увидеть в подготовленной книге [4].

Ведущие отечественные специалисты – профессора, доктора технических наук, фундаментальные труды которых [1, 2, 5 – 7] легли в основу данной разработки.



В.М. Эльтерман



А.А. Рымкевич

Л.Б. Успенская

В.Н. Посохин

Выполненный ниже системный и математический анализ этой задачи должен однозначно определить необходимую информацию о процессах выделения вредностей, сопровождаемых работой местных отсосов, которую нужно в первую очередь собирать, анализировать и обобщать. Ближе всего к этой проблеме подошли В. Н. Посохин в известной книге [7], рекомендациях [8] и статьях, О.Н.Бабынин и Б.Н.Кулешов [9], Г.Д. Лившиц [10 и др.], И.И. Полосин и др. [11], В.М. Гусев и др. [12], Н.В. Акинчев и В.П. Жигалов [13], В.И. Полушкин и др. [14], Т.Н. Рогова [15,16], а также зарубежные исследования по этой проблеме [17 – 22 и др.]. В этих работах описаны многочисленные зависимости при улавливании теплоты и газов местными отсосами от технологического оборудования. В последнее время на основании опытных данных Т.Н. Рогова предложила регрессионную формулу для нахождения эффективности улавливания по теплоте и газам для бокового отсоса, в которой учтены основные факторы и параметры. Эффект улавливания назван *оптимальным* сначала в статье [9], 1967 г., а затем в книге [7] в случае, когда расход воздуха, требуемого для разбавления вредных веществ, равен расходу воздуха, удаляемого местным отсосом.

Под комплексной оптимизацией СПВ (аэрохимической, термодинамической, аэродинамической) будем понимать поиск технического решения, обеспечивающего минимум *целевой функции* – приведенных затрат П, одновременно учитывающих как годовые отчисления от капитальных $E_нK$, принимая во внимание коэффициент реновации, так и годовые эксплуатационные затраты теплоты $C_т$, электроэнергии $C_э$, зарплату персонала $C_з$ и др. Наряду с таким традиционным подходом можно рассматривать принятые в Европе [23] затраты за *цикл жизни системы LLC*например 20…30 лет. В общем случае все эти величины зависят от переменных, среди которых те, которые можно оптимизировать – производительность приточной $L_{пр}$ и вытяжных $L_{оо}$, $L_{мо}$ систем, сечения воздуховодов, давления соответствующих вентиляторов P, конечное сопротивление фильтров $\Delta P_{ф.к}$ согласно общему функционалу:

$$\Pi = f\left[\sum K\left(L_i, P_i, l_i, d_i, ...\right), W_э\left(L_i, P_i, l_i, d_i, \tau_i, \eta_i, ...\right), Q_т\left(L_{нi}, \tau_i, t_{нi}, ...\right)\right] = \min. \quad (1)$$

Таким образом, все составляющие приведенных затрат зависят от расходов приточного (наружного) и вытяжного воздуха, а расход электроэнергии – еще от геометрии и протяженности сети, возможности оптимизации сечений (прил. 10.1 [24]), наличия фильтров и их сопротивления (гл. 9 [24]). Для каждого участка вентиляционной сети оптимальное сечение прежде всего зависит от соотношения удельной текущей и перспективной стоимости электроэнергии и металла $c'_э / k'_м$, м^2/кВт·ч, и конструктивного соотношения $\Sigma\zeta/l$, т.е. суммы коэффициентов местных сопротивлений к длине участка.

Уравнение газо-воздушного баланса справедливо для любого производственного помещения, любого типа вредностей, типа и конструкции местного отсоса. Согласно ему расход приточного (наружного) воздуха равен сумме расходов общеобменной вытяжки и производительности отдельного или группы местных отсосов, удаляющих одно и то же вредное вещество (при соблюдении саннормы подачи наружного воздуха), а концентрация вредного вещества в подаваемом наружном воздухе $c_н \ll$ПДК:

$$k_{диб} L_{пр} - L_{мо} - L_{оо} = 0, \quad (2)$$

где $L_{оо}$ – *расход общеобменной вытяжной системы вентиляции;* $k_{диб}$>1 – коэффициент дибаланса, учитывающий превышение вытяжки над притоком при выделении в производственном помещении вредных веществ, вычисляемый по п. 7.5.2 СНиП [25]. Однако эту величину лучше не связывать с площадью пола помещения, а определять в зависимости от площади открытых проемов и неплотностей ограждений. Скорость всасывания v_0 некоторым образом связана с эффективностью местного отсоса $\eta_{мо}$; эта зависимость рассмотрена ниже. В случае, когда $G_{вв}(1-\eta_{мо})/ПДК=L_{мо}$ и $L_{оо}$=0, наблюдается оптимальная эффективность местного отсоса и минимальный воздухообмен.

Дадимважные комментарии по поводу общей формулы (2). В статье [26] Г.Я. Крупкин предлагает корректировать среднесменную ПДК с учетом относительной продолжительности $\overline{\tau}$ работы технологического оборудования, выделяющего вредные вещества. Однако не все так просто: уже при времени $\overline{\tau}=0{,}3$ среднесменная концентрация опасно приблизится к другой – максимально разовой. Поэтому без вмешательства специалистов – гигиенистов и физиологов – здесь не обойтись. При статистическом подходе множество концентраций в объеме рабочей зоны будет таково, что в одних точках $c_в$<ПДК, а в других – наоборот, $c_в$>ПДК, аналогично с температурой воздуха.

Учитывая статистическое множество концентраций, Л.Б. Успенская [27, 28] предложила так называемый *предельно-вероятностный метод расчета воздухообмена в помещениях с тепло- и газовыделениями*. Вводя доверительную вероятность (обеспеченность) непревышения допустимой концентрации (ПДК) и расчетной температуры ($t_{в.max}$) p>0,5, можно большему проценту работающих обеспечить это условие. Однако в этом случае расчетный воздухообмен несколько возрастает, а именно в $1+\overline{c}_p\overline{\sigma}_c$ раз. Например, если гигиенические условия труда улучшить для 80 % работающих (объема рабочей зоны), а не как обычно для 50 %, то увеличение воздухообмена составит 14 %.

Предварительные расчеты показали, что существует оптимальное отношение обеспеченностик соответствующему воздухообмену, составляющее около 0,75…0,85 в зависимости от коэффициента вариации $\overline{\sigma}_c$. В обычном расчете этосоотношение меньше (0,50) и поэтому является объектом дальнейшей оптимизации, а обеспеченность p – *параметром аддитивности* в данной задаче. Практическое использование этой методики несложно, проходитв

два действия и основано на графике. С данной методикой, разработанной в 70-х гг. XX в. и опубликованной в малодоступных теперь изданиях, можно ознакомиться в книге [24, т. I, гл. 2, с. 81…83].

Эффективность улавливания (коэффициент улавливания) вредности местным отсосом $\eta_{мо}$<1 неоднозначна в своем определении и для источника теплоты может относиться к его конвективной, лучистой составляющей или к их сумме. Наряду с этим существует понятие коэффициента эффективности местного отсоса[29], представляющего собой отношение концентраций вредностей в удаляемом местным отсосом воздухе и в рабочей зоне $k_{эф}=c_{ух}$/ПДК>1; чем больше $k_{эф}$, тем удачнее конструкция отсоса. Авторы данной статьи предлагают это соотношение записывать в несколько ином виде, а именно $k_{эф}$=1–ПДК/$c_{ух}$<1, тогда она будет сравнима с величиной $\eta_{мо}$<1. В.Н. Посохин [7] считает, что термин *рациональная конструкция местного отсоса*обозначает такую конструкцию, которая позволяет достичь требуемого эффекта при минимальном расходе удаляемого воздуха. При одновременном выделении теплоты и диффузии химических веществ разной плотности происходит наложение движущих сил, а эффективность их улавливания может не совпадать.

Для дальнейшего анализа требуется аналитически связать эффективность улавливания вредности $\eta_{мо}$≤1 с типом местного отсоса, его конструкцией, геометрическими размерами, характером распространения вредности (теплота, диффузия), скоростью всасывания v_0, а для перемещаемых конструкций – с расстоянием *x* от источника до всасывающего сечения. Поскольку мы не имеем достаточных и надежных опытных данных о форме связи эффективности местного отсоса со скоростью всасывания, обратимся к теории турбулентной диффузии [5]. Согласно ей, относительная концентрация вредного вещества c_x/c_0 по мере удаления *x* от источника при плоскопараллельном сносящем потоке со скоростью *v* изменяется по экспоненциальной зависимости:

$$c_x / c_0 = \exp\left(-vx / A\right), \qquad (3)$$

где *A* – коэффициент турбулентной диффузии, м^2/с, определяемый по формуле $A = 0,25\varepsilon^{1/3} l^{4/3}$, где ε – диссипированная энергия, внесенная в помещение приточными струями, м^2/с^3; *l* – определяющий размер входного сечения местного отсоса, м. Зависимость (3), построенная в нижней части рис. 1, указывает, что концентрация c_x теоретически возможнадаже на большом удалении *x* от источника, хотя и сколь угодно мала.

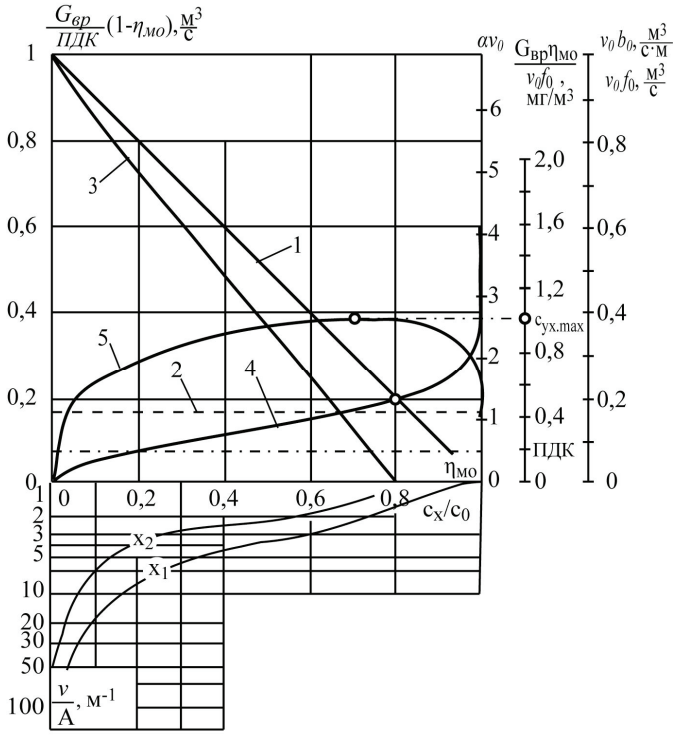


Рисунок 1. Основные зависимости, учитываемые при оптимизации воздухообмена в системах промышленной вентиляции. Верхний квадрант: *1* – зависимость расхода наружного (приточного) воздуха для разбавления вредности от эффективности улавливания вредности местным отсосом; *2* – расход наружного воздуха по условиям обеспечения саннормы; *3* – зависимость расхода общеобменной вытяжки от эффективности улавливания; *4* – зависимость эффективности улавливания от скорости всасывания по экспоненциальному закону (4); *5* – зависимость изменения концентрации в воздухе, удаляемом местным отсосом, от его эффективности. Нижний квадрант: зависимость относительной концентрации вредного вещества от скорости плоскопараллельного сносящего потока по мере удаления от источника График построен для условий: $G_{вр}$=0,2 мг/м^3, ПДК=0,2мг/м^3, f_0=0,03 м^2, v_0=5м/с, *a*=0,19 с/м, *n*=2 при $\eta_{мо}$=0,6

Выбор теоретической зависимости эффективности местного отсоса основан на аналогии с зависимостью (3) для турбулентной диффузии в предположении, что эта эффективность никогда, строго говоря, не достигнет единицы, хотя может сколь угодно близко приближаться к этому числу. Для этого случая введем общую экспоненциальную зависимость:

$$\eta_{мо} = 1 - \exp\left[-\left(av_0\right)^n\right], \tag{4}$$

где *a,* с/м, и *n* – множитель и показатель степени, согласующие экспериментальные данные испытания местного отсоса с гипотетической экспоненциальной зависимостью от скорости v_0 и превращающие выражение в круглых скобкахв безразмерное. Введенный в формуле (4) коэффициент*а* является аналогом отношения *x*/*A* в формуле (3) и, таким образом, учитывает отношение расстояния *x* от источника до отсоса к удельной энергии воздушного потока. Эта формула позволяет связать эффективность отсоса со скоростью всасывания. Например, для конкретного типа отсоса эффективность $\eta_{мо}$=0,75, тогда av_0=–ln(1–$\eta_{мо}$)=1,38, если закон экспоненциальный (при *n*=1). Аналогичную (4) зависимость эффективности местного отсоса в виде $\eta_{мо}$=1–exp(–$v_0\varphi_1$) предложил В.Н. Посохин [7]. В этой формуле кроме скорости всасывания v_0 введена размерная функция φ_1, значение которой зависит от геометрических и режимных параметров, определяющих условия работы местного отсоса.

Сводный график теоретически-экспериментальных зависимостей эффективности улавливания $\eta_{мо}$ разных местных отсосов от скорости всасывания по экспоненциальной формуле (4) и опытные точки показаны для семейства значений *a* и *n* на рис. 2. Все кривые имеют одинаковое значение, когда av_0=1, в этом случае 1–$\eta_{мо}$≈0,37. Похожую зависимость эффективности местного отсоса от скорости (расхода) воздуха, удаляемого местным отсосом, можно найти у В.Н. Посохина [7] (в зависимости от отношения полуширины зонта к его удалению от соосно-расположенного источника, а также расхода удаляемого воздуха и сечения зонта). Структура формул для эффективности, предложенная И.И. Полосиным и др. [11], к сожалению, не соответствует физическому условию, чтобы при $L/f_0\to\infty$ иметь $\eta_{мо}\to1$, а при $L/f_0\to0$ –$\eta_{мо}\to0$.

Эквивалентно-эффективная скорость (ЭЭС, англ.: equivalent-effective velocity – EEV) всасывания $av_{0.ээ}$ – это *новый предлагаемый нами термин*, *параметр аддитивности*, дающий возможность сравнивать эффективность разных типов, конструкций и особенностей работы местных отсосов по этой скорости. Выделения вредности могут зависеть от разных факторов, но все они при известном навыке, как это сделано на рис. 2, могут быть представлены соответствующей ЭЭС. Для вытяжного зонта она зависит от высоты расположения и соотношения габаритных размеров теплоисточника и зонта, конвективной мощности источника теплоты, соотношения расходов приточного и удаляемого воздуха, от скорости сносящего потока воздуха в помещении [30, 31]. Подобные экспериментальные данные, полученные, например, для вытяжного зонта, являются основой для совершенствования их конструкции [32, 33].

Обобщение ЭЭС для характерных типов местных отсосов предполагает связать его конструктивные и расходные параметры с этой скоростью. Например, для бортовых отсосов от гальванических ванн согласно [11] учитывают комплексный параметр $(L/F_в)Q^{-2/3}$, где выражение в скобках есть расход удаляемого отсосом воздуха, отнесенный к зеркалу ванны, а *Q* – мощность теплового потока над ванной. После специальной обработки для данных ванн оказалось, что 7 м/(с·кВт$^{2/3}$) соответствует ЭЭС, равная 1 (см. дополнительную шкалу на рис. 2). Таким образом, удается связать различные факторы, влияющие на выделение и удаление вредности с эквивалентно-эффективной скоростью их улавливания (av_0, *n*) при равном $\eta_{мо}$. Аналогично для линейного диффузионного источника и зонтом над ним согласно [7] эффективность является функцией отношения размеров *b*/2*x* и критерия Pe=Re·Pr=v_0l_0/a, но в то же время может быть выражена через ЭЭС. Подобные зависимости при наличии соответствующих опытных данных могут быть со временем получены и систематизированы для других типов местных отсосов.

Определение оптимального воздухообмена. Из общих соображений, анализа формул (2) и (4), а также линий на графике рис. 1 делаем вывод о том, что по мере увеличения эффективности улавливания вредности местным отсосом $\eta_{мо}$ снижается производительность общеобменной вытяжки и, одновременно с этим, сложным образом возрастает скорость всасывания v_0и расход воздуха, удаляемого местным отсосом$L_{мо}$. Чтобы найти рациональное решение, соответствующее минимальному воздухообмену, преобразуем выражения (2) с учетом зависимости (4), при условии, что $G_{вр}$(1–$\eta_{мо}$)/ПДК=$L_{мо}$ и $L_{оо}$=0:

$$G_{вр}(1-\eta_{мо})/\text{ПДК} - \frac{f_0}{a}\left[-\ln(1-\eta_{мо})\right]^{1/n} = 0. \tag{5}$$

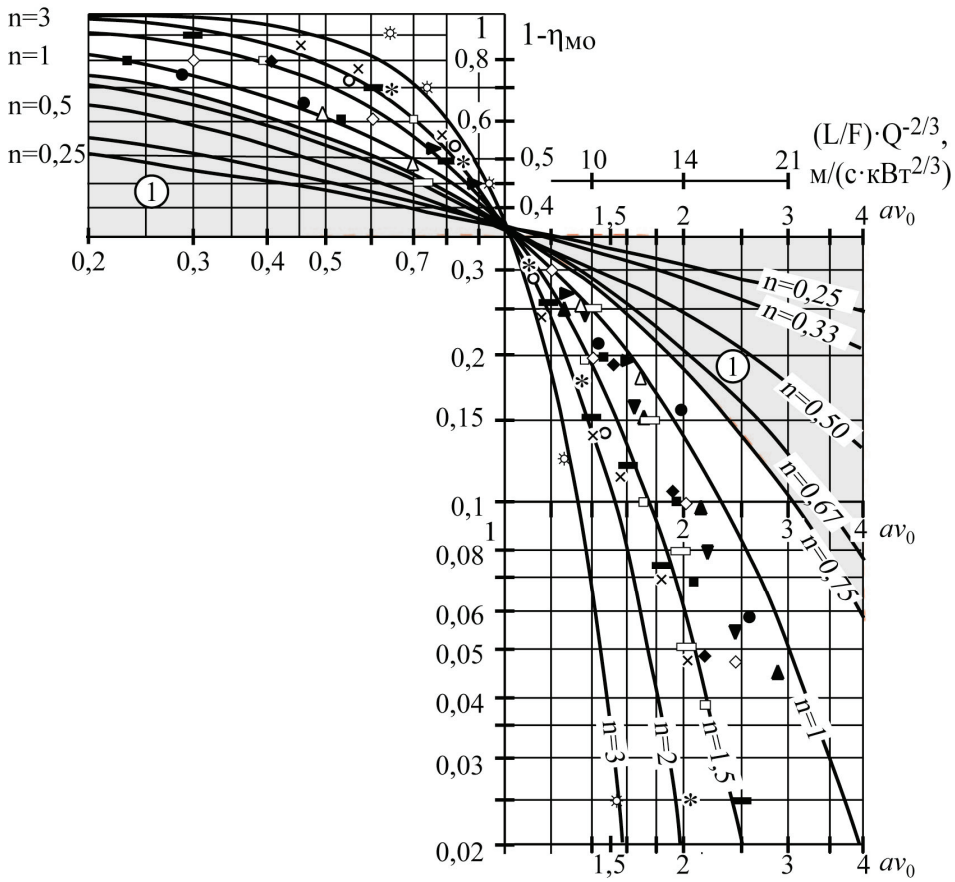


Рисунок 2. Сводный график теоретически-экспериментальных зависимостей эффективности улавливания $\eta_{мо}$ разных местных отсосов от скорости всасывания для семейства значений $a \cdot v_0$ и n и результаты анализа и обобщения опытов по величине ЭЭС:

***– данные О.Н. Бабынина и Б.Н. Кулешова [9] для укрытия (n=2; ЭСС=1825 м^3/ч);**

☼ – данные О.Н. Бабынина и Б.Н. Кулешова для бокового отсоса (n=3; ЭСС=5500 м^3/ч);

● – данные И.И. Полосина и др. [11] для бортовых местных отсосов новых конструкций от промышленных гальванических ванн (n=1,1; ЭЭС=7 м^3/(ч·м^2·кВт$^{2/3}$);

∆ – данные И.И. Полосина и др. для четырехстороннего бортового отсоса от промышленных гальванических ванн (n=1,05; ЭЭС=210 м^3/(ч·м^2);

■ – данные Н.В. Акинчева и В.П. Жигалова [13] для отсосов от ванн электролитического рафинирования металлов (n=1,25; ЭЭС=6,3 м^3/(ч·м^2·кВт$^{2/3}$);

▲– данные В.М. Гусева и др. [12] для алюминиевого электролизёра в межоперационный период, I=130 кА (n=1,1; ЭЭС=9000м^3/ч);

▼ – данные В.М. Гусева и др. для алюминиевого электролизёра в межоперационный период, I=500 кА (n=1,25; ЭЭС=43 000 м^3/ч);

▬ – данные В.Н. Посохина [7] для алюминиевого электролизёра в межоперационный период, I=130 кА (n=1,6; ЭЭС=3400м^3/ч);

× – данные В.Н. Посохина для алюминиевого электролизёра в межоперационный период, I=260 кА (n=2; ЭЭС=5800м^3/ч);

□ – данные В.Н. Посохина для линейного диффузионного источника и соосно расположенного щелевого отсоса (n=1,5; ЭЭС=1,5);

◊ – данные В.Н. Посохина для прямоугольного диффузионного источника и щелевого отсоса (n=1,3; ЭЭС=1,3);

♦ – данные В.Н. Посохина для квадратных диффузионного источника и щелевого отсоса (n=1,3; ЭЭС=0,8);

▭ – данные Т.Н. Роговой [15] для бокового отсоса для $\eta_{мо}=f(L_{мо})$ (n≈1,25; ЭЭС=170м^3/ч);

► –данные Т.Н. Роговой для бокового отсоса для $\eta_{мо}=f(Q_к^{-2/3})$ (n≈1,25; ЭЭС=0,02Вт$^{-2/3}$);

○ – данные А.А. Боровицкого для бокового местного отсоса у нагретого теплоисточника (n=2; ЭЭС=200 м^3/(ч·м^2);

1 – область, где исследования при соответствующих значениях параметров не обнаружены.

После преобразования этого выражения получаем условие оптимального воздухообмена в системе промышленной вентиляции при принятых допущениях, где искомая эффективность выражена в неявном виде трансцендентного уравнения:

$$\frac{a \cdot G_{вр}}{f_0 \cdot ПДК} = \frac{\sqrt[n]{-\ln(1-\eta_{мо})}}{1-\eta_{мо}}. \qquad (6)$$

Комплекс $G_{вр}/(f_0 \cdot ПДК)$ имеет смысл скорости воздуха. Из формулы (6) следует, что для гипотетической зависимости (4) при заданной конструкции местного отсоса, оптимальная эффективность улавливаниясуществует и однозначно зависит от отношения массы выделяющейся вредности $G_{вр}$, мг/с, к ее ПДК, мг/м^3, и к сечению всасывающего отверстия местного отсоса f_0, м^2. По вычисленной оптимальной эффективности улавливания $(\eta_{мо})_{опт}$ и формуле (4) легко определить скорость всасывания местного отсоса v_0, а далее по формуле (2) – оптимальную производительность системы промышленной вентиляции.

Авторами выполнены расчеты для конкретных объектов, подтверждающие возможность оптимизации воздухообмена.

Общие выводы

1. Проведенный анализ основных публикаций, описывающих эффективность разных типов местных отсосов, показал, что она зависит от конструктивных, аэродинамических и режимных параметров.
2. Предложен аналитический метод обобщения исследуемой эффективности на основе экспоненциально–степенной зависимости и метод определения коэффициентов этой зависимости.
3. Обобщение многочисленных опытных данных показало, что эти данные подчиняются выбранной зависимости.
4. Сравнение эффективности разных местных отсосов предложено по эквивалентно-эффективной скорости.
5. Предложена аналитическая методика определения оптимальной эффективности местного отсоса, при которой воздухообмен минимальный, а расход общеобменной вытяжки равен нулю.

Литература

1. Рымкевич А. А., Халамейзер М. Б. Управление системами кондиционирования воздуха. М.: Машиностроение, 1977. 274 с.
2. Рымкевич А. А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1990. 300 с.
3. Рымкевич А. А., Сербин Ю. В. Энергосбережение в СВ и КВ – в единстве решения задач оптимизации, управления, диагностирования //Проблемы и перспективы развития систем кондиционирования. СПб.: СПбГАХиПТ, 1997. С. 3– 8.
4. Сотников А. Г. Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха. (Полный комплекс требований, исходных данных и расчетной информации для СО, СПВ, СКВ, СГВС и СХС). СПб.: 2012.Т. I, 420 с. Т. II, 408 с.
5. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств. Изд. 1-е. М.: Стройиздат, 1967. 175 с.; изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Химия, 1971. 238 с.; изд. 3-е. М.: Химия, 1980. 288 с.
6. Успенская Л. Б. Математическая статистика в вентиляционной технике. М.: Стройиздат, 1980. 108 с.
7. Посохин В. Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования. М.: Машиностроение, 1984. 160 с.
8. Посохин В. Н., Моор Л. Ф. А3-877. Рекомендации по расчету отсосов от оборудования, выделяющего тепло и газы. М.: ГПИ Сантехпроект, 1983. 32 с.
9. Бабынин О. Н., Кулешов Б. Н. Выбор оптимального режима работы местных отсосов // Проектирование отопительно-вентиляционных систем. 1967. №3. С. 14–23.
10. Лифшиц Г. Д. Модель для аналитических исследования местных отсосов при истечении вредности и всасываемого воздуха // Известия Вузов. Строительство. 1979. №10. С. 92-95.
11. Полосин И. И., Кузнецов С. Н., Портянников А. В. Исследование эффективности местных отсосов новых конструкций от промышленных гальванических ванн // Труды конференции МГСУ. М.: 2007. С. 153 – 157.

12. Гусев В. М., Попченков И. Н., Смирнов А. Ф. Результаты исследования на модели укрытий алюминиевых электролизеров с обожженными анодами // Исследования в области отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Темат. сб. науч. тр. Л.: ЛИСИ, 1976. №1(117). С. 25–30.
13. Акинчев Н. В., Жигалов В. П. Исследование центрального отсоса от ванн электролитического рафинирования металлов // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. М.: Профиздат, 1972. № 75. С. 14–18.
14. Полушкин В. И., Анисимов С. М., Васильев В. Ф., Дерюгин В. В. Вентиляция: учебное пособие. М.: Академия, 2008. 416 с.
15. Рогова Т. Н. Уравнение регрессии в моделях оптимизации // Мир транспорта. 2009. №2. С. 138–143.
16. Рогова Т. Н. Влияние турбулентной диффузии газов на расчет объемов удаляемого воздуха // Мир транспорта. 2006. №1. С. 16–21.
17. Howard Goodfellow, Esko Tahti. Industrial Ventilation. Design Guidebook. London: Academic Press, 2001. 1520 p.
18. Marzal F., Gonzalez E., Minana A., Baeza A. Influence of push element geometry the capture efficiency of push-pull ventilation systems in surface treatment tanks // The Annals of Occupational Hygiene, Oxford University Press. 2002. №4. Pp. 383-393.
19. Devienne Rene, Fontaine Jean Raymond, Kicka Jeremie, Bonthoux Francis. Experimental characterization of plume of passive contaminant above a thermal source: capture efficiency of fume extraction hood // The Annals of Occupational Hygiene, Oxford University Press. 2009. №7. Pp.739-748.
20. Huang R. F., Lin S. Y., Jan S. Y., Hsieh R. H., Chen Y. K., Chen C. W., Yeh W. Y., Chang C. P., Shih T. S., Chen C. C. Aerodynamic characteristics and design guidelines of push-pull ventilation systems // The Annals of Occupational Hygiene, Oxford University Press. 2005. №1. Pp.1–15.
21. Marzal F., Gonzalez E., Minana A., Baeza A. Determination and interpretation of total and transvers allinear efficiencies in push-pull ventilation systems for open surface tanks // The Annals of Occupational Hygiene. Oxford University Press. 2002. №7. Pp. 629–635.
22. Huang R. F., Wu Y. D., Chen H. D., Chen C. C., Chen C. W., Chang C. P., Shih T. S. Development and evaluation of an air-curtain fume cabinet with considerations of its aerodynamics // The Annals of Occupational Hygiene, Oxford University Press. 2007. №2. Pp. 189–206.
23. ГОСТ Р ЕН 13779-2007. Вентиляция в нежилых зданиях. /Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования. М.: Стандартинформ, 2008. 44 с.
24. Сотников А. Г. Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции. Теория, техника и проектирование на рубеже столетий. СПб.: AT-Publiching. Т. I, 2005. 504 с. Т. II, ч. 1, 2006. 420 с. Т. II, ч. 2, 2007. 512 с.
25. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование / Госстрой России. М., 2004. 54 с.
26. Крупкин Г. Я. Об использовании гигиенических нормативов в практике проектирования систем вентиляции (в порядке обсуждения) // Инженерные системы. 2010, сентябрь. С. 70–71.
27. Успенская Л. Б. Математическая статистика в вентиляционной технике. М.: Стройиздат, 1980. 108 с.
28. Успенская Л. Б., Клячко Л. С. Предельно-вероятностный метод расчета и оценки систем воздухораспределения при теплогазовыделениях // Труды ВНИИГС. 1973. Вып. 36. С. 25–30.
29. Позин Г. М. Местная вытяжная вентиляция – самый эффективный способ организации воздухообмена в помещении // Инженерные системы. 2008. №3. С. 40–45.
30. Боровицкий А. А., Угорова С. В. Исследование закономерностей взаимодействия воздушных потоков в вытяжном зонте // Сб. трудов СПбГАСУ. №63 (Актуальные проблемы современного строительства). СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2010. С. 55-58.
31. Боровицкий А. А., Тарасенко В. И., Угорова С. В. Сравнение эффективности использования активированного вытяжного зонта с традиционно применяемым // Сб. трудов СГТУ (Инновационные методы в архитектуре и градостроительстве). Саратов: Наука, 2009. С. 150-152.
32. Патент РФ 2383400, МПК B08 15/02 (2006.01).Вытяжной зонт / С. В. Угорова, В. И. Тарасенко, А. А. Боровицкий; Гос. Ун-т. № 2008110668/12. Заявл. 19.03.08. Опубл. 10.03.10. Бюл. № 7.
33. Патент РФ на полезную модель 93709, МПК B08 15/02 (2006.01). Вытяжной шкаф / А. А. Боровицкий, С. В. Угорова, В. И. Тарасенко; Гос. Ун-т. № 2009144528/22. Заявл. 01.12.09. Опубл. 10.05.10. Бюл. № 13.

**Анатолий Геннадиевич Сотников, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(921)347-33-92; эл. почта: asotnikov2005@yandex.ru

Повышение надежности инженерных систем методом формализации поиска отказов

К.т.н., докторант Д. Р. Абсалямов*
ФВГОУ ВПО Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

Ключевые слова: процедура обучения; отказ; контролируемый показатель; обучающая выборка; рекуррентное соотношение; ортонормированный базис

Целью разработки математического обеспечения расходной части энергетического баланса в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха (СТВ и КВ) зданий и сооружений является создание и эксплуатация технических систем, обеспечивающих рациональное использование топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) [1, 2, 3, 4, 5]. Рациональное использование ТЭР, обеспечивающее достижение максимальной при существующем уровне развития техники и технологий эффективности, невозможно без своевременного выявления отказов по показателям эффективности использования ТЭР системами теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха зданий и сооружений. К показателям эффективности использования ТЭР [1, 4, 5, 6, 7] относятся: показатель энергетической эффективности, коэффициент полезного использования энергии, коэффициент полезного действия, полная энергоемкость продукции, энергоемкость производства продукции, показатель экономичности энергопотребления изделия, потеря энергии.

В дальнейшем формальное описание отказа по показателям эффективности использования ТЭР как составной части математической модели энергетического баланса называется его изображением. Изначально приведенное множество контролируемых показателей в СТВ и КВ, как правило, является избыточным. Необходимо определить минимальное множество таких показателей, что позволит снизить размерность математической модели, при этом повышая ее достоверность, а следовательно, и надежность СТВ и КВ. Это обусловлено снижением количества измерений в системах, каждое из которых сопровождается методическими и метрологическими погрешностями, а также уменьшением времени на принятие решений по устранению выявленных отказов.

В настоящей статье рассматривается метод формального описания отказов по показателям эффективности использования ТЭР в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха зданий и сооружений, в котором, в отличие от известных методов, совмещены процедуры построения изображений отказов и выбора минимального множества контролируемых показателей эффективности использования ТЭР.

В работе [8] предложен подход к преобразованию траекторий выходных процессов системы на основе теории пространств измеримых функций и интеграла Лебега. В результате преобразования траекторий формируется вектор $\mathbf{Y}_{<n'>}$ числовых характеристик, которые и принимаются в качестве показателей эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в СТВ и КВ. Этот вектор называется наблюдаемым состоянием топливо- и энергопотребляющей системы (в дальнейшем – «системы»).

Теоретико-множественная формулировка задачи построения изображений показателей эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в СТВиКВ

На множестве векторов $\mathbf{Y}_{<n'>}$ может быть задана структура n'–мерного евклидова пространства Y. В данном пространстве выделяются подмножества Y^i $(i=\overline{1,m})$ наблюдаемых состояний системы, каждое из которых соответствует недопустимым значениям (отказу) по i–му показателю эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в СТВ и КВ. Подмножества Y^i с топологической точки зрения представляют собой области в пространстве Y.

В общем случае области Y^i частично пересекаются между собой. Иначе, элементы $\mathbf{Y}_{<n'>}$ находятся между собой в отношении толерантности $\Omega \subset Y \times Y$, которое обладает следующими свойствами [9]: рефлексивности: $\forall\, \mathbf{Y} \in Y$, $(\mathbf{Y}, \mathbf{Y}) \in \Omega$; симметричности: $\forall\, \mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2 \in Y$: $(\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2) \in \Omega \Rightarrow$

$(\mathbf{Y}_2,\ \mathbf{Y}_1)\in\Omega$; антитранзитивности: $\exists\,\mathbf{Y}_1,\ \mathbf{Y}_2,\ \mathbf{Y}_3\in Y$: $(\mathbf{Y}_1,\ \mathbf{Y}_2)\in\Omega,(\mathbf{Y}_2,\ \mathbf{Y}_3)\in\Omega\ \Rightarrow(\mathbf{Y}_1,\ \mathbf{Y}_3)\notin\Omega$[1]. Из приведенных свойств следует, что области Y^i $(i=\overline{1,m})$ могут рассматриваться как классы толерантности, а фактор-пространство $Y/\Omega = \{Y^i|\ i=\overline{1,m}\}$ является покрытием пространства Y.

Процесс отнесения текущего состояния системы к той или иной области Y^i в покрытии Y/Ω характеризуется значительной степенью неопределенности из-за наличия пересечений областей и может давать ошибочные результаты. Поэтому очевидно, что при разработке математической модели распознавания отказов эффективности использования ТЭР системы каждую область Y^i необходимо заменить одним элементом – изображением i–го отказа:

$$E_{\mathrm{i}}=(\mathrm{e}_{\mathrm{i}1},\mathrm{e}_{\mathrm{i}2},...,\mathrm{e}_{\mathrm{in}'})^{\mathrm{T}},i=\overline{1,m}, \tag{1}$$

которое интегрально описывает свойства всей области.

Известно, что на евклидовых пространствах реализуется принцип сжимающих отображений [9, 10]. В соответствии с данным принципом всегда может быть найдена та или иная вычислительная схема, позволяющая выразить целую область изображением вида (1). Такие вычислительные схемы имеют единую математическую основу и реализуются в рамках процедур обучения.

Теоретические основы обучающей процедуры

Пусть задан перечень всех отказов эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в СТВ и КВ[2]:

$$Q=\{q_i\ |\ i=\overline{1,m}\}; \tag{2}$$

определён состав контролируемых показателей:

$$\mathbf{Y}=(y_1,\ y_2,\ldots,y_{n'})^{\mathrm{T}}; \tag{3}$$

сформирована ограниченная по объёму обучающая выборка реализаций наблюдаемых состояний (образов), соответствие которых каждому отказу известно:

$$\left\{Y^1_{<\mathrm{n}'>\mathrm{k}}\ |\ \mathrm{k}=\overline{1,\mathrm{N}^1}\right\}\subset\mathrm{Y}^1,\left\{Y^2_{<\mathrm{n}'>\mathrm{k}}\ |\ \mathrm{k}=\overline{1,\mathrm{N}^2}\right\}\subset\mathrm{Y}^2,\ldots,\left\{Y^{\mathrm{m}}_{<\mathrm{n}'>\mathrm{k}}\ |\ \mathrm{k}=\overline{1,\mathrm{N}^{\mathrm{m}}}\right\}\subset\mathrm{Y}^{\mathrm{m}}, \tag{4}$$

где N^i – мощность множества обучающих образов, содержащихся в области Y^i.

На основе исходных данных (2)–(4) требуется построить изображения (1), которые оптимальным образом (в смысле достоверности распознавания) описывают признаки соответствующих отказов $q_i(i=\overline{1,m})$.

Обучающая выборка (4), как правило, является неоднородной и ограниченной по объёму. Следовательно, для обучения необходимо использоватьметоды непараметрической статистики [11], которые позволяют обрабатывать неоднородную статистическую информацию малого объёма. Один из них – метод стохастической аппроксимации, который базируется на операциях итеративного градиентного поиска. В соответствии с данным методом для каждого подмножества Y^i ищется аппроксимация разделяющей функции h_i в n'-мерном евклидовом пространстве Y, котораяявляется неизвестной. Поэтому следует выбрать аппроксимирующую функцию $h(\mathbf{E}_i,\mathbf{Y}_{<n'>})$, с помощью которой ищется оптимальное приближение к разделяющей функции.

В алгоритмическом аспекте процедура обучения значительно упрощается, если применить разложение аппроксимирующей функции по ортонормированному базису $G(\mathbf{Y})=(g_1(\mathbf{Y}),\ g_2(\mathbf{Y}),\ldots,g_{n'}(\mathbf{Y}))^{\mathrm{T}}$ в соответствии с выражением:

$$\mathrm{h}(E_{\mathrm{i}}^{\mathrm{T}},Y_{<\mathrm{n}'>})=E_{\mathrm{i}}^{\mathrm{T}}\ \mathrm{G}(Y)=\sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{n}'}\mathrm{e}_{\mathrm{ij}}\mathrm{g}_{\mathrm{j}}(Y), \tag{5}$$

[1] Выражение $(\mathbf{Y}_i,\ \mathbf{Y}_j)\in\Omega$ означает, что наблюдаемые состояния $\mathbf{Y}_i$и $\mathbf{Y}_j$находятся между собой в отношении толерантности Ω, а $(\mathbf{Y}_i,\ \mathbf{Y}_j)\notin\Omega$ указывает, что данные состояния в отношении Ω не находятся.

[2] Особенности процедур обучения при моделировании контроля правильности функционирования системы рассматриваются в работе [12].

а в качестве меры отклонения аппроксимирующей функции от аппроксимируемой выбрать квадратичную меру:

$$\mathrm{H}(E_{\mathrm{i}}, Y) = (\mathrm{h}_{\mathrm{i}} - E_{\mathrm{i}}^{\mathrm{T}}\,\mathrm{G}(Y))^2 . \tag{6}$$

Далее базис $G(\mathbf{Y})$ называется G-преобразованием вектора **Y**.

В работе [12] показано, что при выполнении условий (5) и (6) обучающая процедура представляется в виде рекуррентного соотношения:

$$E_{\mathrm{i}}(\mathrm{k}) = E_{\mathrm{i}}(\mathrm{k}-1) - \mathrm{a}_{\mathrm{k}}[E_{\mathrm{i}}(\mathrm{k}-1) - \mathrm{G}(Y(\mathrm{k}))], \tag{7}$$

где a_k, (k=1,2,…) – элемент последовательности положительных чисел, удовлетворяющий условиям:

$$\lim_{\mathrm{k}\to\infty} \mathrm{a}_{\mathrm{k}} = 0, \ \sum_{\mathrm{k}=1}^{\infty} \mathrm{a}_{\mathrm{k}} = \infty, \ \sum_{\mathrm{k}=1}^{\infty} \mathrm{a}_{\mathrm{k}}^2 < \infty .$$

Наиболее простым примером такой последовательности является гармонический ряд:

$$\{1/\mathrm{k}\} = \{1, 1/2, 1/3, \ldots\}. \tag{8}$$

С учётом (8) рекуррентное соотношение (7) принимает вид:

$$E_{\mathrm{i}}(\mathrm{k}) = E_{\mathrm{i}}(\mathrm{k}-1) - \frac{1}{\mathrm{k}}[E_{\mathrm{i}}(\mathrm{k}-1) - \mathrm{G}(Y(\mathrm{k}))], \tag{9}$$

а для каждой координаты e_{ij} вектора $\mathbf{E}_i$ соотношение представляется как:

$$\mathrm{e}_{\mathrm{ij}}(\mathrm{k}) = \mathrm{e}_{\mathrm{ij}}(\mathrm{k}-1) - \frac{1}{\mathrm{k}}[\mathrm{e}_{\mathrm{ij}}(\mathrm{k}-1) - \mathrm{g}_{\mathrm{j}}(Y(\mathrm{k}))]. \tag{10}$$

По мере увеличения числа шагов изображение $\mathbf{E}_i$ стремится к своему оптимальному значению E_{i}^* с вероятностью единица:

$$\mathrm{P}[\lim_{\mathrm{k}\to\infty}(E_{\mathrm{i}}(\mathrm{k}) - E_{\mathrm{i}}^*) = 0] = 1 .$$

Каждый из векторов E_{i}^* может трактоваться и как точка в n'-мерном евклидовом пространстве Y, и как набор весовых коэффициентов уравнения гиперплоскости, отделяющей данное подмножество Y^i от других подмножеств в пространстве Y. Очевидно, что каждая координата e_{ij} ($\mathrm{i} = \overline{1,\mathrm{m}};\ \mathrm{j} = \overline{1,\mathrm{n}'}$) показывает степень сходства наблюдаемых состояний по j-му контролируемому признаку.

При реализации процесса обучения на основе рекуррентного соотношения (9) фактически решается градиентное уравнение:

$$\mathrm{grad}\,\mathrm{H}(E_{\mathrm{i}}, Y) = \mathrm{grad}\,(\mathrm{h}_{\mathrm{i}} - E_{\mathrm{i}}^{\mathrm{T}}\,\mathrm{G}(Y))^2 = 0 , \tag{11}$$

где $\mathrm{grad}\,\mathrm{H}(E_{\mathrm{i}}, Y) = \left(\dfrac{\partial\,\mathrm{H}(E_{\mathrm{i}}, Y)}{\partial\,\mathrm{e}_{\mathrm{ij}}}\right)$, $\mathrm{j} = \overline{1,\mathrm{n}'}$; $\dfrac{\partial\,\mathrm{H}(E_{\mathrm{i}}, Y)}{\partial\,\mathrm{e}_{\mathrm{ij}}}$ – частная производная.

Уравнение (11) решается методом последовательных приближений. На каждом шаге используются данные из обучающей выборки (4). Корень уравненияи даёт оптимальное значение вектора $E_i = E_i^*$.

Группировка обучающих образов и ранжирование групп

Важно определить, каков должен быть порядок использования обучающих образов из выборки (4). Опыт разработки математического обеспечения поиска отказов по показателям эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в СТВ и КВ показывает, что указанный фактор в значительной степени определяет скорость сходимости процесса обучения к оптимальному вектору E_i^*. В связи с этим предлагается способ группировки обучающих образов и ранжирования полученных групп с целью определения очерёдности их использования в процессе обучения.

Пусть Y^i – подмножество обучающих образов, соответствие которых *i*-му отказу эффективности использования ТЭР системы известно. В данном подмножестве выделяется группа Y_1^i, которая включает наибольшее количество неразличимых между собой элементов. Один из этих элементов $Y_{<n'>1}^i \in \mathrm{Y}_1^i$ после *G*-преобразования принимается в качестве вектора начального приближения: $\mathrm{G}(Y_1^i(0)) = E_i(0)$. Элементы считаются неразличимыми, если их одноимённые координаты отличаются друг от друга на величины, сопоставимые с погрешностями регистрации соответствующих траекторий в контрольных точках системы. Во вторую группу Y_2^i входит не больше неразличимых элементов, чем в первую, и не меньше, чем в остальные. В третьей группе Y_3^i количество неразличимых между собой элементов не больше, чем во второй, и не меньше, чем в остальных. Аналогичным образом формируются все остальные группы.

Если через *J* обозначить индексное множество обучающих образов ($|\mathrm{J}| = \mathrm{N}^i$, где $|\mathrm{J}|$ – мощность множества *J*), соответствующих*i*-му отказу, то результаты их группировки и ранжирования полученных групп можно представить следующим образом:

$$
\begin{aligned}
&\mathrm{Y}_1^i = (Y_k^i)_{k\in \mathrm{J}_1},\ \mathrm{J}_1 \subseteq \mathrm{J}, && |\mathrm{J}_1| = \mathrm{N}_1^i,\ \mathrm{N}_1^i \le \mathrm{N}^i;\\
&\mathrm{Y}_2^i = (Y_k^i)_{k\in \mathrm{J}_2},\ \mathrm{J}_2 \subseteq \mathrm{J}\backslash \mathrm{J}_1, && |\mathrm{J}_2| = \mathrm{N}_2^i,\ \mathrm{N}_2^i \le \mathrm{N}_1^i;\\
&\mathrm{Y}_3^i = (Y_k^i)_{k\in \mathrm{J}_3},\ \mathrm{J}_3 \subseteq \mathrm{J}\backslash \mathrm{J}_1 \cup \mathrm{J}_2, && |\mathrm{J}_3| = \mathrm{N}_3^i,\ \mathrm{N}_3^i \le \mathrm{N}_2^i;\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&\mathrm{Y}_p^i = (Y_k^i)_{k\in \mathrm{J}_p},\ \mathrm{J}_p \subseteq \mathrm{J}\backslash \bigcup_{l=1}^{p-1} \mathrm{J}_l, && |\mathrm{J}_p| = \mathrm{N}_p^i,\ \mathrm{N}_p^i \le \mathrm{N}_{p-1}^i.
\end{aligned}
\tag{12}
$$

Порядок использования групп в ходе обучения совпадает с их номером (рангом), а последовательность применения обучающих образов в рамках одной и той же группы произвольна. Указанные действия выполняются для каждого подмножества Y^i ($i = \overline{1,m}$) из обучающей выборки (4).

Изложенный способ группировки и ранжирования означает задание на множествах Y^i ($i = \overline{1,m}$) отношений эквивалентности Σ_i, которые обеспечивают объединение в рамках одной группы неразличимых (эквивалентных) между собой элементов, а затем ранжирование групп по убыванию количества содержащихся в них образов. В результате из обучающей выборки по каждому отказу формируется упорядоченное фактор-множество $\mathrm{Y}^i/\Sigma_i = \{\mathrm{Y}_1^i, \mathrm{Y}_2^i, \ldots, \mathrm{Y}_p^i\}$, $i = \overline{1,m}$, элементы которого удовлетворяют соотношениям (12).

Обучение с группировкой и ранжированием обеспечивает максимальное влияние на формирование изображений тех образов, которые наиболее характерны для соответствующих отказов системы. Данное утверждение объясняется тем, что коэффициент 1/*k* в соотношениях (9) и (10) на предыдущем шаге обучения больше, чем на последующем. Поэтому каждый предыдущий образ более значим, чем последующий.

Модификация обучающей процедуры в случае неопределенности диапазонов значений показателей эффективности использования ТЭР в СТВ и КВ при отказах системы

Если топливо- и энергопотребляющие СТВ и КВ находятся в стадии разработки или эксплуатируются в единичных экземплярах и непродолжительное время, то объем и качество априорной информации о СТВ и КВ могут оказаться недостаточными даже для приближенной оценкидиапазонов значений контролируемых показателей при различных отказах. В этом случае наиболее конструктивным является подход, основанный на информации о фактах выхода значений контролируемых показателей за допустимые интервалы [13]

$$\Delta_j = [y_{0j}^{\text{н}}; y_{0j}^{\text{в}}],\ j = \overline{1, n'}, \tag{13}$$

соответствующие удовлетворительному (работоспособному) состоянию системы ($y_{0j}^{\text{н}}$, $y_{0j}^{\text{в}}$ – соответственно нижнее и верхнее допустимые значения *j*–го контролируемого показателя). При реализации предлагаемого подхода целесообразно использовать бинарные значения контролируемых показателей, определяемые выражением:

$$s_j = \begin{cases} 1, \text{если } y_j \in \Delta_j, \\ -1, \text{если } y_j \notin \Delta_j. \end{cases} \tag{14}$$

В качестве базисных функций $g_j(\mathbf{Y})$, которые используются в рекуррентных соотношениях (9) и (10), могут быть приняты функции:

$$g_j(\mathbf{Y}) = s_j \delta_{rj},\ r,\ j = \overline{1, n'}, \tag{15}$$

где $\delta_{rj} = \begin{cases} 1, \text{если } r = j, \\ 0, \text{если } r \neq j. \end{cases}$ – символ Кронекера.

Анализ в соответствии со схемой, изложенной в работе [14], показывает, что функции $\{g_j(\mathbf{Y}) |\ j = \overline{1, n'}\}$ вида (15) образуют полную систему ортонормированных функций. Из выражений (14) и (15) следует, что *r*-я базисная функция при $r = j$определяется как$g_j(\mathbf{Y}) = s_j$. Тогда ортонормированный базис представляет собой вектор значений контролируемых показателей в бинарной форме: $G(\mathbf{Y}) = (s_1,\ s_2,\ldots,s_{n'})^{\text{т}} = \mathbf{S}$. Произвольное наблюдаемое состояние $\mathbf{Y}^i$, соответствующее *i*-му отказу, преобразуется аналогично: $G(\mathbf{Y}^i) = (s_{i1},\ s_{i2},\ldots,s_{in'})^{\text{т}} = \mathbf{S}^i$. Аппроксимирующая функция (5) записывается в форме:

$$\text{h}(E_{\text{i}}^{\text{т}}, Y) = \sum_{\text{j}=1}^{\text{n}'} \text{e}_{\text{ij}} \text{s}_{\text{j}}\ .$$

Рекуррентное соотношение (9) принимает вид:

$$E_{\text{i}}(\text{k}) = E_{\text{i}}(\text{k}-1) - \frac{1}{\text{k}}[E_{\text{i}}(\text{k}-1) - S^{\text{i}}(\text{k}))]\,. \tag{16}$$

Изображения, полученные в соответствии с выражением (16), представляются как векторы нормализованных показателей:

$$\mathbf{E}_i = (e_{i1},\ e_{i2},\ldots,\ e_{ij},\ldots,e_{in'})^{\text{т}}, e_{ij} \in [-1,1],\ i = \overline{1, m}\,. \tag{17}$$

Положительное значение показателя e_{ij}указывает на то, что в обучающей выборке преобладают отказы, при которых значения *j*-го контролируемого показателя не выходят из допустимого интервала (13) и наоборот в случае отрицательного значения.

Выбор минимального множества контролируемых показателей

В общем случае размерность вектора $\mathbf{Y}_{<n>}$наблюдаемого состояния системы является избыточной. Это означает, что существует такой вектор контролируемых показателей $\mathbf{Y}_{<n>}$меньшей размерности ($n<n'$), на котором все отказы являются наблюдаемыми.

Далее рассматривается процедура формирования минимального множества контролируемых показателей, связанная со сжатием изображений (1) или (17) отказов системы. Предлагаемая процедура позволяет выявлять и исключатьмалоинформативные контролируемые показатели.

Известно [15], что минимальная различимость двух векторов одинаковой размерности обеспечивается при условии их линейной независимости. Причем степень различимости увеличивается при возрастании меры обладания ими свойством ортогональности. Следовательно, для обеспечения наблюдаемости отказов требуется выполнение двух условий.

1. Матрица **E**транспонированных векторов изображений $\mathbf{E}_i(i=\overline{1,m})$ не должна содержать одинаковых или пропорциональных строк:$\mathbf{E}_i \neq a_1\mathbf{E}_k$, $\forall\, a_1 \in \{R\backslash 0\}, \mathrm{i,k}=\overline{1,\mathrm{m}}, i \neq k$, где R – множество вещественных чисел. Данное условие указывает на линейную независимость строк матрицы **E**.

2. Значение скалярного произведения векторов $\mathbf{E}_i$и $\mathbf{E}_k$должно стремиться к нулю:$(\mathbf{E}_i,\mathbf{E}_k) \to 0$, $\mathrm{i,k}=\overline{1,\mathrm{m}}, i \neq k$.Чем ближе к нулю значение скалярного произведения, тем больше мера обладания векторами $\mathbf{E}_i$ и $\mathbf{E}_k$свойством ортогональности.

В зависимости от требований к достоверности контроля технического состояния необходимо задаваться некоторым пороговым значением a_2, чтобы выполнялось условие:

$$(\mathbf{E}_i, \mathbf{E}_k) < a_2, \mathrm{i,k}=\overline{1,\mathrm{m}}, i \neq k, a_2 \in R^+, \tag{18}$$

где R^+ – множество положительных вещественных чисел.

С целью вывода правила для задания a_2и определения минимального состава контролируемых признаков следует рассмотреть механизм получения ортогональных систем векторов при условии, что имеются исходные линейно независимые, но не ортогональные системы. К ним относится и система векторов $\mathbf{E}_1$, $\mathbf{E}_2$, …,$\mathbf{E}_m$. Наиболее эффективным способом решения подобных задач является процедура ортогонализации Грама–Шмидта [15]. Она позволяет путем линейного преобразования системы $\mathbf{E}_1$, $\mathbf{E}_2$,…,$\mathbf{E}_m$получить ортогональную систему $E_1^{\perp}$, $E_2^{\perp}$,…, $E_{\mathrm{m}}^{\perp}$,еслиобщеечисло векторов mменьшеих размерности n':$m<n'$. С помощью указанной процедуры связь между исходными и преобразованными векторами задается следующими выражениями:

$$E_1^{\perp} = \mathrm{a}_{11}\, E_1, E_2^{\perp} = E_2 - \mathrm{a}_{21}\, E_1^{\perp}, E_3^{\perp} = E_3 - \mathrm{a}_{31}\, E_1^{\perp} - \mathrm{a}_{32}\, E_2^{\perp}, \ldots,$$
$$E_{\mathrm{m}}^{\perp} = E_{\mathrm{m}} - \sum_{\mathrm{k}=1}^{\mathrm{m}-1} \mathrm{a}_{\mathrm{mk}}\, E_{\mathrm{k}}^{\perp}, \tag{19}$$

где a_{11} =1;

$$\mathrm{a}_{\mathrm{ik}} = \frac{(E_{\mathrm{i}}, E_{\mathrm{k}}^{\perp})}{(E_{\mathrm{k}}^{\perp}, E_{\mathrm{k}}^{\perp})}, \mathrm{i}=\overline{2,\mathrm{m}}, \mathrm{k}=\overline{1,\mathrm{m}-1}. \tag{20}$$

Из выражений (19) очевидно, что всякий вектор $E_{\mathrm{i}}^{\perp}$ ортогональной системы представляет собой некоторую линейную комбинацию векторов $\mathbf{E}_1$, $\mathbf{E}_2$,…,$\mathbf{E}_m$ и, следовательно, является ненулевым. В противном случае оказались бы линейно зависимыми векторы $\mathbf{E}_1$, $\mathbf{E}_2$,…, $\mathbf{E}_m$, что не соответствует начальному условию.

Векторы $E_i^{\perp}$ ($i=\overline{1,m}$) образуют матрицу $E^{\perp}$, которая связана с исходной матрицей **E** соотношением $E^{\perp}$=**AE**. Оператор преобразования **A** является левой треугольной матрицей, диагональные элементы которой равны единице, а внедиагональные определяются по формулам (20), т.е.

$$A=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.....0 \\ -a_{21} & 1 & 0.....0 \\ -a_{31} & -a_{32} & 1.....0 \\ ..... & & \\ -a_{m1} & -a_{m2} & -a_{m3}.....1 \end{bmatrix}. \qquad (21)$$

Матрица $\overline{E}^{\perp}$, составленная из скалярных произведений вида $(E_i^{\perp}, E_k^{\perp})$, $i,k=\overline{1,m}$, называется матрицей Грама. Определитель этой матрицы (определитель Грама) имеет вид:

$$\det\overline{E}^{\perp}=\begin{vmatrix} (E_1^{\perp},E_1^{\perp}) & (E_1^{\perp},E_2^{\perp}).....(E_1^{\perp},E_m^{\perp}) \\ (E_2^{\perp},E_1^{\perp}) & (E_2^{\perp},E_2^{\perp}).....(E_2^{\perp},E_m^{\perp}) \\ ..... & \\ (E_m^{\perp},E_1^{\perp}) & (E_m^{\perp},E_2^{\perp}).....(E_m^{\perp},E_m^{\perp}) \end{vmatrix}. \qquad (22)$$

Все внедиагональные элементы определителя (22) равны нулю:

$$(E_i^{\perp},E_k^{\perp})=0,\ i,k=\overline{1,m},\ i\neq k, \qquad (23)$$

поскольку векторы $E_i^{\perp}$ и $E_k^{\perp}$ ортогональны. Для диагональных элементов справедливо неравенство:

$$(E_i^{\perp},E_i^{\perp})>0,\ i=\overline{1,m}, \qquad (24)$$

так как в матрице $\overline{E}^{\perp}$ нет нулевых строк. По этой причине $\det\overline{E}^{\perp}>0$, следовательно, ранг матрицы $\overline{E}^{\perp}$ равен *m*:

$$\mathrm{rang}\overline{E}^{\perp}=m. \qquad (25)$$

В работе [16] показано, что если матрица Грама системы векторов $\mathbf{E}_1$, $\mathbf{E}_2,\ldots,\mathbf{E}_m$ имеет ненулевые ведущие миноры и в каждой *i*-й строке данной матрицы диагональный элемент имеет наибольшее значение среди всех других элементов данной строки, то справедливы следующие утверждения.

1. Существует *n* таких координат ($m\leq n<n'$), что сформированные из них векторы $\mathbf{E}_i=(e_{i1}, e_{i2},\ldots,e_{in})^{\mathrm{T}}$, $i=\overline{1,m}$ будут попарно ортогональны.

2. Для обеспечения ортогональности не требуется линейного преобразования исходной системы векторов $\mathbf{E}_1$, $\mathbf{E}_2,\ldots,\mathbf{E}_m$, так как матрица преобразования вырождается в единичную матрицу. Если в качестве линейного преобразования применяется процедура Грама–Шмидта, то в единичную обращается матрица (21).

Следовательно, для обеспечения наблюдаемости всех отказов системы на множестве из *n* контролируемых показателей необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия:

1) $M_в\neq 0$, где $M_в$ – ведущие миноры матрицы Грама;

2) $(\mathbf{E}_i, \mathbf{E}_i) > (\mathbf{E}_i, \mathbf{E}_k)$, $i,k=\overline{1,m}$, $i\neq k$.

Первое условие выполняется всегда, так как справедливо равенство (25). Второе условие также выполняется в силу справедливости (23), (24) и (25). Кроме того, данное условие можно использовать при задании порогового значения a_2 в неравенстве (18): a_2=min{($\mathbf{E}_i$, $\mathbf{E}_i$)}, $i=\overline{1,m}$.

Таким образом, из исходного множества контролируемых признаков может быть выбрано n ($m \le n < n'$) таких, которые обеспечивают наблюдаемость всех отказов системы. Практически должен быть реализован случай, когда $n = m$, поскольку именно в этом случае достигается минимально возможное множество контролируемых показателей.

Метод формирования изображений отказов и выбора минимального множества контролируемых показателей

Из вышеизложенного материала следует, что указанный метод представляет собой последовательность следующих шагов.

Шаг 1. Синтез на основе исходных данных (2)–(4) и рекуррентных соотношений (9) или (16) изображений (1) или (17) соответственно для всех рассматриваемых отказов системы (реализация процедуры обучения).

Шаг 2. Формирование матрицы **E** транспонированных векторов изображений.

Шаг 3. Вычисление попарных скалярных произведений столбцов матрицы **E**:

$$(E_{j_p}, E_{j_q}),\ p=\overline{1,n'-1},\ q=\overline{2,n'},\ p<q, \tag{26}$$

где

$$E_{j_p}=(e_{1j_p}, e_{2j_p},..., e_{ij_p},..., e_{mj_p}),\ E_{j_q}=(e_{1j_q}, e_{2j_q},..., e_{ij_q},..., e_{mj_q}). \tag{27}$$

Из выражения (27) следует, что каждый столбец E_{j_p} матрицы **E** включает j_p-ю координату всех изображений $\mathbf{E}_{<n'>i}$($i=\overline{1,m}$).

Количество полученных скалярных произведений определяется из комбинаторной формулы $C_{n'}^2 = n'!/(2!(n'-2)!) = 0{,}5\,n'(n'-1)$, где $C_{n'}^2$ – число сочетаний из n' по 2.

Шаг 4. Ранжирование скалярных произведений (26) по неубыванию:

$$(E_{j_1}, E_{j_2})_1 \le (E_{j_1}, E_{j_3})_2 \le ... \le (E_{j_p}, E_{j_q})_c,\ c=C_{n'}^2. \tag{28}$$

Шаг 5. Выбор из последовательности (28) скалярных произведений, начиная с первого ее элемента и далее подряд столбцов, входящих в состав произведений. Номера столбцов повторяться не должны.

Как только количество выбранных столбцов становится равным m, процесс заканчивается. Данные столбцы в наибольшей степени приближаются к попарно ортогональным. Их номера указывают и номера контролируемых признаков, которые войдут в минимальное множество.

Полученные строки, т.е. сжатые изображения видов наблюдаемого состояния

$$\mathbf{E}_i = (e_{i1}, e_{i2},\ldots, e_{in})^{\mathrm{T}},\ i=\overline{1,m},\ n = m, \tag{29}$$

также будут в наибольшей степени приближаться к попарно ортогональным, поскольку они включают элементы выбранных столбцов.

Шаг 6. Проверка неравенств (18), включение изображений (29) в состав модели распознавания отказов, если неравенства выполняются.

Шаг 7. Изменение первоначально сформированного множества контролируемых показателей при невыполнении условий (18).

Если данные условияне выполняются, то ни первоначально сформированное множество контролируемых показателей, ни какое-либо из его подмножеств не обеспечивает наблюдаемость отказов системы, а следовательно, и требуемую достоверность их распознавания.

Шаг 8. Повторение процедуры обучения (шаг 1) и сжатие полученных изображений (шаги 2-7) в случае изменения первоначально сформированного множества контролируемых показателей.

Заключение

Адекватное математическое описание отказов по показателям эффективности использования ТЭР в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха зданий и сооружений наряду с использованием минимального множества информативных контролируемых показателей является одним из ключевых условий повышения достоверности принятия решений о функциональной пригодности СТВ и КВ, а также повышения надежности ее работы.

Литература

1. ГОСТ Р 51387-99. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения / Госстандарт России. М.: 1999. 20 с.
2. Якубсон В. М. Тепловое расточительство // Инженерно-строительный журнал. 2008. №1. С. 2.
3. Слепченок В. С., Петраков Г. П. Повышение энергоэффективности теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей северных и северо-восточных регионов России // Инженерно-строительный журнал. 2011. №4(22). С. 26–32.
4. DIN EN 253-2009. District heating pipes – Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks. Pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene.
5. DIN EN 448-2009. District heating pipes – Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks. Fitting assemblies of steel service pipes, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene.
6. Appleyard D. The Big Question: What Can We Hope for in the Next 12 Months? // Renewable Energy World. 2012. №2. Pp. 13-14.
7. Bayar T. Associate Editor. Better Renewables Risk Management Solutions Emerge // Renewable Energy World. 2012. №3. Pp. 22-24.
8. Сеньченков В. И. Математическое обеспечение контроля технического состояния мехатронных комплексов // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 10. С. 27–32.
9. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Физматлит, 2009. 92 с.
10. Треногин В. А. Функциональный анализ. М.: Наука, 1980. 210 с.
11. Тарасенко Ф. П. Непараметрическая статистика. Томск: Изд-во Томского университета, 1976. 184 с.
12. Сеньченков В. И. Процедура обучения при разработке моделей контроля технического состояния сложных систем // Известия Вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 1. С. 3–8.
13. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968. 126 с.
14. Суетин П. К. Классические ортогональные полиномы. М.: Наука, 1979. 152 с.
15. Ильин В. А., Поздняк Э. Г. Линейная алгебра. М.: Наука, 1984. 212 с.
16. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 142 с.

**Дамир Расимович Абсалямов, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(911)244-33-13; эл. почта: damir73@yandex.ru

Влияние закона регулирования на годовой расход теплоты автоматизированными климатическими системами

К.т.н., доцент О.Д. Самарин*;
аспирант С.С. Азивская,
ФГБОУ ВПО Московский государственный строительный университет

Ключевые слова: система автоматического регулирования; энергопотребление; закон регулирования; капитальные затраты; эксплуатационные издержки

Как известно, одной из основных задач при строительстве и эксплуатации здания и его систем обеспечения микроклимата является энергоресурсосбережение. Особое значение данная тема приобретает в настоящее время, в условиях действия Закона РФ «Об энергосбережении …» № 261-ФЗ от 23.11.09. При этом снижение энергопотребления должно достигаться комплексными средствами, включая не только повышение теплозащиты наружных ограждений, но и за счет решений, касающихся инженерного оборудования здания [1], [2]. Рассмотрим в связи с этим влияние принятого закона регулирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха (СВ и КВ) на их суммарное энергопотребление за отопительный период $Q_г$, ГДж. Очевидно, что оно будет зависеть от температуры приточного воздуха $t_п$,°С, которая формируется при работе регулятора в зависимости от применяемого алгоритма управления и возмущающих тепловых воздействий.

При отсутствии утилизации теплоты вытяжного воздуха величина $Q_г$ может быть рассчитана по следующему выражению [3], [4]:

$$Q_г = \left(z_p / 7\right) L_n c_в \rho_в D_d \cdot 10^{-6}, \qquad (1)$$

где $Z_р$ – продолжительность работы вентиляционного оборудования в течение недели, час (недельный срок принимается из-за того, что в разные дни недели оборудование может работать в течение разного времени, например, отключаться в выходные дни);
7 – число дней в неделе; $L_п$ – производительность системы по воздуху, м^3/ч;
$c_в$ = 1.005 кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость воздуха;
$\rho_в \approx 1.2$ кг/м^3 – его плотность;
$D_d = (t_в - t_{от}) \cdot Z_{от}$ – градусо-сутки отопительного периода.
Здесь $t_{от}$ и $Z_{от}$ – средняя температура, °С, и продолжительность отопительного периода, сут, в районе строительства по СНиП 23-01-99* «Строительная климатология». Если известна величина $t_п$, она используется в выражении для D_d вместо $t_в$.

Компенсирующее (регулирующее) воздействие $Q_{скв}$, Вт, автоматически управляемой СВ и КВ рассчитывается по разработанной авторами программы для ЭВМ [5], осуществляющей решение системы дифференциальных и алгебраических уравнений теплопередачи в ограждающих конструкциях помещения и теплообмена на их поверхностях по конечно-разностной схеме.

После вычисления $Q_{скв}$ можно найти требуемую текущую величину $t_п$, которую обозначим как $t_{п,j}$,°С [6]:

$$t_{n,j} = t_{в,j} - \frac{3.6 \cdot Q_{скв}}{L_n c_в \rho_в}, \qquad (2)$$

где $t_{в,j}$ – текущее значение температуры внутреннего воздуха в помещении,°С, получаемое по результатам предыдущего расчета нестационарного теплового режима с учетом влияния на него системы автоматического регулирования (САР).

Суммарное энергопотребление системой ΣQ, Дж, за промежуток времени τ, с, тогда можно найти из выражения [7]:

$$\Sigma Q = \frac{L_n c_в \rho_в}{3.6} \int_0^{\tau} \left(t_{n,j} - t_н\right) d\tau \approx \frac{L_n c_в \rho_в}{3.6} \cdot \Delta\tau \sum_1^{j} \left(t_{n,j} - t_н\right). \qquad (3)$$

Здесь $t_н$ – температура наружного воздуха, °С; Δτ – принятый в конечно-разностной схеме шаг по времени, с. Для экономии машинного времени и ускорения расчетов их можно провести для нескольких суток при $t_н = t_{от}$, а затем вычислить отношение величины ΣQ, соответствующей тому или иному значению времени интегрирования (изодрома) $T_и$, с, при использовании ПИ-закона регулирования, к контрольному уровню ΣQ для П-закона. Это и будет относительное изменение энергопотребления за счет варьирования величины $T_и$, которое можно включить в качестве поправочного коэффициента в формулу (1) для определения абсолютного превышения энергозатрат. Возможность подобной процедуры была ранее обоснована применительно к использованию утилизации теплоты вытяжного воздуха в работе [8], где показано, что проведение вычислений только при $t_н = t_{от}$ и распространение полученных соотношений на изменение потребления теплоты в целом за отопительный период приводит к неточности, не превышающей 1–2 % и заведомо лежащей в пределах погрешности аппроксимации конечно-разностной схемы.

На рис. 1 показаны результаты расчетов по рассматриваемой методике для характерного помещения-представителя. Поскольку чистый П-закон формально соответствует условию $T_и \to \infty$, вычисления производились с переменной величиной $T_и$, которая постепенно повышалась до тех пор, пока значение ΣQ не переставало изменяться. Сплошная линия соответствует полностью конвективному характеру возмущающего теплового воздействия, т.е. доле конвективной составляющей в нем $q_к = 1$, а пунктирная – более часто встречающемуся случаю значительной доли лучистых теплопоступлений, а именно $q_к = 0.4$. Видно, что введение И-компоненты в регулятор действительно способствует росту не только установленной мощности оборудования, но и увеличению затрат теплоты, которое может достигать 8–11 % по сравнению с использованием чистого П-регулирования. Некоторый слабо выраженный максимум на обеих кривых при $T_и$ порядка 10000 с, вероятно, можно объяснить погрешностью аппроксимации при использовании конечно-разностной схемы. В то же время в случае $T_и$ < 1000 с для обоих вариантов уровень отклонения относительного энергопотребления становится уже практически постоянным, не зависящим от $T_и$, поэтому его также можно считать предельным, только уже для чистого И-закона.

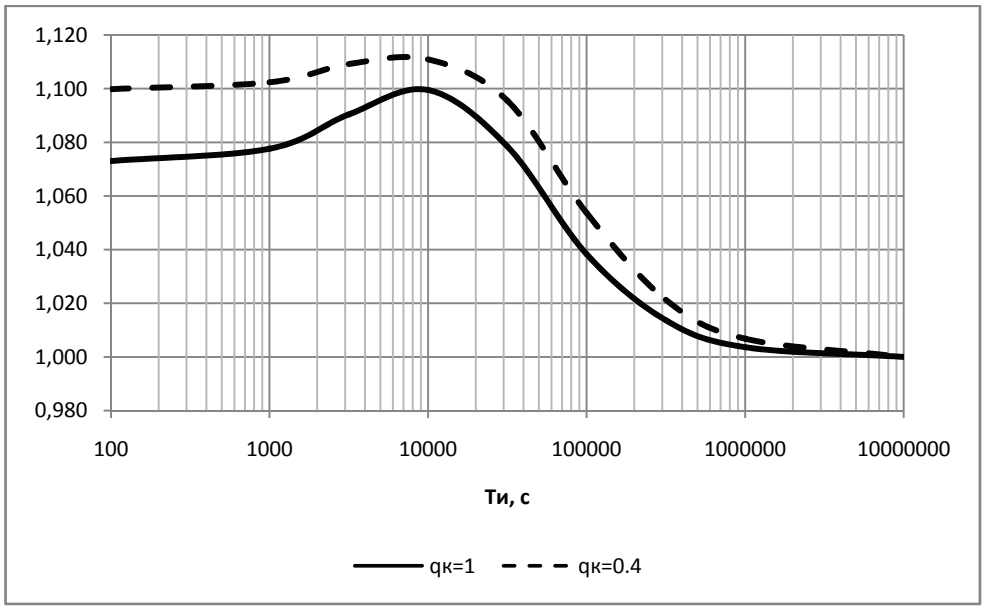


Рисунок 1. Зависимость относительного энергопотребления системой вентиляции от величины $T_и$

За рубежом близкие подходы к оценке влияния способа регулирования на энергопотребление климатических систем можно встретить, например, в источнике [9]. Отдельные соображения подобного рода появлялись еще в работе [10]. Хотя в целом такие публикации достаточно редки, в основном рассматриваются пассивные мероприятия по энергосбережению [11].

Полученные данные могут служить основой для технико-экономического анализа, поскольку годовые эксплуатационные издержки, связанные с потреблением теплоты в СВ и КВ, вычисляются именно через величину $Q_г$ и текущий тариф на тепловую энергию [4]. Следовательно, нетрудно определить и годовую экономию за счет использования наиболее целесообразного закона регулирования.

Если в качестве примера рассмотреть здание средней школы по типовому проекту 221-1-25-387 [12], подробно исследованное ранее в работе [4], можно прийти к следующим результатам. Для данного здания $L_п$ = 15200 м^3/ч, $Z_р$ = 10·5 = 50 часов в неделю; кроме того, D_d = 4515 К·сут. Тогда по формуле (1) находим:

$$Q_г = (50/7)\cdot 15200\cdot 1.005\cdot 1.2\cdot 4515\cdot 10^{-6} = 591.2 \text{ ГДж.}$$

Будем считать, что это минимальная контрольная величина, соответствующая применению П-закона. В этом случае превышение энергозатрат для $q_к$ = 1 в соответствии с рис. 1, если не обращать внимания на максимум кривой, составит 0.075·591.2 = 44.3 ГДж или 44.3/4.19 = 10.57 Гкал в год, а при $q_к$ = 0.4 – даже 0.1·591.2 = 59.1 ГДж или 59.1/4.19 = 14.1 ГКал. При тарифе на тепловую энергию, равном 1433.11 руб./Гкал по данным ОАО «МОЭК» на 2011 год для нежилых зданий [13], это означает увеличение годовых расходов на теплоту при использовании ПИ-закона в размере вплоть до 10.57·1433.11 = 15148 руб. и 14.1·1433.11 = 20207 руб. соответственно. В результате сумма получается достаточно значительной, к тому же при переходе к П-регуляторам капитальные затраты не увеличиваются, а даже наоборот, как правило, сокращаются, так как более простые устройства должны стоить дешевле. Но даже если не учитывать разность единовременных расходов, это уже означает, что имеет место абсолютная экономическая целесообразность принятого решения, поскольку оно дает возможность сократить эксплуатационные издержки без повышения капитальных затрат.

Таким образом, при периодическом характере колебаний теплового возмущения, по-видимому, наилучшим будет применение П-закона, поскольку он требует наиболее простых и дешевых технических средств автоматизации и в то же время обеспечивает минимальное суммарное энергопотребление системами обеспечения микроклимата.

Литература

1. Горшков А. С. Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий // Инженерно-строительный журнал. 2010. №1. С. 9–13.
2. Комков В. А., Тимахова Н. С. Энергосбережение в жилищно-коммунальном хозяйстве. М.: ИНФРА-М, 2010. 320 с.
3. Богуславский Л. Д., Симонова А. А., Митин М. Ф. Экономика теплогазоснабжения и вентиляции. М.: Стройиздат, 1988. 351 с.
4. Самарин О. Д. Вопросы экономики в обеспечении микроклимата зданий. М.: АСВ, 2011. 128 с.
5. Самарин О. Д., Азивская С. С. О численном расчете коэффициента ассимиляции переменных теплопоступлений при автоматизации систем обеспечения микроклимата // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 5. С. 31–33.
6. Хрусталев Б. М., Кувшинов Ю. Я., Копко В. М. Теплоснабжение и вентиляция. М.: АСВ, 2010. 784 с.
7. Кувшинов Ю. Я. Теоретические основы обеспечения микроклимата помещения. М.: АСВ, 2007. 184 с.
8. Самарин О. Д. О соотношении температурной эффективности теплоутилизаторов и снижения энергопотребления в системах вентиляции // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 2. С. 40–42.
9. Valancius K., Sasnauskaite V. An influence of the control of heating system to the design heat load and demand of a building // Environmental engineering. Pap. of the 7-th conf. of VGTU. Vilnius: 2008. Pp. 882–885.
10. Keller B., Magyari E. A simple calculation method of general validity for the design-parameters of a room/building, minimizing its energy and power demand for heating and cooling in a given climate. Zűrich: 1998. 57 p.
11. Lapinskiene V., Paulauskaite S., Motuziene V. The analysis of the efficiency of passive energy saving measures in office buildings // Environmental engineering.Pap. of the 8-th conf. ofVGTU. Vilnius: 2011. Pp. 769–775.
12. Строительный каталог. Перечень типовой документации общественных зданий для строительства в городах и поселках городского типа. М.: ГУП ЦПП, 1994.
13. Московская объединенная энергетическая компания. [Электронный ресурс] URL: www.oaomoek.ru. (Дата обращения: 12.03.2012).

**Олег Дмитриевич Самарин, Москва, Россия*
Тел. раб.: +7(499)188-36-07; эл. почта: samarin1@mtu-net.ru

Новая зависимость для определения коэффициента гидравлического сопротивления в переходной зоне сопротивления (от ламинарного режима к турбулентному)

К.т.н., доцент А.М. Калякин;
ассистент Е.В. Чеснокова*,
ФГБОУ ВПО Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Ключевые слова: коэффициент гидравлического трения; переходная зона; потери давления; число Рейнольдса; сопряжение кривых

В процессе решения некоторых гидравлических задач возникает необходимость определения потерь напора и давления (формулы 1, 2).

$$h = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}, \tag{1}$$

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2} \rho . \tag{2}$$

Обычно для этого достаточно найти значение коэффициента гидравлического сопротивления λ. В (1) и (2) приняты следующие обозначения: l – длина трубопровода; d – его диаметр; V – средняя скорость потока; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

Особые трудности всегда вызывало определение коэффициента гидравлического трения в переходной зоне сопротивления. Это обусловлено сложными физическими процессами, связанными с неустойчивостью ламинарного режима.

Исследование коэффициента гидравлического сопротивления в этой области проводилось двумя путями: методом подбора эмпирических зависимостей [1, 2, 3, 4], а также рассмотрением физики перемежаемости режимов [5, 6]. Известны также работы по определению нижнего критического числа Рейнольдса, которое по мнению авторов зависит от шероховатости [7, 8, 9, 10, 11].

Все полученные зависимости для коэффициента гидравлического трения излишне громоздки и неудобны для практического применения. Поэтому нами была поставлена задача получить простую как по виду, так и по способу получения формулу для коэффициента гидравлического трения в переходной зоне сопротивления.

Полученная в работе зависимость вполне отвечает требованиям к точности расчетов, выполняемых в настоящее время [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

Рассмотрим приближенное выражение коэффициента сопротивления λ в виде отрезка сходящегося ряда. Учитываем, что в переходной зоне (перед зоной гладкостенного сопротивления на графике $\lambda - \mathrm{Re}$) коэффициент λ зависит только от числа Re, то есть представляет собой непрерывную функцию от одного аргумента. Тогда искомая зависимость примет вид:

$$\lambda = \varphi(\mathrm{Re}). \tag{3}$$

До переходной зоны (слева от нее на графике $\lambda - \mathrm{Re}$) формула для λ в круглых трубах имеет вид:

$$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}, \tag{4}$$

а после переходной зоны (при больших числах Re) коэффициент λ выражается известной формулой:

$$\lambda = \frac{0.316}{\mathrm{Re}^{0.25}}. \quad (5)$$

Вполне очевидно, что не существует четких границ (т.е. значений чисел Re) между ламинарной зоной сопротивления и переходной зоной; также нет ярко выраженной границы между переходной зоной и зоной гладкостенного сопротивления. Тем не менее, условно примем, что зона ламинарного сопротивления заканчивается при $\mathrm{Re} = \mathrm{Re}_1$, а зона гладкостенного сопротивления начинается при $\mathrm{Re} = \mathrm{Re}_2$. Таким образом, задача состоит в нахождении вида функции $\varphi(\mathrm{Re})$ при

$$\mathrm{Re}_1 \le \mathrm{Re} \le \mathrm{Re}_2. \quad (6)$$

Отрезок ряда по причинам, указанным ниже, выбирается состоящим из четырех слагаемых, причем используем так называемые базисные функции $f(\mathrm{Re})$. Вид отрезка ряда может быть выбран несколькими способами, например:

$$\varphi(\mathrm{Re}) = a_1 + a_2 f(\mathrm{Re}) + a_3 f^2(\mathrm{Re}) + a_4 f^3(\mathrm{Re}), \quad (7)$$

$$\varphi(\mathrm{Re}) = a_1 f(\mathrm{Re}) + a_2 f^2(\mathrm{Re}) + a_3 f^3(\mathrm{Re}) + a_4 f^4(\mathrm{Re}). \quad (8)$$

Базисные функции, как было определено в процессе исследования, можно задавать многими способами, в частности:

$$f(\mathrm{Re}) = [\ln(\mathrm{Re})]^{-n}, \quad (9)$$

$$f(\mathrm{Re}) = \mathrm{Re}^{-n}. \quad (10)$$

Их выбор принципиального значения не имеет. Желательно, однако, чтобы

$$\lim_{\mathrm{Re}\to\infty} f(\mathrm{Re}) = 0. \quad (11)$$

Если базисные функции выбраны и выбран также вид отрезка ряда, то для окончательного определения $\lambda = \varphi(\mathrm{Re})$ остается найти числовые значения коэффициентов a_1, a_2, a_3 и a_4. Методика их определения изложена ниже.

Число Re_1 является граничным: слева от него на графике $\lambda - \mathrm{Re}$ находится зона ламинарного сопротивления, а справа – переходная зона, и, в силу непрерывности λ как функции числа Re, только в одной точке при $\mathrm{Re} = \mathrm{Re}_1$ значения искомой функции $\lambda = \varphi(\mathrm{Re})$ и $\lambda = 64/\mathrm{Re}$ совпадут. Аналитически это выражается так:

$$\varphi(\mathrm{Re})\big|_{\mathrm{Re}=\mathrm{Re}_1} = \frac{64}{\mathrm{Re}_1}. \quad (12)$$

Также, при $\mathrm{Re} = \mathrm{Re}_2$ (слева переходная зона, а справа зона гладкостенного сопротивления):

$$\varphi(\mathrm{Re})\big|_{\mathrm{Re}=\mathrm{Re}_2} = \frac{0.316}{\mathrm{Re}_2^{0.25}}. \quad (13)$$

Например, в развернутом виде последнее равенство для ряда типа (7) будет таким (в качестве базисной функции выбрана $f(\mathrm{Re}) = \mathrm{Re}^{-2}$):

$$a_1 + a_2 \frac{1}{\mathrm{Re}_2^2} + a_3 \frac{1}{\mathrm{Re}_2^4} + a_4 \frac{1}{\mathrm{Re}_2^6} = \frac{0.316}{(\mathrm{Re}_2)^{0.25}}. \quad (14)$$

Далее, естественно допустить, что в геометрическом представлении при значениях $\mathrm{Re}=\mathrm{Re}_1$ и $\mathrm{Re}=\mathrm{Re}_2$ сопряжение кривых для λ на графике $\lambda-\mathrm{Re}$ происходит плавно. Аналитически это означает, что производные от зависимостей для λ при $\mathrm{Re}=\mathrm{Re}_1$ и при $\mathrm{Re}=\mathrm{Re}_2$ равны между собой.Например, при $\mathrm{Re}=\mathrm{Re}_1$ равны производные функций $\lambda=\varphi(\mathrm{Re})$ и $\lambda=64/\mathrm{Re}$, т.е.:

$$\left[\frac{d}{d\,\mathrm{Re}}\varphi(\mathrm{Re})\right]_{\mathrm{Re}=\mathrm{Re}_1}=\left[\frac{d}{d\,\mathrm{Re}}\left(\frac{64}{\mathrm{Re}}\right)\right]_{\mathrm{Re}=\mathrm{Re}_1}, \tag{15}$$

а при $\mathrm{Re}=\mathrm{Re}_2$ равны производные функций $\lambda=\varphi(\mathrm{Re})$ и $\lambda=0.316/\mathrm{Re}^{0.25}$, т.е.:

$$\left[\frac{d}{d\,\mathrm{Re}}\varphi(\mathrm{Re})\right]_{\mathrm{Re}=\mathrm{Re}_2}=\left[\frac{d}{d\,\mathrm{Re}}\left(\frac{0.316}{\mathrm{Re}^{0.25}}\right)\right]_{\mathrm{Re}=\mathrm{Re}_2}. \tag{16}$$

Выполнение условий (12), (13), (15) и (16) дает возможность получения четырех независимых линейных алгебраических уравнения, в результате решения которых могут быть определены коэффициенты a_1, a_2, a_3 и a_4.

Задача об определении $\lambda=\varphi(\mathrm{Re})$ будет полностью решена, когда найденные в результате решения системы уравнений (12), (13), (15) и (16) коэффициенты будут подставлены в зависимость для $\lambda=\varphi(\mathrm{Re})$.

С целью проверки предлагаемого способа в лаборатории гидравлики СГТУ была выполнена экспериментальная установка по определению потерь в переходной зоне сопротивления (в круглых трубах). Описание установки, методика опытов и опытные данные приведены в [21, 22].

Авторами рекомендуются для практического применения следующие зависимости для λ [23]:

$$\lambda=\varphi(\mathrm{Re})=-53.27+130.57\left(\frac{10}{\ln\mathrm{Re}}\right)-106.46\left(\frac{10}{\ln\mathrm{Re}}\right)^2+28.89\left(\frac{10}{\ln\mathrm{Re}}\right)^3, \tag{17}$$

$$\lambda=\varphi(\mathrm{Re})=101.81-135.01\,\mathrm{Re}^{0.1}+59.65\,\mathrm{Re}^{0.2}-8.78\,\mathrm{Re}^{0.3}, \tag{18}$$

$$\lambda=\varphi(\mathrm{Re})=3.35-5.31\left(\frac{10}{\ln\mathrm{Re}}\right)+2.12\left(\frac{10}{\ln\mathrm{Re}}\right)^2. \tag{19}$$

Соответствующие графики приведены на рисунке 1. При сравнении (17), (18) и (19) с опытными данными оказалось, что зависимость (17) наиболее точная, а зависимость (19) наиболее простая, но уступает в точности зависимостям (17) и (18).

При применении данного метода необходимо, исходя из условий работы трубопровода или из каких-либо других данных, определить значения чисел Re_1 и Re_2.

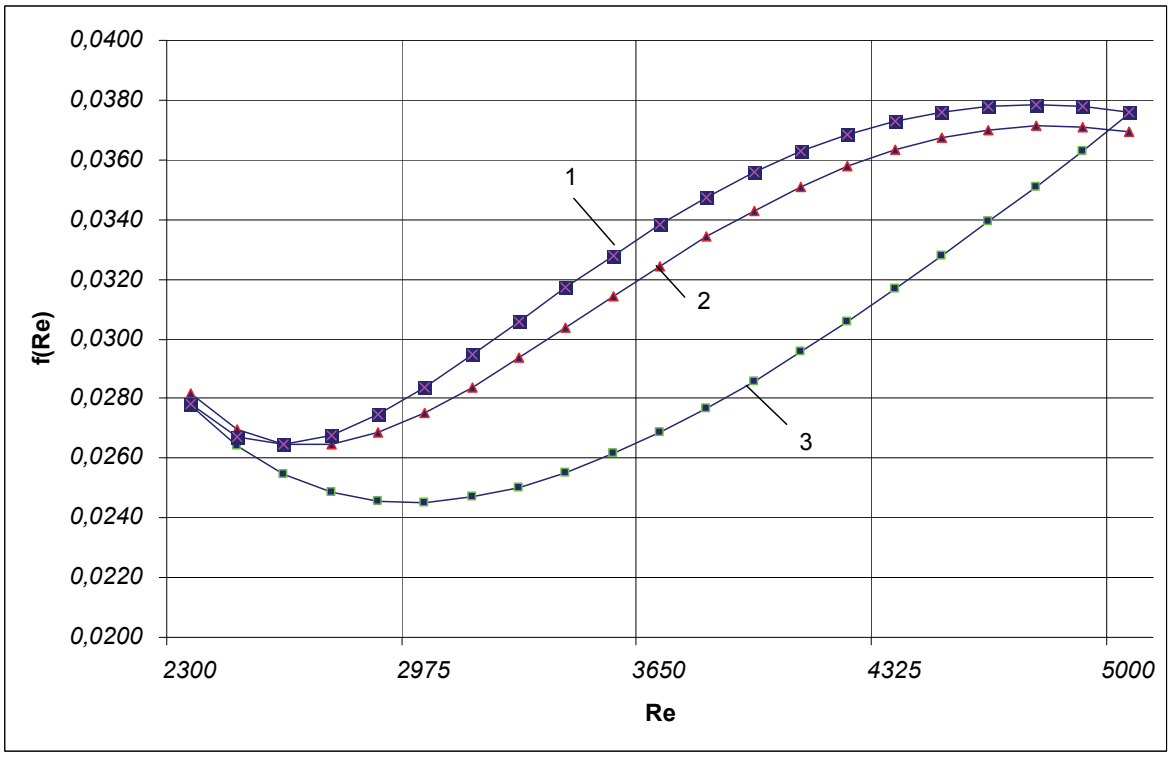


Рисунок 1. Графики зависимостей λ от числа Re:

1 – $\varphi(\mathrm{Re}) = -53.27 + 130.57\left(\frac{10}{\ln \mathrm{Re}}\right) - 106.46\left(\frac{10}{\ln \mathrm{Re}}\right)^2 + 28.89\left(\frac{10}{\ln \mathrm{Re}}\right)^3$

2 – $\varphi(\mathrm{Re}) = 101.81 - 135.01\mathrm{Re}^{0.1} + 59.65\mathrm{Re}^{0.2} - 8.78\mathrm{Re}^{0.3}$

3 – $\varphi(\mathrm{Re}) = 3.35 - 5.31\left(\frac{10}{\ln \mathrm{Re}}\right) + 2.12\left(\frac{10}{\ln \mathrm{Re}}\right)^2$

Выводы

Реализация предложенного способа расчета может быть выполнена как путем использования элементарной вычислительной аппаратуры, так и при помощи компьютерной программы. Нижнее и верхнее числа Рейнольдса задаются самим исследователем с учетом условий работы трубопровода. Способ получил экспериментальное подтверждение.

Полученные результаты могут быть применены при проектировании строительных машин и механизмов средней мощности, работающих при повышенных вибрациях. Зависимости для коэффициента гидравлического трения применяются для расчета трубопроводов для жидких строительных смесей.

Литература

1. Прегер Е. А., Самойленко Л. А. Исследование коэффициента гидравлического сопротивления трубопроводов при переходном режиме движения жидкостей и газов. Исследования по водоснабжению и канализации // Труды ЛИСИ, вып. 50. Л.: 1966. С. 27-39.
2. Рихтер Г. Гидравлика трубопроводов. М.-Л.: ОНТИ, 1936. 230 с.
3. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.
4. Розовский И. Л., Залуцкий И. В. О балансе энергии в равномерном турбулентном потоке // Гидравлика и гидротехника. Респ. межвед. н.-техн. сб. 1969. № 8. С. 16-23.

5. Самойленко Л. А. О явлении перемежаемости режимов движения жидкости // Сборник санитарной техники. Доклады ко 2 научной конференции молодых ученых-строителей. Л.: ЛИСИ,1967. С. 93-105.

6. Слисский П. М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений // Труды Московского энергетического института. Механика твердого тела и жидкости: темат. сб. М.: Наука, 1977. С. 35-37.

7. Альтшуль А. Д., Лудов В. А., Масловский А. К. Критическое число Рейнольдса в трубах и открытых потоках // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений: межвуз. науч. сб. Саратов: СПИ, 1990. С. 57-62.

8. Курганов А. М., Федоров Н. Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения. Л.: Стройиздат, 1986. 440 с.

9. Самойленко Л. А. Исследование гидравлических сопротивлений в трубопроводах в зоне перехода ламинарного движения в турбулентному. Автореф. дис. канд. техн. наук. Л.: ЛИСИ, 1968. 22 с.

10. Варфоломеева А. Н. Исследование гидравлических сопротивлений труб систем водяного охлаждения. Дис. канд. техн. Наук. М.: МИСИ, 1979, 237 с.

11. Айвазян О. М. О критерии устойчивости ламинарного движения // Гидротехническое строительство. 1985. № 2. С. 21-26.

12. Анискин В. М., Адаменко К. В., Маслов А. А. Экспериментальное определение коэффициентов гидравлического сопротивления прямолинейного и криволинейного микроканалов // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2010. Т. 5, № 3. С. 63-70.

13. Китайцева Е. Х., Яворовский Ю. В., Геневарев А. А. Оценка погрешности определения коэффициента гидравлического сопротивления // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2009. № 4. С. 30-32.

14. Краев В. М. Влияние гидродинамической нестационарности на гидравлическое сопротивление в трубе // Известия высших учебных заведений. Авиационнаятехника. 2003. № 4. С. 73-75.

15. Van De Velde F., De Baets P., Degrieck J. The friction force during stick-slip with velocity reversal // Wear. 1998. Vol. 216. № 2. Pp. 138-149.

16. Singh S., Singh T. N., Chauhan L. J. A rapid method of measuring shoot hydraulic resistance of rice: implications for efficient water use // Current Science. 2009. Vol. 96 № 4. Pp. 464-466.

17. Smith M. W., Cox N. J., Bracken L. J. Applying flow resistance equations to overland flows // Progress in Physical Geography. 2007. Vol. 31. № 4. Pp. 363-387.

18. Minhas H., Lock G. S. H. Laminar-turbulent transition in a bayonet tube // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1996. Vol. 17. № 2. Pp. 102-107.

19. Гиргидов А. Д. О лобовом сопротивлении движению цилиндра // Инженерно-строительный журнал. 2011. №1 (19). С. 9-11.

20. Гиргидов А. Д. Изменение диссипации энергии при переходе от ламинарного режима к турбулентному // Инженерно-строительный журнал. 2011. №5(23). С. 49-52.

21. Калякин А. М., Шевченко Д. Ф., Малюков С. А., Береда Н. Н. Результаты опытов по определению коэффициента гидравлического трения в переходной зоне (от ламинарного режима к турбулентному) // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2009. С. 57-61.

22. Никонова В. Т., Сауткина Т. Н. Определение коэффициента гидравлического трения при переходе от ламинарного режима движения жидкости к турбулентному // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2009. С. 61-65.

23. Калякин А. М., Чеснокова Е. В., Кожаева Е. И. Новый подход к определению коэффициента гидравлического трения в переходной зоне // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2010. С. 80-84.

** Елена Вадимовна Чеснокова, г. Саратов, Россия*

Тел. раб.: +7 (8452) 99-89-14; эл. почта: adamas.elena@gmail.com

Скорость свободного движения плохообтекаемых тел в жидкости

Д.т.н., профессор М.А. Михалев*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: физическое моделирование; гидравлическая крупность; числа подобия; критерии подобия; критериальное уравнение

Явление осаждения (или всплывания) различных тел в жидкости (или газе) широко используется в технических устройствах (отстойники, камеры флотации и аэрации, гидро- и пневмотранспорт и т.п.). Скорость осаждения или всплывания тел в жидкости или газе, называемая гидравлической крупностью, представляется важной характеристикой явления. Однако существующие трудности математического моделирования позволяют получить решение задачи осаждения в жидкой или газообразной среде плохообтекаемых тел только при очень малых числах Рейнольдса (ползущее, или стоксово течение).

Что же касается методов физического моделирования явления, то оно в основном базируется на результатах моделирования обтекания закрепленных тел набегающем внешним потоком, согласно известному постулату относительности движения. Но, несмотря на кажущуюся аналогию движущегося и обтекаемого с той же скоростью закрепленного тела, с позиций методов физического моделирования – это два различных явления: в первом скорость движения заранее не известна, во втором – она изначально задана [1,2]. Сведения о свободном движении тел в жидкости, содержащиеся в литературных источниках, посвященных физическому моделированию явлений, в основном базируются на результатах изучения воздействия внешнего потока, набегающего на закрепленное тело [3 – 8]. Как правило, приводятся графики зависимости коэффициента сопротивления (числа Эйлера) от числа Рейнольдса. Но в задаче о гидравлической крупности ни число Рейнольдса, ни коэффициент сопротивления не являются критериями подобия, так как содержат скорость движения тела, которая до проведения опытов не известна. Иными словами, для свободно движущегося тела упомянутая зависимость представлена не в критериальной форме, поэтому воспользоваться ею можно только методом последовательных приближений.

При изучении сложных явлений, так или иначе связанных с гидравлической крупностью частиц, возникает необходимость правильного учета влияния на эту скорость (или на коэффициент сопротивления) дополнительных факторов [9 – 11]. Например, если тело, кроме сил тяжести и архимедовой, испытывает воздействие еще какой-то силы [9], то это приведет к изменению характера обтекания тела жидкостью, величины коэффициента сопротивления, в конечном итоге – скорости движения тела. Турбулентность внешнего потока и относительное содержание в нем частиц (несвободное движение тел в жидкости) могут оказать существенное влияние на величину гидравлической крупности [10]. Убедительные сведения на этот счет содержатся в [12]. Любые исследования на физических моделях (или основанные на методах физического моделирования явлений) должны заканчиваться обработкой экспериментальных данных обязательно в критериальной форме [11]. Ниже на примере гидравлической крупности будет показано, каким образом эти требования можно реализовать на практике.

Рассмотрим задачу о гидравлической крупности подробнее, основываясь на методах физического моделирования гидравлических явлений [1].

В основу положим принцип относительности движения, как это принято в механике: процесс обтекания тела одинаков, если закрепленное тело обтекается потоком с той же скоростью, с которой движется тело самостоятельно. Собственно, на этом принципе основывается физическое моделирование моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах. Будем учитывать пока только процессы во внешней среде, возникшие вследствие перемещения в ней тела (движение самого тела обязательно учтем ниже).

Отметим, что при стационарном равномерном движении тела в ньютоновской жидкости (несжимаемой или сжимаемой, но вдали от области, где сжимаемость среды начинает оказывать сопротивление движению – при малых числах Маха) явление характеризуется тремя числами подобия: Рейнольдса, Фруда и Эйлера. Среди них нет ни одного критерия, так как во все числа в качестве характерной входит заранее неизвестная скорость осаждения (или всплывания) ω_0:

$$\mathrm{Re}=\frac{\omega_0 d}{\nu};\ \mathrm{Fr}_\rho=\frac{\omega_0^2\,\rho}{g\,d\,(\rho_1-\rho)};\ \mathrm{Eu}=\frac{\Delta p}{\rho\,\omega_0^2}.$$

Здесь d – характерный линейный размер тела, в качестве которого чаще всего принимается объем шара, равный объему тела; ν и ρ – вязкость и плотность жидкости; ρ_1 – плотность вещества, из которого состоит плохо обтекаемое тело; Δp – перепад давления вдоль контура тела, возникающий вследствие его обтекания внешним потоком жидкости; g – ускорение силы тяжести. Число подобия, обозначенное символом Fr_ρ, называют «плотностным числом Фруда», поскольку в него в качестве активной силы входит разность между силой тяжести и архимедовой силой. Эта разность определяет поведение тела в жидкости: если $\rho_1>\rho$, то тело тонет в жидкости, а если $\rho_1<\rho$, то оно всплывает.

Необходимо остановиться на величине перепада давления, в которую входят две составляющие. Первая, называемая сопротивлением формы тела, возникает вследствие особенности распределения давления по контуру тела: если тело имеет симметричную форму относительно продольной оси своего движения, то это разность между давлением в лобовой и кормовой областях тела. Вторая определяется силой трения, которую испытывает жидкость со стороны контура тела при его обтекании (отсюда и ее название – сопротивление трения). Этим объясняются большие трудности при определении перепада давления. На практике они преодолеваются путем замены перепада давления отношением силы сопротивления к площади приложения ее на контуре тела. Если тело закреплено, то при проведении опытов сила сопротивления легко определяется. Для свободно падающего тела силу сопротивления F_w можно вычислить, если задать ее формулу:

$$F_w=C_w\rho\frac{\omega_0^2}{2}S;\quad \frac{F_w}{S}=\frac{C_w}{2}\rho\,\omega_0^2\ , \tag{1}$$

где C_w – коэффициент сопротивления; S – площадь приложения силы сопротивления. Запишем число Эйлера и примем $\Delta p=F_w/S$ в соответствии со второй формулой в (1), получим:

$$\mathrm{Eu}=\frac{\Delta p}{\rho\,\omega_0^2}=\frac{C_w}{2}\ . \tag{2}$$

Таким образом, если задать силу сопротивления формулой (1), то число Эйлера с точностью до постоянной станет равным коэффициенту сопротивления, входящему в виде сомножителя в эту формулу.

Воспользуемся далее условием равномерного движения тела в жидкости. Оно заранее известно, ради него не нужно ставить эксперимент, достаточно приравнять силу тяжести F_g (с учетом архимедовой силы), приложенную к телу, силе сопротивления:

$$F_g=F_w;\quad Vg(\rho_1-\rho)=\frac{C_w}{2}\rho\,\omega_0^2\,S\ , \tag{3}$$

где V – объем тела. Примем отношение V/S равным d, а постоянную, в общем случае зависящую от формы тела, введем в коэффициент сопротивления. После преобразований из (3) найдем:

$$\frac{g\,d(\rho_1-\rho)}{\omega_0^2\,\rho}=\frac{C_w}{2};\quad \frac{1}{\mathrm{Fr}_\rho}=\frac{C_w}{2}=\mathrm{Eu}\ . \tag{4}$$

Таким образом, из условия равномерного движения тела в жидкости получается, что число Эйлера,равное половине коэффициента сопротивления, обратно пропорционально плотностному числу Фруда. Следует отметить, что величину коэффициента сопротивления после определения гидравлической крупности в результате проведения экспериментов находят из левого уравнения, содержащегося в (4). Получается, что явление определяется не тремя, а только двумя числами подобия. Имея в виду дальнейшие преобразования, оставим для анализа числа подобия Рейнольдса и плотностное число Фруда. Используя метод комбинаций чисел подобия [1], найдем следующий критерий подобия:

$$\frac{\mathrm{Re}^2}{\mathrm{Fr}_\rho}=\frac{gd^3(\rho_1-\rho)}{\nu^2\rho}=\mathrm{Ar}\ , \tag{5}$$

который называется числом (в данном случае – критерием) Архимеда. В связи с тем, что критерий заменяет только одно число подобия, критериальное уравнение можно представить в двух видах:

$$\mathrm{Re}=f(\mathrm{Ar});\quad \mathrm{Fr}_\rho=\varphi(\mathrm{Ar})\ . \tag{6}$$

Приведем формулы, соответствующие первому и второму критериальному уравнению в (6), полученные в результате осаждения частиц кварца в воде. В области стоксова течения, которому соответствуют следующие условия: $\mathrm{Re}<1;\quad \mathrm{Ar}<16;\quad \mathrm{Fr}_\rho<0{,}0625;\quad d<0{,}01см$, имеем:

$$\mathrm{Re}=\frac{\mathrm{Ar}}{18};\quad \mathrm{Fr}_\rho=\frac{\mathrm{Ar}}{18^2}\ . \tag{7}$$

В области квадратичного сопротивления, существование которой определяют условия: $\mathrm{Re}>100;\quad \mathrm{Ar}>1{,}6\cdot10^4;\quad \mathrm{Fr}_\rho>0{,}625;\quad d>0{,}1см$, получено:

$$\mathrm{Re}=1{,}2\mathrm{Ar}^{0,5};\quad \mathrm{Fr}_\rho=1{,}2^2\ . \tag{8}$$

В области, переходной от стоксова течения до квадратичного сопротивления, найдены следующие зависимости:

$$\mathrm{Re}=\frac{\mathrm{Ar}}{18+0{,}61\mathrm{Ar}^{0,5}};\quad \mathrm{Fr}_\rho=\frac{\mathrm{Ar}}{(18+0{,}61\mathrm{Ar}^{0,5})^2}\ . \tag{9}$$

Помимо непосредственного использования рассмотренных зависимостей для определения величины гидравлической крупности, отметим еще один метод, с помощью которого на практике решается обратная задача. Он заключается в определении размеров мелких частиц в области стоксова движения после измерении в эксперименте их гидравлической крупности. Далее расчетом из соответствующей формулы определяется линейный размер частиц. Распространим этот метод и на другие области осаждения плохообтекаемых тел, имея в виду возможность его использования не только для определения размеров тел, но и для нахождения вязкости и плотности жидкости, а также плотности вещества, из которого состоят тела. Решим эту задачу, используя методы физического моделирования явлений.

Задача формулируется так, что в ней изначально не заданы ни скорость осаждения, ни линейный размер тела. Но после того как будет выполнен эксперимент, станет известна гидравлическая крупность. Однако среди чисел подобия критерии не появятся, поскольку характерный линейный размер тела не задан. Опуская часть приведенных выше обоснований вывода критериальных уравнений (о числе Эйлера, об использовании интегральных условий движения и т. п.), получим критерий подобия в рассматриваемой задаче. Он равен произведению числа Рейнольдса на число Фруда, так как в такую комбинацию чисел подобия не входит характерный линейный размер тела. Полученная комбинация называется числом (в данном случае это критерий) Келегана, обозначается Ke .

Заметим, что корень кубический из числа Келегана есть безразмерная гидравлическая крупность, которую обозначим символом $\overline{\omega}$. Имеем:

$$\mathrm{ReFr}_{\rho}=\frac{\omega_0^3\,\rho}{\nu g(\rho_1-\rho)}=\mathrm{Ke};\quad \sqrt[3]{\mathrm{Ke}}=\overline{\omega}=\omega_0\sqrt[3]{\frac{\rho}{\nu g(\rho_1-\rho)}}\ . \tag{10}$$

Отметим также, что корень кубический из числа Архимеда есть безразмерный линейный размер тела, который обозначим символом $\overline{d}$:

$$\mathrm{Ar}=\frac{gd^3(\rho_1-\rho)}{\nu^2\rho};\quad \sqrt[3]{\mathrm{Ar}}=\overline{d}=d\sqrt[3]{\frac{g(\rho_1-\rho)}{\nu^2\rho}}\ . \tag{11}$$

В связи с тем, что и число Рейнольдса, и число Фруда являются функциями числа Архимеда, то естественно, что их произведение (число Келегана) будет тоже функцией этого числа. Но, как об этом было сказано выше, число Келегана в поставленной задаче является критерием, поэтомукритериальное уравнение будет таким:

$$\mathrm{Ar}=F_1(\mathrm{Ke})\ . \tag{12}$$

В таком виде связь между числами подобия Архимеда и Келегана в переходной области выражается в виде уравнения четвертой степени, решение которого можно получить только методом последовательного приближения. В практических приложениях гораздо проще рассматривать обратную связь между этими числами. Иными словами, если связь между числами подобия вида (2) доказана, то справедлива и обратная зависимость:

$$\mathrm{Ke}=F(\mathrm{Ar});\quad \overline{\omega}=f(\overline{d})\ . \tag{13}$$

Обратимся к приведенным выше формулам с тем, чтобы получить в явном виде зависимости (13).

В области стоксова течения, в которой $\overline{d}<2{,}52$; $\overline{\omega}<0{,}35$, получим, используя формулы (7):

$$\mathrm{Ke}=\mathrm{ReFr}_{\rho}=\frac{\mathrm{Ar}^2}{18^3};\quad \overline{\omega}=\frac{\overline{d}^{\,2}}{18}\ . \tag{14}$$

В области квадратичного сопротивления, существующей при условиях $\overline{d}>25{,}2$; $\overline{\omega}>6$, найдем, обращаясь к формулам (8):

$$\mathrm{Ke}=1{,}2^3\,\mathrm{Ar}^{0,5};\quad \overline{\omega}=1{,}2\,\overline{d}^{\,0,5}\ . \tag{15}$$

В области, переходной от стоксова течения до квадратичного сопротивления, получим, используя формулы (9):

$$\mathrm{Ke}=\frac{\mathrm{Ar}^2}{(18+0{,}61\mathrm{Ar}^{0,5})^3};\quad \overline{\omega}=\frac{\overline{d}^{\,2}}{18+0{,}61\overline{d}^{\,1,5}}\ . \tag{16}$$

В рамках сформулированной выше задачи приведенные формулы позволяют сравнительно легко по величине $\overline{\omega}$, найденной в результате проведения опыта, определить величину $\overline{d}$, а из нее расчетом – d . Как уже было отмечено ранее, исключение представляют расчеты по формулам (16), которые можно выполнить только методом последовательного приближения. Решение обратной задачи – поиск по величине $\overline{d}$ величины $\overline{\omega}$ – реализуется без преодоления каких-либо трудностей. Следует только отметить, что по величинам $\overline{\omega}$ и $\overline{d}$, предварительно найденным в результате выполненных опытов или расчетов, нужно установить область движения, границы которых указаны выше перед соответствующими формулами.

Предложенная здесь методика расчетов скорости осаждения может быть использована для нахождения других параметров, определяющих явление. Например, правые формулы в зависимостях (7) и (9) позволяют по результатам опыта, в котором была установлена величина скорости осаждения и рассчитано число Фруда, найти число Архимеда, а из него – коэффициент кинематической вязкости среды (в области квадратичного сопротивления явление не зависит от вязкости среды, где происходит движение тела). Из левых формул зависимостей (7), (8) и (9) аналогичным образом находится число Рейнольдса, по его величине – область движения и число Архимеда, а из последнего уравнения – либо плотность вещества, из которого состоит тело, либо плотность среды.

Выводы

В заключение следует обратить внимание на обобщающий характер предложенных зависимостей, учитывающих влияние на процесс осаждения (или всплывания) плохообтекаемых тел основных сил: вязкого трения, тяжести, Архимеда. Если явления относятся к одному классу, то совсем не важно, какие в них вязкость и плотность среды, а также плотность вещества, из которого состоит тело, лишь бы были одинаковы числа подобия, тогда такие явления будут описываться одними и теми же зависимостями. К таким явлениям можно отнести: осаждение тяжелых частиц в водной и воздушной средах, капель воды в воздухе, всплывание пузырьков воздуха в воде и т. п.

Литература

1. Михалев М. А. Физическое моделирование гидравлических явлений: Учебное пособие / СПбГПУ. СПб., 2008. 443 с.
2. Михалев М. А. Теория подобия и размерностей: Учебное пособие. СПб.: СПбГТУ, 2001. 68 с.
3. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. Л.: Энергия. 1967. 235 с.
4. Зегжда А. П. Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей. Л.–М.: Госстроойиздат. 1938. 162 с.
5. Шарп Дж. Гидравлическое моделирование. М.: Мир. 1984. 280 с.
6. Graf W. H. Hydraulics of Sediment Transport. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970. 513 p.
7. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 904 с.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука. 1969. 737 с.
9. Ватин Н. И., Гиргидов А. А., Стрелец К. И. Численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне // Инженерно-строительный журнал. 2011. №5. С. 5–9.
10. Маркелова Е. А. Технология применения активной примеси при строительстве и эксплуатации подводных трубопроводов // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2. С. 55–62.
11. Ватин Н. И., Стрелец К. И, Китаин М. Б. Определение характеристик сварочных искр для расчета их удаления в циклоне // Инженерно-строительный журнал. 2011. №5. С. 25–30.
12. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971. 536 с.

** Михаил Андреевич Михалев, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)535-46-10; эл. почта: mikhalev@cef.spbstu.ru

Динамика потока воды, возникающего при опорожнении камеры судоходного шлюза

Аспирант Д.А. Мильцын*,
ФБОУ ВПО Волжская государственная академия водного транспорта

Ключевые слова: система опорожнения шлюза; математическое моделирование; гидродинамика потока

Согласно концепции развития транспорта Российской Федерации на период до 2030 года [1] намечается активное вовлечение внутреннего водного транспорта в освоение увеличивающегося грузооборота страны. Наша страна готовится предоставить свои водные пути для транзитного прохождения судов иностранных перевозчиков, в связи с чем увеличение судопотока через Единую глубоководную систему Российской Федерации в среднесрочной перспективе неизбежно.

Анализ возрастного состава судоходных гидротехнических сооружений (СГТС) показывает, что порядка 75% сооружений были возведены более полувека назад и, в настоящее время, нуждаются в значительных финансовых затратах для проведения различного вида ремонтов. Физический и моральный износ сооружений достигает пороговых значений, требуется серьезная техническая модернизация для удовлетворения современным условиям эксплуатации и повышения конкурентоспособности внутреннего водного транспорта.

Как показали последние исследования в области эксплуатации СГТС, наиболее слабым звеном системы внутреннего водного транспорта являются судоходные шлюзы. Это обусловлено как длительным сроком эксплуатации, так и значительным исчерпанием ресурсов увеличения судопропускной способности сооружений. Таким образом, сложилась нынешняя ситуация, при которой судопропускная способность шлюзов становится серьезным препятствием на пути развития транспортной инфраструктуры в нашей стране, а исследования повышения пропускной способности и повышения безопасности эксплуатации судоходных шлюзов становятся с каждым годом всё более востребованными и актуальными.

Систематизация существующих методов увеличения пропускной способности шлюзованных участков представлена в работе А.М. Гапеева [2]. Им был проанализирован большой объем информации по этому вопросу, в результате было выделено четыре основных направления интенсификации и блоки организационно-технических мероприятий по их реализации.

1. Совершенствование организации, методов и средств управления движением судов по шлюзованным водным путям. Для этого предлагается модернизация системы судоходной обстановки, обеспечение рациональных скоростей движения, организация работы диспетчерских служб, внедрение систем автоматизированного управления движением флота, специальная проводка судов на затруднительных участках, организация движения судов в коротких межшлюзовых бьефах, разработка руководящих документов по пропуску флота. В этом направлении велись разработки такими учеными нашей страны, как С.М. Пьяных [3], А.Г. Малышкин [4], В.Н. Белых, В.И. Кожухарь [5], Д.А. Зернов [6], А.Н. Клементьев [7] и другие. Сходными вопросами регулирования движения флота на подходах к судоходным сооружениям и созданием численных имитационных моделей системы «судно-шлюз» занимались зарубежные исследователи [8].

2. Ускорение пропуска судов через судоходные шлюзы. Для этого предлагается рациональное проектирование систем питания, элементов и конструкций шлюза, выбор рациональных режимов наполнения и опорожнения камер, обеспечение оптимальных условий для движения судов в пределах шлюза, проводка судов через шлюзы, использование транзитных пропусков воды, регулирование волновых колебаний в подходных каналах шлюзов, сокращение непроизводственных простоев шлюза, организация работы шлюза и его техническое обслуживание. Большое внимание данным методам ускорения судопропуска уделяется в работах И.В. Липатова [9] и В.А. Кривошея [10].

3. Техническое совершенствование сооружений, их конструкций, оборудования и механизмов с целью увеличения их надежности. Для этого предлагаются устройства для поперечного перемещения судов на ось шлюза, модернизация конструкции плавучих рымов, использование автошвартовых устройств и других средств механизированной учалки, устройство боковых продольных галерей вдоль шлюза, предохранительные устройства для защиты ворот от навала судов, опорно-ходовые устройства ворот и затворов, строительство судопропускных

сооружений для пропуска мелкотоннажного флота. Применительно к данному блоку следует выделить работы ученых Санкт-Петербургского университета водных коммуникаций В.В. Баланина [11], В.В. Клюева [12] и ряда других, а также зарубежных авторов [13, 14, 15].

4. Продление навигационного периода работы шлюзованного водного пути. Для этого предлагаются мероприятия по обеспечению работы судов и предприятий речного транспорта в ледовых условиях, обеспечение нормальных путевых условий, обеспечение работы судоходных шлюзов при отрицательных температурах воздуха.

В работах, посвященных ускорению пропуска судов через судоходные сооружения, процесс опорожнения камеры судоходного шлюза затрагивался достаточно редко. При этом сокращение времени опорожнения камеры шлюза ведет к ускорению процесса шлюзования и увеличению пропускной способности сооружения, а поток воды, поступающий из камеры в нижний подходной канал, определяет условия отстоя судов на подходах к шлюзу. Следовательно, процесс опорожнения непосредственным образом связан как с машинной, так и с движенческой составляющей пропускной способности сооружения, а его исследования могут открыть новые резервы пропускной способности СГТС и повысить их эксплуатационную надежность.

Натурные испытания на действующих судоходных шлюзах являются крайне дорогостоящими и не всегда способны предоставить исследователям всю необходимую информацию об особенностях гидродинамики потока. В связи с этим одним из наиболее перспективных методов проведения исследований, связанных с изучением структуры потока воды, возникающего при опорожнении камеры судоходного шлюза, становится математическое моделирование.

В отличие от традиционных гидравлических подходов математическое моделирование позволяет использовать не осредненные величины таких характеристик, как давление, скорость и ряда других, а значения в конкретных точках, что дает возможность рассматривать структуру потока на более качественном уровне.

С развитием в последнее десятилетие расчетных возможностей персональных компьютеров и появлением мощных кластерных систем методика численного моделирования гидродинамики получила широкое распространение. Математическое моделирование применяется при исследовании структуры потока воды, возникающего при наполнении камеры судоходного шлюза [16], при расчетах прочности гидротехнических сооружений с учетом действия сейсмических нагрузок [17], водосбросных сооружений крупнейших гидроузлов [18], для определения динамических нагрузок на сооружения [19].

Основой математического моделирования опорожнения камеры шлюза через короткие обходные галереи является решение системы, состоящей из гидродинамических уравнений, включающих уравнения движения реальной вязкой жидкости (например, в форме, предложенной Навье-Стоксом), уравнения неразрывности, математической модели турбулентности и ряда других [20].

Рассмотрим более подробно результаты моделирования, связанные с выходом потока из системы опорожнения шлюза в нижний подходной канал.

При моделировании были рассчитаны две типовые для ЕГС РФ системы опорожнения шлюзов: Городецкого района гидротехнических сооружений, в которой выпуск воды в нижний бьеф осуществлялся через систему из 31 водовыпуска шириной 0,3 метра, расположенных между балками гашения шириной 0,7 метра, а также Чайковского района гидротехнических сооружений, где выход потока воды из галерей в нижний подходной канал осуществляется по всей ширине нижнего бьефа без гашения энергии потока балками.

Результаты моделирования описанных систем опорожнения представлены на рис. 1 и 2.

Результаты расчетов показывают, что для системы гашения с балками расход распределяется по ширине нижнего бьефа крайне неравномерно со значительным пиком ближе к середине. Начиная от края камеры, расход через водовыпуски растет достаточно интенсивно и равномерно, увеличиваясь по направлению к оси симметрии (у двенадцатого выпуска) более чем вдвое. После этого наблюдается небольшой спад у центральных выпусков. Распределение расхода в галереях А (ближняя к воротам шлюза) и Б (дальняя от ворот шлюза) сходны и различаются только средней величиной.

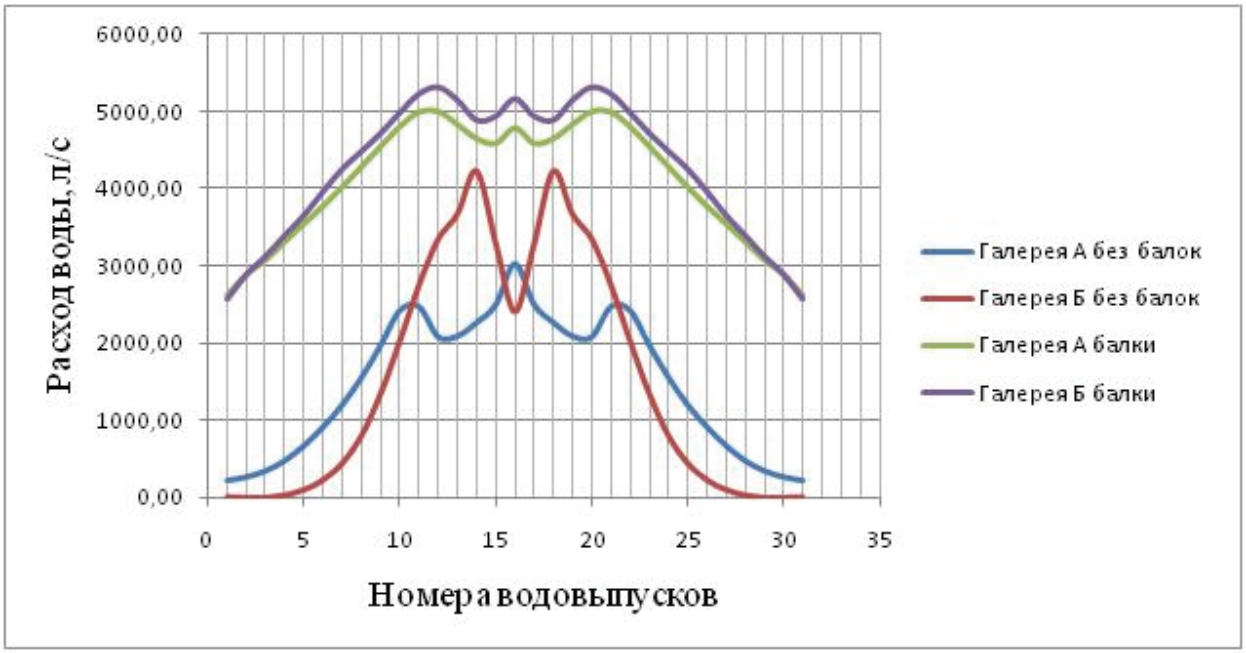


Рисунок 1. Распределение расхода воды при выходе потока из галерей в нижний подходной канал

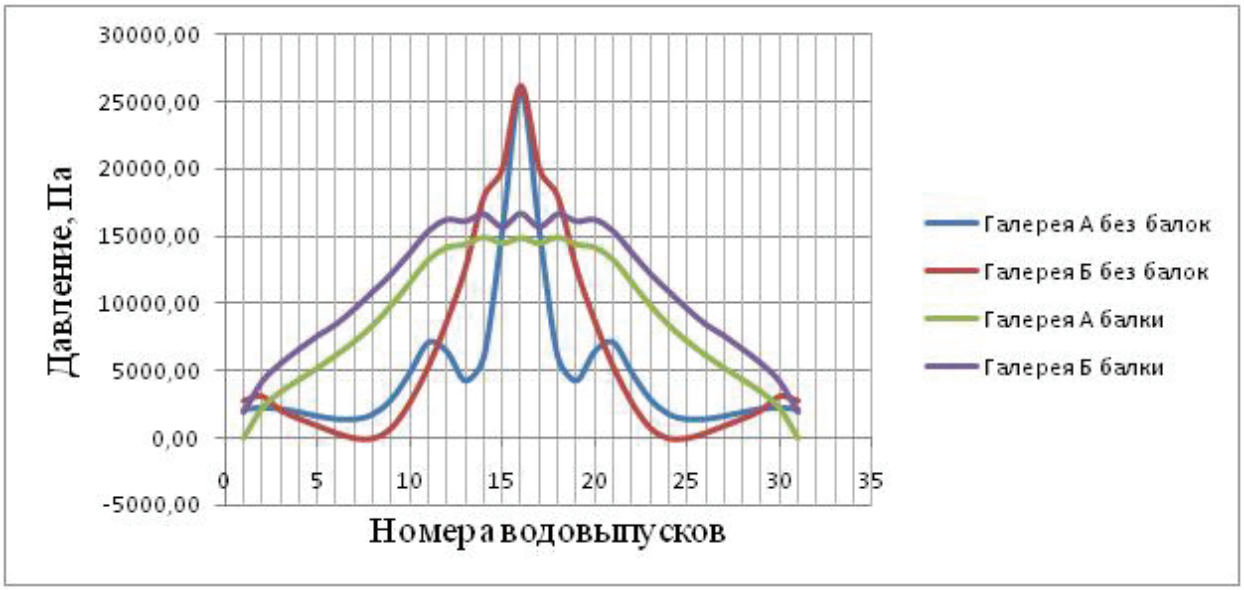


Рисунок 2. Превышение давления в средней части нижнего подходного канала при выходе потока из галерей в нижний бьеф

Рассмотрим подробнее, с чем связано такое поведение потока при обтекании балок гашения в нижнем бьефе. На рис. 3 представлено распределение скоростей в области под балками гашения и между ними при опорожнении камеры шлюза.

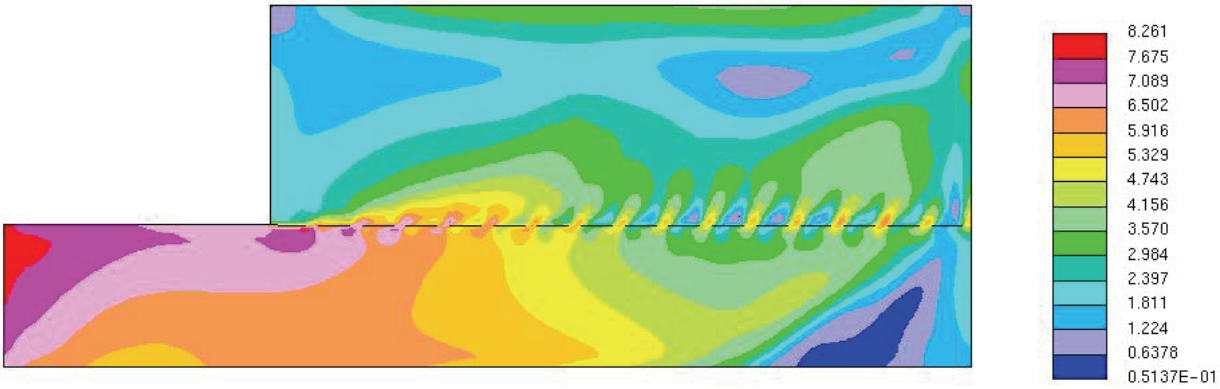


Рисунок 3. Поле скоростей воды при выходе из опорожняющих галерей в нижний бьеф

При выходе потока воды под балки гашения в галереях преобладают векторы скорости, направленные в горизонтальной плоскости XY. В связи с этим под первыми выпускными отверстиями поток проходит транзитом, и расход воды через них крайне мал. По мере удаления от края галереи в потоке начинают возрастать восходящие скорости, и расход через водовыпуски равномерно увеличивается. Небольшой спад выпуска воды в середине сечения подходного канала связан со столкновением двух противоположно направленных потоков воды в галерее. В результате этого столкновения под центральными балками гашения образуется сложная вихревая зона, которая сжимает живое сечение галереи и снижает расход через водовыпуски. Таким образом, на выходе потока воды из системы опорожнения в нижний бьеф формируется сложная эпюра скоростей, плавно изменяющаяся по мере продвижения к плоскости симметрии шлюза.

Неравномерность распределения расхода при выходе в нижний бьеф приводит к более быстрому износу центральных балок, а также к замедлению процесса опорожнения камеры.

В процессе выхода потока из системы опорожнения в нижний бьеф наблюдается значительное повышение уровня воды над центральными балками гашения, что приводит к формированию продольного (вдоль направления течения потока) и поперечного (от центральных балок к крайним) уклонов. Величины этих уклонов оказывают непосредственное влияние на формирование волновых явлений и условия отстоя судов в нижнем подходном канале шлюза.

Распределение расхода по всей ширине нижнего бьефа для системы опорожнения без балок гашения крайне неравномерно. Основной поток (порядка 80% от общего расхода) сосредоточен в центральной зоне сечения и приходится не более чем на треть ширины нижнего подходного канала. Расход воды через крайние участки выхода практически равен нулю. При этом амплитуда колебания расхода по длине галерей достигает местами 4000 см^3/с против 2000 см^3/с у системы с балками гашения.

Повышение градиентов давления в центральной части сечения галерей над крайними участками, характеризующее поперечный уклон в нижнем подходном канале, показывает значительное повышение уровня воды в середине сечения. Мгновенный поперечный уклон для данной системы может достигать величин 0,15-0,17 против не более 0,10 для системы с балками гашения.

Максимальная величина мгновенного повышения уровня воды в нижнем бьефе напрямую определяет продольный уклон воды в нижнем подходном канале и волновые явления при опорожнении камеры шлюза. Для системы с балками гашения эта величина не превышает 1,5 метров, тогда как для системы без балок она достигает 2,5 метров.

Сравнение результатов расчета для системы опорожнения судоходного шлюза с балками гашения и без них показывает значительные преимущества первой системы. Наличие балок гашения обеспечивает более плавное распределение расхода потока при выходе в нижний бьеф, уменьшение поперечного и продольного уклонов воды и, как следствие, лучшие условия отстоя судов в нижнем подходном канале.

Несмотря на описанные преимущества системы выпуска воды в нижний бьеф с балками гашения, типовая схема расположения балок не обеспечивает в полной мере возложенных на неё функций. Поскольку система выпуска воды в нижний бьеф состоит из балок равного размера, расположенных на равных расстояниях друг от друга, она способна только частично гасить энергию потока, практически не влияя на распределение расхода воды по ширине нижнего подходного канала.

В связи с этим были предложены две новые схемы расположения балок гашения и выпускных отверстий системы опорожнения судоходного шлюза, представленные на рис. 4.

Первая схема (Б на рис. 4) с дифференцированной шириной выпусков воды характеризуется сужением отверстий от краев к середине поперечного сечения нижнего бьефа. При этом количество выпусков и их местоположение принято таким же, как и в типовой схеме водовыпусков Городецких шлюзов.

Вторая схема (В на рис. 4) с дифференцированным расположением выпусков предполагает изменение не размеров выпусков, а их местоположение. Расстояние между выпусками, то есть ширина балок гашения, увеличивается по мере движения от крайних балок к центральным.

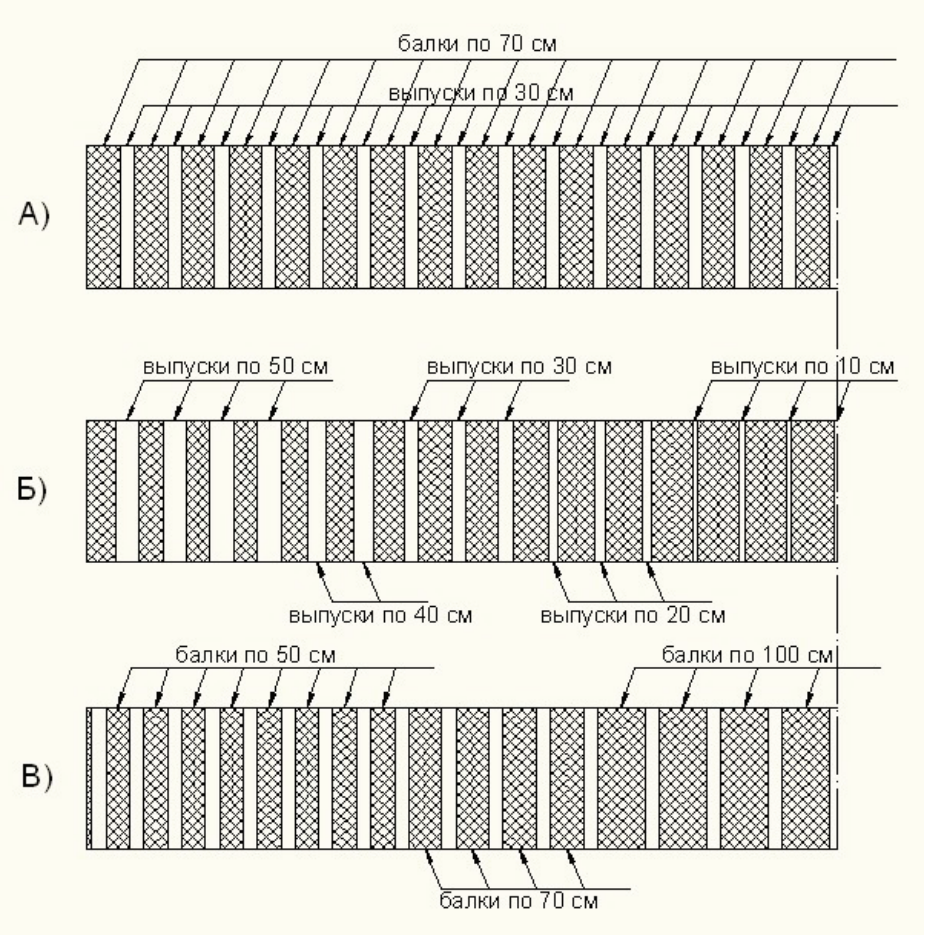


Рисунок 4. Схемы расположения балок гашения и водовыпусков при выходе потока в нижний бьеф: а) типовая схема Городецких шлюзов; б) предложенная схема с дифференцированной шириной выпусков; в) предложенная схема с дифференцированным расположением выпусков

Аппарат математического моделирования позволяет, внося небольшие изменения в геометрические характеристики модели, рассчитать необходимые параметры системы опорожнении для предложенных схем расположения выпусков воды. При этом в отличие от традиционных лабораторных исследований подобного класса задач численное моделирование позволяет избежать влияния на расчеты масштабного фактора и получить достоверные результаты исследуемых параметров.

Мгновенные повышения уровней воды в центральной части выпусков для рассматриваемых схем представлены на рис. 5 и 6.

Анализ расчетов показывает, что для предложенных схем расположения водовыпусков повышение уровня воды над центральными балками ниже, чем для типовой схемы системы опорожнения Городецких шлюзов. Для галереи А максимальное поднятие уровня снижается с 1,5 м при типовой схеме до 1,1 м – при схеме Б и 1,2 м – при схеме В. Для галереи Б максимальное поднятие снижается с 1,6 м при типовой схеме А до 1,0 м – при схеме Б и 1,4 м – при схеме В. Следует отметить, что для галереи Б также наблюдается расширение зоны подъема уровня вдвое при расположении балок гашения по схеме Б.

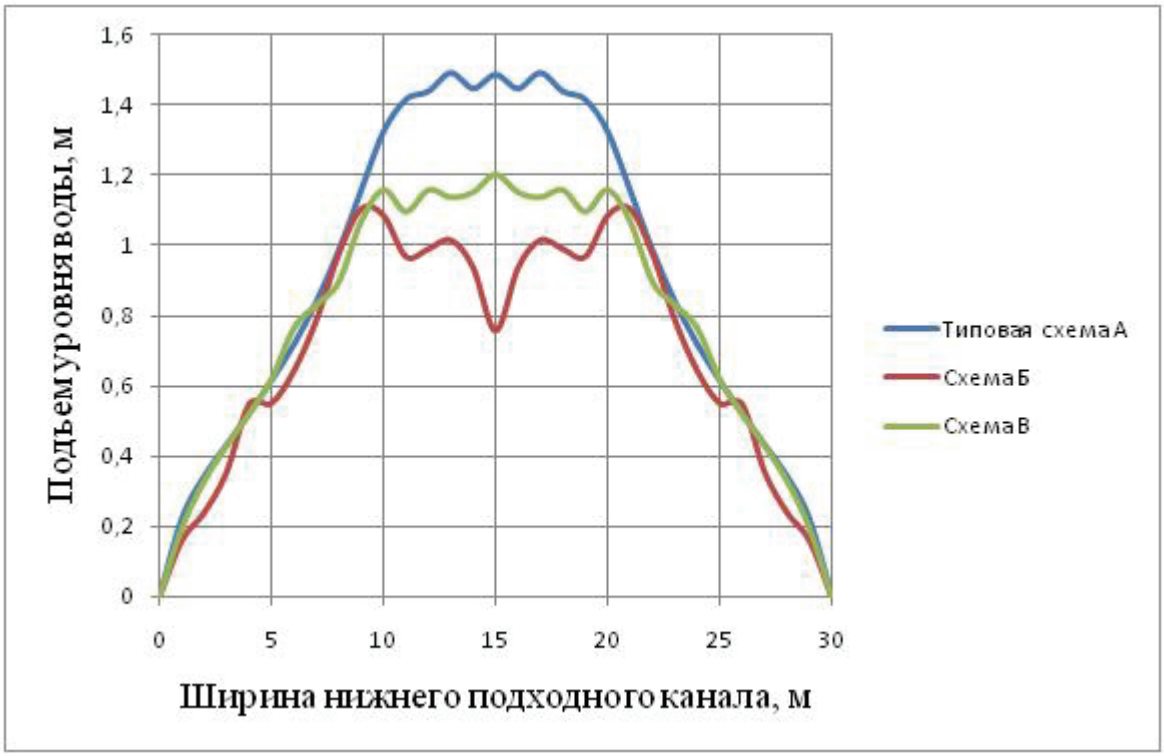


Рисунок 5. Подъем уровня воды в центральной части галереи А

Рисунок 6. Подъем уровня воды в центральной части галереи Б

Снижение максимальной величины подъема уровня воды и расширение зоны подъема приводит к уменьшению продольного и поперечного уклона поверхности воды в нижнем подходном канале и улучшению условий отстоя судов.

Предложенные схемы расположения водовыпусков системы опорожнения Б и В имеют ряд несомненных преимуществ перед типовой схемой А. Применительно к данной исследуемой системе опорожнения Городецких шлюзов наилучшие условия отстоя судов будут наблюдаться при схеме балок гашения с дифференцированной шириной водовыпусков.

Таким образом, исследования на численной модели позволили проанализировать гидродинамику потока на выходе из системы опорожнения судоходного шлюза в нижний подходной канал и показать недостатки некоторых применяемых в настоящее время типовых систем гашения энергии потока. Для типовой системы опорожнения с короткими обходными галереями были разработаны два варианта новой системы гашения энергии при выходе потока воды в нижний бьеф. Расчеты предложенных схем показали, что их использование способно привести к уменьшению продольного и поперечного уклонов поверхности воды в нижнем подходном канале и улучшению условий отстоя судов, ожидающих шлюзования.

Литература

1. Концепция развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации (одобрена Правительством РФ № 909-р от 03.07.2003) // Речной транспорт. 2003. № 5. С. 21–37.
2. Гапеев А. М. Совершенствование эксплуатационных качеств судоходных шлюзов с головной системой питания: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.22.19. СПб.: СПГУВК, 1998. 20 с.
3. Пьяных С. М. Ускорение пропуска судов через шлюзы // Производственно-технический сборник ТУ МРФ. Вып. 4. М.: Транспорт, 1965. С. 15–17.
4. Малышкин А. Г. Организация и планирование работы речного флота. М.: Транспорт, 1985. 215 с.
5. Белых В. Н., Кожухарь В. И. Об одном из возможных вариантов оптимизации судопропуска на шлюзованных системах // Труды ГИИВТа. 1989. Вып. 219. С. 3–15.
6. Зернов Д. А. Пути повышения пропускной способности судоходных сооружений // Проблемы повышения эффективности водного транспорта. М.: Транспорт, 1983. С. 82–88.
7. Клементьев А. Н. Движение и маневрирование судов при прохождении судопропускных гидротехнических сооружений: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.22.19. Н. Новгород: ВГАВТ, 1998. 54 с.
8. Bačkalić Todor, Bukurov Maša. Modelling of the ship locking process in the zone of ship lock with two parallel chambers // Annals of faculty engineering Hunedoara. TomeIX. 2011. Fascicule 1. Pp. 187–192.
9. Липатов И. В. Совершенствование процесса судопропуска через шлюзы на примере Городецкого района гидросооружений: автореф. дис. кан. техн. наук: 05.22.19. Н. Новгород: ВГАВТ, 1996. 21 с.
10. Кривошей В. А. Гидродинамические нагрузки, действующие на подьемно-опускные ворота шлюзов: автореф. дис. кан. тех. наук: 05.23.07. Л.: 1985. 31 с.
11. Баланин В. В. Оптимальные запасы в камерах шлюзов // Речной транспорт. 1982. № 10. С. 40–41.
12. Клюев В. В., Гапеев А. М. Ускорение пропуска судов через шлюзы // Речной транспорт. 1980. № 11. С. 38–39.
13. Kuhn R. Die Schleusen des Maln-Donau-Kanals // Baulngenleur. 1971. Bd. 46, № 5. Pp. 163-184.
14. Lausen R. Gutachten über die Steuerung der Schütze im Fill – und Entleiherbetrieb. Karlsruhe: BAW, 2000. 94 p.
15. Torenz K. Gutachten über die seitliche Einleitung von eberschuss wasser in den Einfahrtsbereich der Schleuse Nurnberg. Karlsruhe: Bundesanstaltfür Wasserbau (BAW). № 3.03.10043.00, 2003. 68 p.
16. Липатов И. В. Разработка средств и методов улучшения технико-эксплуатационных параметров работы судоходных шлюзов: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.22. Н. Новгород : ВГАВТ, 2006. 31 с.
17. Абдикаримов Р. А., Эшматов Х., Бобаназаров Ш. П., Ходжаев Д. А., Эшматов Б. Х. Математическое моделирование и расчет гидротехнических сооружений типа плотины-пластины с учетом сейсмической нагрузки и гидродинамического давления воды // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3 (21). С. 59–70.
18. Гиргидов А. А. Гибридное моделирование в проектировании гидротехнических сооружений и FLOW-3D® как средство его реализации // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3 (21). С. 21–27.
19. Козинец Г. Л. Определение динамических характеристик сооружений, контактирующих с водой, на примере арочной бетонной плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 5 (23). С. 43–48.
20. Чугаев Р. Р. Гидравлика. Л.: Энергия, 1975. 552 с.

**Дмитрий Алексеевич Мильцын, Нижний Новгород, Россия*

Тел. моб.: +7(905)86-86-044; эл. почта: mantikor5@rambler.ru

doi: 10.5862/MCE.28.1

Heat loss of underground channel heat pipelines with strained thermal insulation layer, taking into account radiative heat transfer in the cavity of the channel

G.V. Kuznetsov
Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia
V.Yu. Polovnikov
Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia
(3822) 42-08-33, (3822) 56-36-13, email: polov@tpu.ru

Key words

mathematical modeling; heat pipeline; heat losses; heat insulation

Abstract

The weakest places of centralized heating systems are the pipelines. Heat pipe network systems, built in the USSR, are characterized by low reliability, high damage possibility and large heat losses. The main reasons for the heat losses growth are moisture, deformation and breakage of the thermal insulation layer.

The purpose of this paper is to assess the extent of underground channel pipelines with strained thermal insulation layer heat losses, taking into account radiative heat transfer in the cavity of the channel.

During the work the numerical analysis of thermal insulation layer deformation effect and radiation heat transfer in the cavity of the channel influence on thermal conditions and heat losses of underground channel pipelines was achieved. On the basis of these results the perspective of the developed model and numerical analysis techniques for the extent of pipelines with deformed thermal insulation heat losses evaluation was determined.

References

1. Slepchenok V. S., Petrakov G. P. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 4(22). Pp. 26-32. (rus)
2. Kuznecov L. A., Grigoreva L. A. *Novosti teplosnabjeniya* [Heating news]. 2006. No. 3. Pp. 51-52. (rus)
3. Yakovlev B. V. *Novosti teplosnabjeniya* [Heating news]. 2009. No. 3. Pp. 39-41. (rus)
4. Baibakov S. A., Timoshkin A. S. *Elektricheskie stancii* [Electrical stations]. 2004. No. 7. Pp. 19-25. (rus)
5. Kuznetsov G. V., Polovnikov V. Yu. Numerical Simulation of the Thermal State of a Flooded Pipeline Taking into Account Unsteadiness of the Process of Heat Insulation Saturation with Moisture. *Thermal Engineering*. 2008. Vol. 55. No. 5. Pp. 426-430.
6. Kuznetsov G. V., Polovnikov V. Yu. Numerical analysis of heat losses by main heat pipelines under conditions of complete or partial flooding. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2008. Vol. 81. No. 2. Pp. 323-331.
7. Nikolaev A. A. *Spravochnik proektirovschika. Proektirovanie teplovyh setei* [Directory of the designer. Designing of thermal networks]. Kurgan: Integral, 2010. 357 p. (rus)
8. Shoihet B. M., Stavrickaya L. V. *Energosberezheniye* [Energy saving]. 2002. No. 3. Pp. 60-62. (rus)
9. Luikov A. V. Conjugate convective heat transfer problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1974. Vol. 17. Pp. 257-265.
10. Lee J. R., Ha M. Y. A numerical study of natural convection in a horizontal enclosure with a conducting body. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 48. Pp. 3308-3318.
11. Kuznecov G .V., Polovnikov V. Yu. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki* [Universities news. Energetics problems]. 2011. No. 5-6. Pp. 12-20. (rus)
12. Kuznetzov G. V., Polovnikov V. Yu. Numerical Investigation of Thermal Regimes in Twin-Tube-Channel Heat Pipelines Using Conductive-Convective Model of Heat Transfer. *Thermal Engineering*. 2012. Vol. 59. No. 4. Pp. 310-315.

13. Spiegel E. A., Veronis G. On the Boussines approximation for a compressible fluid. *Astrophysical Journal*. 1960. Vol. 131. No. 5. Pp. 442-447.

14. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of heat transfer theory]. Moscow: Atomizdat, 1979. 415 p. (rus)

15. Samarskii A. A., Gulin A. N. *Chislennye metody matematicheskoi fiziki* [Numerical methods of mathematical physics]. Moscow: Nauchnyi mir, 2000. 316 p. (rus)

16. Shaidurov V. V. *Mnogosetochnye metody konechnyh elementov* [Multigrid finite element methods]. Moscow: Nauka, 1989. 288 p. (rus)

17. SP 41-103-2000. *Proektirovanie teplovoi izolyacii oborudovaniya i truboprovodov* [Design of thermal insulation of equipment and pipelines]. Moscow: Gosstroi Rossii, 2001. 42 p. (rus)

18. Guva A. Ya. *Kratkii teplofizicheskii spravochnik* [The short thermophysical guide]. Novosibirsk: Sibvuzizdat, 2002. 300 p. (rus)

19. Sheindlin A. E. *Izluchatelnye svoistva tverdyh materialov. Spravochnik [*The radiative properties of solid materials. Handbook]. Moscow: Energiya, 1974. 472 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 2-8.

doi: 10.5862/MCE.28.2

Complex analysis of energy efficiency of public buildings: case study of VGTU

Motuzienė V.
Vilnius Gediminas Technical University,Vilnius, Lithuania
Valančius K.
Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania
Rynkun G.
Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania
+3(705)274-47-18; e-mail: pastatu.energetika@vgtu.lt

Key words

Energy efficiency;public buildings; energy audits; indoor climate; elements thermal characteristics; measurements;economical evaluation.

Abstract

The purpose of this work was to make analysis of energy efficiency of Vilnius Gediminas Technical University (VGTU) buildings. The survey was performed within the frame of the Intelligent Energy – Europe (IEE) project “Use Efficiency” – Universities and Students for Energy Efficiency.

The methodology of the detailed auditing proves that energy audits must be performed with the maximum use of measurements. When having main parameters measured, it is much exact and easier to form energy balance of the building.

It has been inferred that performing detailed energy audits with the support of measurements enable to asses building’s present energy efficiency very precise and consequently savings, related to the proposed energy saving measures, can be assessed more realistic than just analytical calculations.

The analysis performed consists of 2 levels: the 1st and the 2nd level audits. During the 1st level audits, according to the operational energy, critical buildings were identified. The 2nd level audits contain a detailed analysis of the energy efficiency of the buildings and are based on different measurements and analytical calculations (performed according to the national methodology). This analysis could be a guideline for others performing this type of investigations.

References

1. Directive 2010/31/EU (2011) of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union*. 2011. OL 153/13.
2. Energy Efficiency Plan 2011. *Social Committee and the Committee of the Regions*. Brussels: 2011. [Electronic resource]. URL: http://eur-lex.europa.eu. Date of request: 14.03.2012.
3. Korotkova L. I., Pavlova G. A., Moreva Y. A. *Vestnik MGSU* [Scientific and technical magazine: Bulletin of MGSU]. 2011. No. 7. Pp. 75-79. (rus)
4. Krupnov B. A. *Vestnik MGSU* [Scientific and technical magazine: Bulletin of MGSU]. 2011. No. 7. Pp. 85-89. (rus)
5. *ESBSC (IEA Energy Conservation in Buildings & Community Systems Programme)*. Strategic Plan 2007-2012: Towards Near-Zero Primary Energy Use & Carbon Emissions in Buildings & Communities. St Albans: Faber Maunsell Ltd, 2008. 17 p.
6. Vasilev G. P. *Energosberezheniye* [Energy saving]. 2011. No. 8. Pp. 26–32. (rus)
7. Dall’O’ G., Speccher A., Bruni E. *The Green Energy Audit, a new procedure for the sustainable auditing of existing buildings integrated with the LEED protocols*. Sustainable Cities and Society. 2010. doi:10.1016/j.scs.2012.02.01.
8. Beggs C. *Energy: management, supply and conservation*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 84 p.
9. Valancius, K., Mikucionienė, R. Energy efficiency in EU universities – results of the 1st level audit. *Science – Future of Lithuania, Environmental Engineering*. 2010. Vol. 5, No. 2. Pp. 115-118.
10. Valancius K., Paulauskaite S., Vaicaitis A. *Vestnik MGSU* [Scientific and technical magazine: Bulletin of MGSU]. 2011. No. 7. pp. 50-58. (rus)

11. *Universities and students for energy efficiency*. [Electronic resource]. URL: http://www.useefficiency.eu/en/about-use-eff-project/scheduling. Date of request: 14.03.2012.
12. Martinaitis, V.; Rogoža, A.; Čiuprinskas, K. *Pastatu energijos vartojimo auditas* [Building Energy Audit: study book]. Vilnius: Technika, 2010. 110 p. (lit).
13. Shapiro I. Energy audit of large public buildings. *Magazine of energy savings*. 2009. No. 4. Pp. 60-67. (rus)
14. Kustova A. A. *Energosberezheniye.* [Energy saving]. 2008. No. 8. Pp. 40-44. (rus)
15. Alajmi A. Energy audit of an educational building in a hot summer climate. *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 47, No. 47. Pp. 122–130.
16. Rahman M. M., Rasul M. G., Khan M. M. K. Energy conservation measures in an institutional building in sub-tropical climate in Australia. *Applied Energy*. 2010. No. 87. Pp. 2994–3004.
17. Zhu Y. Applying computer-based simulation to energy auditing: a case study. *Energy and Buildings*. 2006. No. 38. Pp. 421–428.
18. Tronchin L., Fabbri K. A Round Robin Test for buildings energy performance in Italy. *Energy and Buildings*. 2010. No. 42. Pp. 1862–1877.
19. *Ahlborn Product Catalog*. Ahlborn Mess, Regelungstechnik GmbH. Germany: 2009.
20. *Hygiene regulation HN 42:2009 Microclimate of dwelling and public buildings*. 2009-12-31. No. 159-7219. (lit)
21. *Requisition of Minister of Economy of the Republic of Lithuania: Methodology of Comprehensive Energy, Energy Sources and Cold Water Consumption Audit Performance in Public Buildings*. Vilnius: 2008, April 29. No. 4-184. (lit)
22. Prokhorov V. I. *Teoreticheskiye osnovy teplogazosnabzheniya ventilyatsii. Tretya mezhdunarodnaya tekhnicheskaya konferentsiya. Sbornik dokladov*. [Theoretical foundations of heat and gas supply and ventilation. The 3rd International scientific and technical forum. Proceedings]. Moscow, 2009. Pp. 30-32. (rus)
23. Short C. A., Cook M., Cropper C. P., Al-Maiyah S. Low energy refurbishment strategies for health buildings. *Journal of Building Performance Simulation*. 2010. Vol. 3, No. 3. Pp. 197-216.
24. Samarin O. D. *Teoreticheskiye osnovy teplogazosnabzheniya ventilyatsii. Tretya mezhdunarodnaya tekhnicheskaya konferentsiya. Sbornik dokladov*. [Theoretical foundations of heat and gas supply and ventilation. The 3rd International scientific and technical forum. Proceedings]. Moscow, 2009. Pp. 51-54. (rus).
25. Samarin O. D., Zaicev N. N. *Teoreticheskiye osnovy teplogazosnabzheniya ventilyatsii. Tretya mezhdunarodnaya tekhnicheskaya konferentsiya. Sbornik dokladov*. [Theoretical foundations of heat and gas supply and ventilation. The 3rd International scientific and technical forum. Proceedings]. Moscow, 2009. Pp. 54-58. (rus).

Full text of this article in English: pp. 9-17.

doi: 10.5862/MCE.28.3

Testing of calculation method of the enclosing structures temperature-humidity conditions on the results of indoor climate in-situ measurements

S. V. Korniyenko
Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE), Volgograd, Russia
+7(8442)96-98-16; e-mail: svkorn2009@yandex.ru

Keywords

temperature-humidity conditions of enclosing structures; indoor climate parameters; computer program

Abstract

The problem of energy expenses decreasing and buildings energy efficiency growth is closely connected with necessity of heat and mass exchange processes research, forecasting of the enclosing structures temperature-humidity conditions and increasing of heat engineering calculations reliability.

In this article the results of indoor climate parameters in-situ measurements are used for testing the method of temperature-humidity conditions calculation in three-dimensional areas of enclosing structures developed by the author. Testing of this method confirms its veracity that allows to use the specified method in design practice.

References

1. Bogoslovskiy V.N. *Teplovoy rezhim zdaniya* [A thermal mode of a building]. Moscow: Stroyizdat, 1979. 248 p. (rus)
2. Lykov A.V. *Teoreticheskiye osnovy stroitelnoy teplofiziki* [Theoretical bases of building thermophysics]. Minsk: Izdatelstvo AN BSSR, 1961. 520 p. (rus)
3. Franchuk A.U. *Voprosy teorii i rascheta vlazhnosti ograzhdayushchikh chastey zdaniy* [Questions of the theory and calculation of humidity of enclosing structures]. Moscow: Gosstroyizdat, 1957. 188 p. (rus)
4. Aleksandrovskiy S.V. *Dolgovechnost naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruktsiy* [Durability of enclosing structures]. Moscow: NIISF RAASN, 2003. 332 p. (rus)
5. Fokin K.F. *Stroitelnaya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastey zdaniy* [Building thermophysics of enclosing structures]. Moscow: AVOK–PRESS, 2006. 256 p. (rus)
6. Ilinskiy V.M. *Stroitelnaya teplofizika (ograzhdayushchiye konstruktsii i mikroklimat zdaniy)* [Building thermophysics (enclosing structures and microclimate parameters for indoor enclosures)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1974. 320 p. (rus)
7. Lukyanov V.I. *Nestatsionarnyy massoperenos v stroitelnykh materialakh pri reshenii problemy povysheniya zashchitnykh kachestv ograzhdayushchikh konstruktsiy zdaniy s vlazhnym i mokrym rezhimom* [Non-stationary mass transfer in construction at a solution of a problem for increase of protective qualities of enclosing structures with a damp and wet mode]: The author's abstract of the dissertation of a Dr. Sci. Tech.: 05.23.01. Moscow, 1993. 48 p. (rus)
8. Gagarin V.G. *Teoriya sostoyaniya i perenosa vlagi v stroitelnykh materialakh i teplozashchitnyye svoystva ograzhdayushchikh konstruktsiy zdaniy* [The theory of a condition and transfer of moisture in construction materials and heat-shielding properties of enclosing structures]: The author's abstract of the dissertation of a Dr. Sci. Tech.: 05.23.01, 05.23.03. Moscow: NIISF RAASN, 2000. 48 p. (rus)
9. Ananyev A.I. *Nauchno-tekhnicheskiye osnovy povysheniya teplozashchitnykh kachestv i dolgovechnosti naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruktsiy zdaniy iz shtuchnykh materialov* [Scientific and technical bases of increase of heat-shielding qualities and durability of external enclosing structures of buildings from piece materials]: The author's abstract of the dissertation of a Dr. Sci. Tech.: 05.23.01, 05.23.03. Moscow: NIISF RAASN, 1998. 40 p. (rus)
10. Perekhozhentsev A.G. *Teoreticheskiye osnovy i metody rascheta temperaturno-vlazhnostnogo rezhima ograzh-dayushchikh konstruktsiy zdaniy* [Theoretical bases and calculation methods of temperature-humidity conditions of enclosing structures]. Volgograd: VolgGASU, 2008. 212 p. (rus)
11. Krisher O. *Nauchnyye osnovy tekhniki sushki* [Scientific bases of technics of drying]. Moscow: Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1961. 540 p. (rus)

12. Gorshkov A. S., Vatin N. I., Glumov A. V.*Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 1 (19). Pp. 28—33. (rus)

13. Grinfeld G. I., Morozov S. A., Sogomonyan I. A., Zyryanov P. S. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 2 (20). Pp. 33—38. (rus)

14. Rode C., Burch D. M. Empirical validation of a transient computer model for combined heat and moisture transfer. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Building VI*, December 4–8, Clearwater Beach, FL. 1995. Pp. 283—295.

15. Künzel H.M., Kießl K. Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components. *International Journal of heat and mass transfer*. 1997. No. 1. Pp. 159—167.

16. Künzel H.M. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart: IRBVerl. 1995. 65 p.

17. Korniyenko S.V. *Construction materials*. 2006. No. 4. Pp. 88—89. (rus)

18. Korniyenko S.V. *Construction materials*. 2007. No. 10. Pp. 54—55. (rus)

19. Korniyenko S.V. *Sovmestnyy vlagoteploperenos* (SOVT) [The combined moisture- and heat conduction (SOVT)]. The Certificate No. 2011611175 about the state registration of the computer program. Moscow: FIIP, 2011. (rus)

20. Korniyenko S.V. *Metody inzhenernoy otsenki vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchikh konstruktsiy na osnove teorii potentsiala vlazhnosti* [Methods of an engineering estimation of humidity conditions of enclosing structures on the basis of the moisture potential theory]. Volgograd: VolgGASU, 2011. 100 p. (rus)

21. Korniyenko S.V. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 8 (26). Pp. 5—12. (rus)

22. Gurskiy D.A.*Vychisleniya v MathCAD* [Calculations in MathCAD]. Minsk: Novoye znaniye, 2003. 814 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 18-23.

doi: 10.5862/MCE.28.4

Air filtering through the building envelope

D. V. Petrosova
Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+7(905)211-44-17; e-mail: d_kuzmenko@list.ru

Key words

air permeability; air filtering; building envelope; filtration rate; cross filtering; filtering heat transfer

Abstract

Recently, building envelopes with efficient insulation of low thermal conductivity, including light building envelope, which allow to increase thermal protection of buildings, are widely used. This new building envelope require a comprehensive study, because previously considered unimportant features often start to make significant effect on the performance characteristics of structures.

To reduce the air permeability in the constructions wind-proof membranes are used. However, the influence of air filtering in such structures has not been researched yet.

When the air-permeable building envelopes are used, the heat flow is moved away also due to the air filtering. It is proposed to take into account the convective heat transfer mechanism commensurate with the conductive heat transfer mechanism. In the formula for determining the heat flow due to the air filtering the filtration coefficient of air through the building envelope is used. This coefficient is found experimentally for light building envelopes.

Furthermore, the empirical expression for the filtration coefficient, which relates it and the coefficient of heat loss is found.

References

1. Kuzmenko D. V., Vatin N. I. *Magazine of civil engineering*. 2008. No. 1. Pp. 13-21. (rus)
2. Raisch E. *Die Luftdurchlassigkeit von baustoffen. Gesundheits-Ingenieur*. 1928. No. 30. Pp. 481-489.
3. Briling R. Ye. *Vozdukhopronitsayemost ograzhdayushchikh konstruktsiy i materialov* [Breathability of building envelopes and materials]. Moscow: Stroyizdat, 1948. 90 p. (rus)
4. Ushkov F. V. *Stroitelnaya promyshlennost* [Building industry]. 1951. No. 8. Pp. 16-19. (rus)
5. Titov V. P. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura* [Universities news. Building and architecture]. 1962. No. 3. Pp. 137-147. (rus)
6. Kalyadin Yu. A. *Issledovaniye vliyaniya vnutrenney filtratsii vozdukha na temperaturnyy rezhim naruzhnykh stenovykh paneley, uteplennykh vozdukhopronitsayemymi materialami* [Investigation of the effect of internal air filtration on the temperature conditions external wall panels, insulated by breathable materials:]. Candidate of Technical Science thesis abstract. Moscow: 1966. 20 p. (rus)
7. Kalyadin Yu. A. *Sb. nauch. tr.*[Collection of proceedings]. NIIMOSSTROY. Is. 3. Moscow: 1966. Pp. 147-155. (rus)
8. Belyayev B. C. *Sb. nauch. tr.* [Collection of proceedings].TsNIIEPzhilishcha. Moscow: 1982. Pp. 18-22. (rus)
9. Artemov M. D. *Sb. nauch. tr.* [Collection of proceedings]. NIISF. Moscow: 1981. Pp. 51-55. (rus)
10. Veselovatskaya Ye. V. *Osobennosti teploperedachi cherez vozdukhopronitsayemuyu teploizolyatsiyu trekhsloynykh ograzhdayushchikh konstruktsiy* [Features of heat transfer through breathable three-layer insulation walling]. Candidate of Technical Sciencethesis abstract.Moscow: 1985. 223 p. (rus)
11. Krivoshein A. D. *Proizvodstvennyye selskokhozyaystvennyye zdaniya s vozdukhopronitsayemymi ograzhdayushchimi konstruktsiyami* [Industrial agricultural buildings with breathable protecting designs]. Candidate of Technical Sciencethesis abstract.Omsk: 1993. 200 p. (rus)
12. Gagarin V. G., Kozlov V. V., Sadchikov A. V. *Promyshlennoye i grazhdanskoyestroitelstvo* [Industrial and civil engineering]. 2005. No. 6.Pp. 42- 45. (rus)
13. Gagarin V. G., Kozlov V. V., Sadchikov A. V., Mekhnetsov I. A. *AVOK*. 2005. No. 8. Pp. 60-70. (rus)

14. Sadchikov A. V. *Vliyaniye prodolnoy filtratsii vozdukha v uteplitele na teplozashchitnyyesvoystva sten s navesnymi ventiliruyemymi fasadami* [The influence of the longitudinal air filtration in the insulation on the heat-shielding properties of the walls with hinged ventilated facades]. Candidate of Technical Science thesis abstract. Moscow: 2007. 248 p. (rus)

15. Petrichenko M. R., Petrochenko M.V. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 8(26). Pp. 51-56. (rus)

16. Soloshchenko S. S. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 2(20). Pp. 39-41. (rus)

17. Walker Iain S., Wilson David J., Sherman Max H. A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations.*Original Research Article Energy and Buildings*. 1998. Vol. 27, Is. 3. Pp. 293-299.

18. Silberstein A., Hens H. Effects of air and moisture flows on the thermal performance of insulations in ventilated roofs and walls.*Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*. 1996. Vol. 19. Pp. 367-385.

19. Mei H. T. *Ventilated wall and window test passive-solar concept. Technical Report*. Lamar Univ. Dept. of Mechanical Engineering. Beaumont, TX (USA): 1982. 44 p.

Full text of this article in Russian: pp. 24-31.

doi: 10.5862/MCE.28.5

Theoretical and experimental validation of the air changes in industrial ventilation optimization method

A. G. Sotnikov
Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics (ABOK), Saint-Petersburg, Russia
+7(921)347-33-92; e-mail: asotnikov2005@yandex.ru
A. A. Borovitskiy
Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir, Russia

Key words

air exchange; the harmfulness; concentration; local suction; efficiency; optimization; ventilation; minimum of the function; equivalent-effective rate

Abstract

Wide dissemination and development of industrial ventilation of different industries, which began in our country from the period of industrialization of the 30s years of the twentieth century has led to significant scientific and practical achievements noted in numerous books and articles. It also has a positive effect on the health of manufactures staff. More than 2.5 thousand different harmful substances and local suctions from them were investigated in detail by hygienists and engineers in the USSR, in Russia and abroad, but, unfortunately, have not been systematized and generalized. This article tries to make such generalization, corroborated by analytical relationships and dependencies experienced by different authors.

This technique is based on the exponential-power dependence for the effectiveness of local suction, which is close to dependence, accepted in the study of turbulent diffusion, but in more general terms. The proposed in the article new term equivalent-effective rate is rather universal concept, which allows to compare the effectiveness of hazards trapping for different design, technological and aerodynamic parameters of the source and the suction of any kind. On the basis of this idea, an opportunity of the ventilation systems in industrial ventilation for numerous industrial processes optimization appeared.

As a result of using this method the capital and operating costs for the equipment of these systems, steam curing, and air movement could be reduced, thereby significant technical and economic effect could be provided.

References

1. Rymkevich A. A., Khalameyzer M. B. *Upravleniye sistemami konditsionirovaniya vozdukha* [Air conditioning systems controlling]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1977. 274 p. (rus)
2. Rymkevich A. A. *Sistemnyy analiz optimizatsii obshcheobmennoy ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha* [The system analysis of general ventilation and air conditioning optimization]. Moscow: Stroyizdat, 1990. 300 p. (rus)
3. Rymkevich A. A., Serbin Yu. V. *Problemy i perspektivy razvitiya sistem konditsionirovaniya* [Problems and development prospects of air conditioning systems]. Saint-Petersburg: SPbGAKhiPT, 1997. Pp. 3–8. (rus)
4. Sotnikov A. G. *Proyektirovaniye i raschet sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha. (Polnyy kompleks trebovaniy, iskhodnykh dannykh i raschetnoy informatsii dlya SO, SPV, SKV, SGVS i SKhS)* [Ventilation and air conditioning systems design and calculation (The whole complex of requirements, inputs and calculation information)]. Saint-Petersburg: 2012. Vol. I, 420 p. Vol. II, 408 p. (rus)
5. Elterman V. M. *Ventilyatsiya khimicheskikh proizvodstv* [Ventilation for chemical manufacturing]. Edition 1. Moscow: Stroyizdat, 1967. 175 p.; edition 2, complemented and edited. Moscow: Khimiya, 1971. 238 p.; edition 3. Moscow: Khimiya, 1980. 288 p. (rus)
6. Uspenskaya L. B. *Matematicheskaya statistika v ventilyatsionnoy tekhnike* [Mathematical statistics in ventilation devices]. Moscow: Stroyizdat, 1980. 108 p. (rus)
7. Posokhin V. N. *Raschet mestnykh otsosov ot teplo- i gazovydelyayushchego oborudovaniya* [Calculation of local suction from heat and outgassing equipment]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1984. 160 p. (rus)
8. Posokhin V. N., Moor L. F. A3-877. *Rekomendatsii po raschetu otsosov ot oborudovaniya, vydelyayushchego teplo i gazy* [Recommendations on suction calculation of heat and outgassing equipment]. Moscow: GPI Santekhproyekt, 1983. 32 p. (rus)

9. Babynin O. N., Kuleshov B. N. *Proyektirovaniye otopitelno-ventilyatsionnykh sistem* [Heat and ventilation system design]. 1967. No. 3. Pp. 14–23. (rus)
10. Lifshits G. D. *Izvestiya Vuzov. Stroitelstvo* [News of Universities]. 1979. No. 10. Pp. 92-95. (rus)
11. Polosin I. I., Kuznetsov S. N., Portyannikov A. V. *Trudy konferentsii MGSU* [Proceedings of MGSU conference]. Moscow: 2007. Pp. 153 – 157. (rus)
12. Gusev V. M., Popchenkov I. N., Smirnov A. F. *Issledovaniya v oblasti otopleniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha. Temat. sb. nauch. tr.* [Research in heating, ventilation and air conditioning area. Thematic collection of scientific papers].Leningrad: LISI, 1976. No. 1(117). Pp. 25 – 30. (rus)
13. Akinchev N. V., Zhigalov V. P. *Nauchnyye raboty institutov okhrany truda VTsSPS* [The scientific work of the labor institutions VTsSPS]. Moscow: Profizdat, 1972. No. 75. Pp. 14 – 18. (rus)
14. Polushkin V. I., Anisimov S. M., Vasilyev V. F., Deryugin V. V. Ventilyatsiya: uchebnoye posobiye [Ventilation: textbook]. Moscow: Akademiya, 2008. 416 p. (rus)
15. Rogova T. N. *Mir transporta* [World of transport]. 2009. No. 2. Pp. 138–143. (rus)
16. Rogova T. N. *Mir transporta* [World of transport]. 2006. No. 1. Pp. 16 – 21. (rus)
17. Howard Goodfellow, Esko Tahti. *Industrial Ventilation. Design Guidebook*. London: Academic Press, 2001. 1520 p.
18. Marzal F., Gonzalez E., Minana A., Baeza A. Influence of push element geometry the capture efficiency of push-pull ventilation systems in surface treatment tanks. *The Annals of Occupational Hygiene, Oxford University Press*. 2002. No. 4. Pp. 383-393.
19. Rene Devienne, Jean Raymond Fontaine, Jeremie Kicka, Francis Bonthoux. Experimental characterization of plume of passive contaminant above a thermal source: capture efficiency of fume extraction hood. *The Annals of Occupational Hygiene, Oxford University Press*. 2009. No. 7. Pp. 739-748.
20. Huang R.F., Lin S.Y., Jan S.Y., Hsieh R.H., Chen Y.K., Chen C.W., Yeh W.Y., Chang C.P., Shih T.S., Chen C.C. Aerodynamic characteristics and design guidelines of push-pull ventilation systems. *The Annals of Occupational Hygiene, Oxford University Press.* 2005. No. 1. Pp. 1-15.
21. Marzal F., Gonzalez E., Minana A., Baeza A. Determination and interpretation of total and transversal linear efficiencies in push-pull ventilation systems for open surface tanks. *The Annals of Occupational Hygiene, Oxford University Press.* 2002. No. 7. Pp. 629 – 635.
22. Huang R.F., Wu Y.D., Chen H.D., Chen C.C., Chen C.W., Chang C.P., Shih T.S. Development and evaluation of an air-curtain fume cabinet with considerations of its aerodynamics. *The Annals of Occupational Hygiene, Oxford University Press*. 2007. No. 2. Pp. 189-206.
23. *GOST R EN 13779-2007. Ventilyatsiya v nezhilykh zdaniyakh. Tekhnicheskiye trebovaniya k sistemam ventilyatsii i konditsionirovaniya* [State Standard of Russian Federation. Ventilation in nonresidential buildings. Technical requirements for ventilation and air conditioning systems]. Moscow: Standartinform, 2008. 44 p. (rus)
24. Sotnikov A. G. *Teoriya, tekhnika i proyektirovaniye na rubezhe stoletiy* [Theory, technology and design at the turn of the century]. Saint-Petersburg: AT-Publishing. Vol. I, 2005. 504 p. Vol. II, part. 1, 2006. 420 p. Vol. II, part. 2, 2007. 512 p. (rus)
25. *SNiP 41-01-2003. Otopleniye, ventilyatsiya i konditsionirovaniye* [Heating, ventilation and air conditioning]. Gosstroy Rossii, M, 2004. 54 p.
26. Krupkin G. Ya. *Inzhenernyye sistemy* [Engineering systems]. 2010. September. Pp. 70 – 71. (rus)
27. Uspenskaya L. B. *Matematicheskaya statistika v ventilyatsionnoy tekhnike* [Mathematical statistics in ventilation equipment]. Moscow: Stroyizdat, 1980. 108 p. (rus)
28. Uspenskaya L. B., Klyachko L. S. *Trudy VNIIGS* [Proceedings of VNIIGS]. 1973. Vol. 36. (rus)
29. Pozin G. M. *Mestnaya vytyazhnaya ventilyatsiya – samyy effektivnyy sposob organizatsii vozdukhoobmena v pomeshchenii* [Local exhaust ventilation - the most efficient way of organizing the air in the room]. Saint-Petersburg: IS, 2008. No. 3. Pp. 40 – 45. (rus)
30. Borovitskiy A. A., Ugorova S. V. *Sb. trudov SPbGASU* [Proceedings of SPbGASU]. No. 63. Saint-Petersburg: SPbGASU, 2010. Pp. 55-58. (rus)
31. Borovitskiy A. A., Tarasenko V. I., Ugorova S. V. *Sb. trudov SGTU (Innovatsionnyye metody v arkhitekture i gradostroitelstve)* [Proceedings of SGTU (Innovative methods in architecture and urban planning)]. Saratov: Nauka, 2009. Pp. 150-152. (rus)
32. *Patent na izobreteniye 2383400* Rossiyskaya Federatsiya, MPK V08 15/02 (2006.01). [Utility patent. Russian Federation]. Ugorova S. V., Tarasenko V. I., Borovitskiy A. A. Vytyazhnoy zont. Gos. Un-t. No. 2008110668/12. Zayavl. 19.03.08. Opubl. 10.03.10. Byul. No. 7. (rus)
33. *Patent na poleznuyu model 93709* Rossiyskaya Federatsiya, MPK V08 15/02 (2006.01). [Utility patent. Russian Federation]. Borovitskiy A. A., Ugorova S. V., Tarasenko V. I. Vytyazhnoy shkaf. Gos. Un-t. No. 2009144528/22. Zayavl. 01.12.09. Opubl. 10.05.10. Byul. No. 13. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 32-38.

doi: 10.5862/MCE.28.6

Improving the engineering systems reliability by formalizing the failure search

D. R. Absalyamov
Military and space akademy named after A. F. Mojaiskiy, Saint-Petersburg, Russia
+7(911)244-33-13;e-mail: damir73@yandex.ru

Key words

learning procedure; denial; a controlled rate; training set; the recurrence relation; an orthonormal basis

Abstract

In the article a method of the failures search formalizing by efficiency indicators of energy resources in heating, ventilation and air conditioning of buildings and structures is proposed. The main feature of this method is the combination of the educational process and the procedure of selecting a minimal set of controlled parameters.

In the framework of the method a way of training patterns grouping and groups ranking in order to accelerate the convergence of the learning process, as well as the modification of training procedures at low volume and lack of a priori information about the system is considered. The solution of the problem of choosing a minimal set of controlled parameters is based on the properties of orthogonal vector systems.

References

1. *GOST R 51387-99. Energosberezheniye*. Normativno-metodicheskoye obespecheniye. Osnovnyye polozheniya [State Standard of Russian Federation. Energy saving. Normative and methodological support. The main provisions]. Gosstandart Rossii. Moscow: 1999. 20 p. (rus)
2. Yakubson V. M. *Magazine of civil engineering*. 2008. No. 1. Pp. 2. (rus)
3. Slepchenok V. S., Petrakov G. P. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 4(22). Pp. 26–32. (rus)
4. *DIN EN 253-2009. District heating pipes*. Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks. Pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene.
5. *DIN EN 448-2009. District heating pipes*. Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks. Fitting assemblies of steel service pipes, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene.
6. Appleyard D. The Big Question: What Can We Hope for in the Next 12 Months? *Renewable Energy World*. 2012. No. 2. Pp. 13-14.
7. Bayar T. Associate Editor. Better Renewables Risk Management Solutions Emerge. *Renewable Energy World*. 2012. No. 3. Pp. 22-24.
8. Senchenkov V. I. *Aviakosmicheskoye priborostroyeniye* [Aerospace instrumentation]. 2005. No. 10. Pp. 27–32. (rus)
9. Kolmogorov A. N., Fomin S. V. *Elementy teorii funktsiy i funktsionalnogo analiza* [Elements of the Theory of Functions and Functional Analysis]. Moscow: Fizmatlit, 2009. 92 p. (rus)
10. Trenogin V. A. *Funktsionalnyy analiz* [Functional Analysis]. Moscow: Nauka, 1980. 210 p. (rus)
11. Tarasenko F. P. *Neparametricheskaya statistika* [Nonparametric statistics]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo universiteta, 1976. 184 p. (rus)
12. Senchenkov V. I. *Izvestiya Vuzov. Priborostroyeniye* [Proceedings of the universities. Instrumentation]. 2010. Vol. 53, No. 1. Pp. 3–8. (rus)
13. Tsypkin Ya. Z. *Adaptatsiya i obucheniye v avtomaticheskikh sistemakh* [Adaptation and Learning in Automatic Systems]. Moscow: Nauka, 1968. 126 p. (rus)
14. Suyetin P. K. *Klassicheskiye ortogonalnyye polinomy* [Classical orthogonal polynomials]. Moscow: Nauka, 1979. 152 p. (rus)
15. Ilin V. A., Pozdnyak E. G. *Lineynaya algebra* [Linear algebra]. Moscow: Nauka, 1984. 212 p. (rus)
16. Moiseyev N. N. *Matematicheskiye zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow: Nauka, 1981. 142 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 39-47.

doi: 10.5862/MCE.28.7

The influence of control algorithm on the annual energy consumption of automated climate systems

O. D. Samarin
Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
+7(499)188-36-07; e-mail: samarin1@mtu-net.ru
S. S. Azivskaya
Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

Keywords

automatic control system; power consumption; control algorithm; investment costs; operating costs

Abstract

In the paper the estimation of energy consumption of the automated ventilating systems and air conditionings (V and AC) under condition of their regulation "on deviation" is reviewed.

The analysis of processes descending in V and AC and maintained room is given. The outcomes of numerical calculation of a non-steady thermal mode of a room with the computer program designed by authors are adduced. Calculations were organized on different combinations of radiant and convective components of variable heat ingress.

The optimal control algorithm of V and AC from the point of view of minimal general energy consumption during the heating system is found. The presentation is illustrated by a graphic stuff and by a numerical example of technical and economical estimation of optimal control algorithm using.

References

1. Gorshkov A. S. *Magazine of civil engineering*. 2010. No. 1. Pp. 9 – 13. (rus)
2. Komkov V. A., Timakhova N. S. *Energosberezhenie v zhilishchno-kommunalnom khoziai-stve* [Energy efficiency in housing and communal services]. Moscow: INFRA-M, 2010. 320 p. (rus)
3. Boguslavskii L. D., Simonova A. A., Mitin M. F. *Ekonomika teplogazosnabzheniia i ventiliatcii* [Economics of heating and ventilation systems]. Moscow: Stroiizdat, 1988. 351 p. (rus)
4. Samarin O. D. *Voprosy ekonomiki v obespechenii mikroklimata zdanii* [Questions of economics in indoor climate providing]. Moscow: ASV, 2011. 128 p. (rus)
5. Samarin O. D., Azivskaia S. S. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 5. Pp. 31 – 33. (rus)
6. Khrustalev B. M., Kuvshinov Iu. Ia., Kopko V. M. *Teplosnabzhenie i ventiliatciia* [Hating and ventilation systems]. Moscow: ASV, 2010. 784 p. (rus)
7. Kuvshinov Iu. Ia. *Teoreticheskie osnovy obespecheniia mikroklimata pomeshcheniia* [Theoretical basis of indoor climate providing]. Moscow: ASV, 2007. 184 p. (rus)
8. Samarin O. D. *Energosberezhenie i vodopod-gotovka* [Energy saving and water perification]. 2009. No. 2. Pp. 40 – 42. (rus)
9. Valancius K., Sasnauskaite V. An influence of the control of heating system to the design heat load and demand of a building.*Pap. of the 7-th conf. "Environmental engineering" of VGTU*. Vilnius: 2008. Pp. 882–885.
10. Keller B., Magyari E. *A simple calculation method of general validity for the design-parameters of a room/building, minimizing its energy and power demand for heating and cooling in a given climate*. Zűrich: 1998. 57 p.
11. Lapinskiene V., Paulauskaite S., Motuziene V. The analysis of the efficiency of passive en-ergy saving measures in office buildings.*Pap. of the 8-th conf. "Environmental engineering" of VGTU*. Vilnius: 2011. Pp. 769 – 775.
12. *Stroitelnyi katalog. Perechen tipovoi dokumentatcii obshchestvennykh zdanii dlia stroitelstva v gorodakh i poselkakh gorodskogo tipa* [Construction directory. The list of standard documentation for the construction of public buildings in cities and towns]. Moscow: GUP TcPP, 1994. (rus)
13. *Moskovskaia obedinennaia energeticheskaia kompaniia* [Moscow United Energy Company]. [Electronic resource]. URL: www.oaomoek.ru. (Date of request: 12.03.2012). (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 48-50.

doi: 10.5862/MCE.28.8

New relationship for determining the coefficient of hydraulic resistance in the transition zone of resistance (from laminar to turbulent flow)

A. M. Kalyakin
Saratov State Technical University of YuriGagarin, Saratov, Russia
E. V. Chesnokova
Saratov State Technical University of Yuri Gagarin, Saratov, Russia
+7 (8452) 99-89-14; e-mail: adamas.elena@gmail.com

Key words

coefficient of hydraulic friction; transition zone; the pressure drop; Reynolds number; coupling curves

Abstract

To determine the pressure loss of liquids in pipelines during the transition from laminar to turbulent motion several dependencies for the coefficient of hydraulic friction λ are found. They are the dependencies of the ratio λ from the Re number of and can be obtained in the form of a segment of a series from three or four terms.

The implementation of the process can be performed either by using elementary computational devices, and using the computer program. Upper and lower Reynolds numbers are set arbitrarily, taking into account the working conditions of the pipeline.

Method was experimentally confirmed. The results could be applied in the design of construction machinery and equipment of average power operating at high frequency vibrations. Dependences for the coefficient of hydraulic friction are applied for the calculations of pipelines for liquid mixes.

References

1. Praeger E. A., Samoilenko L. A.*Trudy LISI* [Proceedings of the LISI].Is. 50. Leningrad: 1966.Pp. 27-39. (rus)
2. Richter G. *Gidravlika truboprovodov* [Hydraulics of pipelines].Moscow-Leningrad: ONTI, 1936. 230 p. (rus)
3. Idelchik I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistance]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. 559 p. (rus)
4. Rozovsky I. L., Zalutsky I. V.*Gidravlika i gidrotekhnika* [Hydraulics and hydraulic engineering].Republican Interdepartmental Scientific-Technical Collection. 1969.No. 8.Pp. 16-23. (rus)
5. Samoilenko L. A.*Sbornik sanitarnoy tekhniki* [Collection of Sanitary Engineering]. Reports of the 2nd scientific conference of young scientists and builders. Leningrad: LISI, 1967.Pp. 93-105. (rus)
6. Slissky P. *Trudy Moskovskogo energeticheskogo instituta. Mekhanika tverdogo tela i zhidkosti: temat. sb.* [Proceedings of the Moscow Power Engineering Institute. Mechanics of Solids and liquids: thematic collection] Moscow: Nauka, 1977. Pp. 35-37. (rus)
7. AltshulA. D., Ludov V. A., Maslovsky A. K.*Sovershenstvovaniye metodov gidravlicheskikh raschetov vodopropusknykh i ochistnykh sooruzheniy: mezhvuz. nauch. sb*. [Improvement of methods of hydraulic calculations of culverts and water treatment facilities: Intercollege. researcher. Collection]. Saratov:SPI, 1990. Pp. 57-62. (rus)
8. Kurganov A. M., Fedorov N. F.*Gidravlicheskiye raschety sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya* [Hydraulic calculations of water and wastewater systems]. Leningrad: Stroiizdat, 1986. 440 p. (rus)
9. Samoilenko L. A. *Issledovaniye gidravlicheskikh soprotivleniy v truboprovodakh v zone perekhoda laminarnogo dvizheniya v turbulentnomu* [Study of hydraulic resistance in pipes in the area of transition from laminar to turbulent motion]. Abstract of Candidate Technical Science thesis. Leningrad: LISI, 1968. 22 p. (rus)

10. Varfolomeev A. N. *Issledovaniye gidravlicheskikh soprotivleniy trub sistem vodyanogo okhlazhdeniya* [Investigation of hydraulic resistance of water cooling systems pipes]. Abstract of Candidate Technical Science thesis. Moscow: IISS, 1979. 237 p. (rus)

11. Aivazian O. M.*Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo* [Hydraulic Engineering]. 1985. No. 2. Pp. 21-26. (rus)

12. Aniskin V. M., Adamenko K. V., Maslov A. A.*Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika* [Bulletin of the Novosibirsk State University. Series: Physics]. 2010. Vol. 5.No. 3. Pp. 63-70. (rus)

13. Kitaytseva E. H., Jaworowski Y. V., Genevarev A. A. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Power University]. 2009. No. 4. Pp. 30-32. (rus)

14. Kraev V. M. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika* [Proceedings of higher educational institutions. Aircraft]. 2003. No. 4. Pp. 73-75. (rus)

15. Van De Velde F., De Baets P., Degrieck J. The friction force during stick-slip with velocity reversal. *Wear*. 1998. Vol. 216. No. 2. Pp. 138-149.

16. Singh S., Singh T. N., Chauhan L. J. A rapid method of measuring shoot hydraulic resistance of rice: implications for efficient water use. *Current Science*. 2009. Vol. 96 No. 4. Pp. 464-466.

17. Smith M. W., Cox N. J., Bracken L. J. Applying flow resistance equations to overland flows. *Progress in Physical Geography*. 2007. Vol. 31. No. 4. Pp. 363-387.

18. Minhas H., Lock G. S. H. Laminar-turbulent transition in a bayonet tube.*International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1996. Vol. 17. No. 2. Pp. 102-107.

19. GirgidovA. D. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 1 (19). Pp.9-11. (rus)

20. GirgidovA. D. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 5 (23). Pp.49-52. (rus)

21. Kalyakin A. M., ShevchenkoD. F., Malyukov S. A., Bereda N. N. *Sovershenstvovaniye metodov gidravlicheskikh raschetov vodopropusknykh i ochistnykh sooruzheniy: mezhvuz. nauch. Sb*. [Improvement of methods of hydraulic calculations of culverts and water treatment facilities: intercollege scientific. collection]. Saratov: SGTU, 2009. Pp. 57-61. (rus)

22. Nikonova V. T., Sautkina T.N. *Sovershenstvovaniye metodov gidravlicheskikh raschetov vodopropusknykh i ochistnykh sooruzheniy: mezhvuz. nauch. Sb*. [Improvement of methods of hydraulic calculations of culverts and water treatment facilities: intercollege scientific collection]. Saratov: SGTU,2009. Pp. 61-65. (rus)

23. Kalyakin A. M., Chesnokova E. V., Kozhaeva E. I. *Sovershenstvovaniye metodov gidravlicheskikh raschetov vodopropusknykh i ochistnykh sooruzheniy: mezhvuz. nauch. Sb*. [Improvement of methods of hydraulic calculations of culverts and water treatment facilities: intercollege scientific collection]. Saratov: SGTU, 2010. Pp. 80-84. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 51-55.

doi: 10.5862/MCE.28.9

Free flow velocity of high-drag particles in liquid

M.A. Mikhalev
Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+7(812)535-46-10; e-mail: mikhalev@cef.spbstu.ru

Key words

physical modeling; settling velocity; numbers of similarity; criteria of similarity; criteria equations

Abstract

This article discusses the phenomenon of free movement of buffle bodies in a fluid. The basis of hydraulic design of many technical devices (septic tanks, aeration and flotation chambers, hydro-and pneumatic transport, etc.) is the deposition rate (or floating) of the various bodies in the fluid.

The solution of objective is obtained by the methods of mathematical modeling only at very low Reynolds numbers. Physical modeling of the phenomena is based on the results of fixed bodies flowed by oncoming external flow study.

But from the standpoint of modern physical modeling methods the body, which moves freely, and the fixed body, streamlined at the same rate, represent two different phenomena: at the first variant speed is not known beforehand, at the second — it is originally given. Consequently, at the first variant there is no criterion between similarity numbers. The paper shows how the criteria are obtained from similarity numbers.

Decisions are based on the similarity theory.The numbers, similarity criteria and criterial equations are determined. Proposed dependences have generalizing properties, if the conditions belong to the same class. In case of equal numbers of similarity, such phenomena are described by the same dependencies. They include: deposition of heavy particles in the air and water environments, the water droplets in the air, floating bubbles in the water, etc.

References

1. Mikhalev M. A. *Fizicheskoye modelirovaniye gidravlicheskikh yavleniy: Uchebnoye posobiye* [Physical modeling of hydraulic phenomena: Textbook]. Saint-Petersburg: SPbGPU, 2008. 443 p. (rus)
2. Mikhalev M. A. *Teoriya podobiya i razmernostey: Uchebnoye posobiye* [The theory of similarity and dimensions: Textbook]. Saint-Petersburg: SPbGTU, 2001. 68 p. (rus)
3. Levi I. I. *Modelirovaniye gidravlicheskikh yavleniy* [Modelling of hydraulic phenomena]. Leningrad: Energiya. 1967. 235 p. (rus)
4. Zegzhda A. P. *Teoriya podobiya i metodika rascheta gidrotekhnicheskikh modeley* [Similarity theory and calculation method of hydraulic models]. Leningrad–Moscow: Gosstrooyizdat, 1938. 162 p. (rus)
5. Sharp Dzh. *Gidravlicheskoye modelirovaniye* [Hydraulic modelling]. Moscow: Mir, 1984. 280 p. (rus)
6. Graf W. H. *Hydraulics of Sediment Transport*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970. 513 p.
7. Loytsyanskiy L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Liquid and gas mechanics]. Moscow: Nauka, 1973. 904 p. (rus)
8. Shlikhting G. *Teoriya pogranichnogo sloya* [Theory of boundary layer]. Moscow: Nauka, 1969. 737 p. (rus)
9. Vatin N. I., Girgidov A. A., Strelets K. I. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 5. Pp. 5 – 9. (rus)
10. Markelova Ye. A. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 2. Pp. 55 – 62. (rus)
11. Vatin N. I., Strelets K. I, Kitain M. B. *Magazine of civil engineering*. 2011. No.5. Pp. 25 – 30. (rus)
12. Sou S. *Gidrodinamika mnogofaznykh system* [Hydrodynamics of multiphase systems]. Moscow: Mir. 1971. 536 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 56-60.

doi: 10.5862/MCE.28.10

Dynamics of the water flow, appearing during navigation lock chamber drawdown

D.A. Miltsin
The Volga State Academy of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia
+7(905)86-86-044; e-mail: mantikor5@rambler.ru

Key words

navigation lock drawdown system; mathematical modeling; flow hydrodynamics

Abstract

Increasing the capacity of navigation locks is a very important sector of the Russian Federation inland waterway transport development. One of its directions is the structure of the flow in the navigation lock discharge system investigation,using modern methods of mathematical modeling.

Calculations on the numerical model, described in this paper, allow to analyze the hydrodynamics of water flow that occurs when the chamber is drawdowned, and evaluate the work of flow energy quenching system at the outlet of the tailrace. This article presents a standard dampers design and their disadvantages, two new flow energy dissipation systems are proposed.

The high efficiency of these systems (in comparison with already existing systems) is proved by mathematical modeling, their using can significantly improve the vessels placing conditions and increase the capacity of navigation facilities.

References

1. Concept of the development of the internal water transport in Russian Federation (is approved by Government RF № 909 from 03.07.2003). *Rechnoy transport* [River transport]. Moscow: Transport, 2003. No. 5. Pp. 21-37. (rus)
2. Gapeev A. M. *Sovershenstvovaniye ekspluatatsionnykh kachestv sudokhodnykh shlyuzov s golovnoy sistemoy pitaniya*[Improvement ofthe navigable lockswith the main system of the deliveryworking quality. Abstract of. thesis. Doctor. Technical. Science: 05.22.19]. Saint-Petersburg: SPBUWC, 1998. 20 p. (rus)
3. Pianih S. M. *Production and technical collection TY MRF*. Issue 4. Moscow: Transport, 1965. Pp. 15–17. (rus)
4. Malishkin A. G. *Organizatsiya i planirovaniye raboty rechnogo flota* [Organization and planning of the river fleet functioning]. Moscow: Transport, 1985. 215 p. (rus)
5. Belih V. N. *Trudy GIIVTa* [Proceedings of the GIIWT]. Issue 219. Gorky: GIIWT, 1989. Pp. 3–15. (rus)
6. Zernov D.A. *Problemy povysheniya effektivnosti vodnogo transporta*[Problems of the water transport efficiency improvement]. Moscow: Transport, 1983. Pp. 82–88. (rus)
7. Klementjev A. N. *Dvizheniye i manevrirovaniye sudov pri prokhozhdenii sudopropusknykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Movement and maneuvering of vessels in navigation passes of hydraulic structures]. Abstract of. thesis. Doctor. Technical. Science: 05.22.19.Nizhny Novgorod: VSAWT, 1998. 54 p. (rus)
8. Bačkalić T., Bukurov M. Modelling of the ship locking process in the zone of ship lock with two parallel chambers. *Annals of faculty engineering Hunedoara*. Tome IX. 2011. Fascicule 1. Pp. 187–192.
9. Lipatov I. V. *Sovershenstvovaniye protsessa sudopropuska cherez shlyuzy na primere Gorodetskogo rayona gidrosooruzheniy* [Improvement of the navigable process through the locks on the Gorodec lock example] Abstract of. thesis. Doctor. Technical. Science: 05.22.19.Nizhny Novgorod: VSAWT, 1996. 21 p. (rus)
10. Krivoshej V.A. *Gidrodinamicheskiye nagruzki, deystvuyushchiye na podyemno-opusknyye vorota shlyuzov* [Hydrodynamicloads, acting on lifting gates of the locks]. Abstract of. thesis. Doctor. Technical. Science: 05.23.07. Leningrad: 1985. 31 p. (rus)
11. BalaninV. V. *Rechnoy transport* [Rivertransport]. 1982. No. 10. Pp. 40–41. (rus)
12. KluevV.V. *Rechnoy transport* [River transport]. 1980. No. 11. Pp. 38–39. (rus)
13. Kuhn R. Die Schleusen des Maln-Donau-Kanals.*Baulngenleur*. 1971. Bd. 46, No. 5. Pp. 163-184.

14. Lausen R. *Gutachten über die Steuerung der Schütze im Fill - und Entleiherbetrieb*. Karlsruhe: BAW, 2000. 94 p.

15. Torenz K. *Gutachten über die seitliche Einleitung von eberschuss wasser in den Einfahrtsbereich der Schleuse Nurnberg*. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). No. 3.03.10043.00, 2003. 68 p.

16. Lipatov I. V. *Razrabotka sredstv i metodov uluchsheniya tekhniko-ekspluatatsionnykh parametrov raboty sudokhodnykh shlyuzov*[Development of the facilities and methods of the navigable locks worktechnician-working parameterimprovement]. Abstract of. thesis. Doctor. Technical. Science: 05.22.19.Nizhny Novgorod: VSAWT, 2006. 31 p. (rus)

17. AbdikarimovR.A., EshmatovKh., BobanazarovSh. P., HodzhayevD.A., EshmatovB. Kh. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 3 (21). Pp. 59–70. (rus)

18. GirgidovA.A. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 3 (21). Pp. 21–27. (rus)

19. KozinetsG.L. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 5 (23).Pp. 43–48. (rus)

20. Chugaev R.R. *Gidravlika*[Hydraulics]. Leningrad: Energia, 1975. 552 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 61-67.