

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**  
**СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 7 (679)**  
Июль 2015 г.

**Научно-теоретический журнал**  
**Издается с марта 1958 г.**  
**Выходит один раз в месяц**

*Главный редактор* В.Г. Себешев, почет. чл.  
РААСН, канд. техн. наук, проф.

*Редакционная коллегия:*

А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
В.А. Игнатъев, д-р техн. наук, проф.  
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (зам. гл. редактора)  
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (зам. гл. редактора)  
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
В.И. Морозов, д-р техн. наук, проф.  
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф.  
Ю.П. Правдивец, д-р техн. наук, проф.  
В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.  
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф.  
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

*Адрес редакции:*

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113  
Тел./факс +7 (383) 266 28 59  
[www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 27.07.15. Формат 70×108<sup>1/16</sup>  
Усл. печ. л. 11,03+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 8555

ООО «Партнеры Сибири»,  
630009, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 16

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2015

**СОДЕРЖАНИЕ**

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ**

**Добрачев В.М., Вершинин Д.С.** Новое конструктивное решение жестких узлов стальных каркасов зданий ..... 5

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

**Колпаков А.В., Абдрахимов В.З.** Исследование процессов горения при обжиге теплоизоляционного изделия из межсланцевой глины и золошлакового материала ..... 18

**ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**Калугин Ю.Б.** Графоаналитическая модель и приближенный метод оценки сроков выполнения проекта с вероятностными временными параметрами ..... 26

**САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА**

**Сколубович Ю.Л., Соппа М.С., Синеева Н.В.** Моделирование нестационарных характеристик движения частиц контактной массы в реакторе-осветителе ..... 38

**Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д.** Змеевиковые теплообменники и их математическое описание ..... 44

<b>Уляшева В.М., Ермоленко Н.М., Кошкарев А.Ю.</b> Численное моделирование теплообмена через неутепленные полы на грунте .....	53
<b>Щинников П.А., Синельников Д.С.</b> Энергоснабжение при малоэтажном строительстве при отсутствии инфраструктуры .....	58
<b>Бройда В.А.</b> Характеристики стабилизатора расхода вентиляционного воздуха прямого действия .....	64
<b>СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ</b>	
<b>Ефименко С.В., Сухоруков А.В., Ефименко В.Н.</b> Обоснование расчетных значений характеристик глинистых грунтов Западно-Сибирского региона .....	69
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Акимова М.И.</b> Система застройки главных площадей городов Западной Сибири ....	78
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Богданов В.С., Александрова Е.Б., Рудакова Е.В., Богданов Д.В.</b> Расчет потребляемой мощности винтового грохота .....	85
<b>Высоцкий Л.И.</b> О константе Кармана. Часть II .....	94
<b>Гальперин Е.М.</b> Установление состава и количества показателей, определяющих состояние системы подачи и распределения воды .....	102
<b>Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Сафронов В.Н., Кугаевская С.А.</b> Влияние магнитного поля на свойства дисперсных систем .....	111
<b>ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО</b>	
<b>Жулин А.Г., Елизарова О.Д.</b> Удаление железа из сапропелевых стоков .....	119

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE  
OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL ASSOCIATION  
OF CONSTRUCTION  
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

**NEWS OF HIGHER  
EDUCATIONAL INSTITUTIONS**

# CONSTRUCTION

**Scientific-theoretical journal  
Published since March 1958  
Monthly**

**N 7 (679)**

July 2015

*Editor-in-Chief* V.G. Sebeshev, PhD, Prof.,  
Honour. Mem. RAACS

*Editorial Board:*

A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS  
V.A. Vorobyov, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS  
V.A. Ignatyev, DSc (Eng), Prof.  
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (Deputy Editor-in-Chief)  
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (Deputy Editor-in-Chief)  
L.S. Lyakhovich, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS  
V.I. Morozov, DSc (Eng), Prof.  
Yu.P. Panibratov, DSc (Econ), Prof., Acad. RAACS  
Yu.P. Pravdivetz, DSc (Eng), Prof.  
V.G. Sebeshev, PhD, Prof., Honour. Mem. RAACS  
Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof.  
Ye.M. Chernyshov, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS

Responsible secretary N.V. Bitkina

*The editorial office's address:*

113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008



Phone number/fax +7 (383) 266 28 59

[www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

## CONTENTS

### BUILDING CONSTRUCTIONS

**Dobrachev V.M., Vershinin D.S.** New frame-parts engineering solutions for the steel frame of the building ... 5

### BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

**Kolpakov A.V., Abdrikhimov V.Z.** Research of combustion processes during burning of heat-insulation products from intershale clay and bottom-ash material ..... 18

### ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION. AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

**Kalugin Yu.B.** Graphic-analytical model and approximate method of computing finish time for networks with imprecise durations ..... 26

### SANITARY ENGINEERING

**Skolubovich Yu.L., Soppa M.S., Sineeva N.V.** Simulation of nonstationary motion characteristics particles of contact mass in the reactor-clarifier ..... 38

**Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D.** Coil heat exchangers and their mathematical description ..... 44

**Ulyasheva V.M., Ermolenko N.M., Koshkarov A.Yu.** Numerical simulation of heat exchanged through non-insulated floors on ground ..... 53

<b>Shchinnikov P.A., Sinelnikov D.S.</b> Power supply in the low-rise construction in the lack of infrastructure .....	58
<b>Broyda V.A.</b> Characteristics of ventilation air flow stabilizer with direct action ....	64
<b>CONSTRUCTION OF MOTOR ROAD AND BRIDGES</b>	
<b>Efimenko S.V., Sukhorukov A.V., Efimenko V.N.</b> Justification of calculated values for properties of clay soils in West Siberian region .....	69
<b>SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY</b>	
<b>Akimova M.I.</b> System of building of main areas of Western Siberia cities .....	78
<b>SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL SECTION</b>	
<b>Bogdanov V.S., Alexandrova E.B., Rudakova E.V., Bogdanov D.V.</b> The power consumption for helical screen .....	85
<b>Vysotskiy L.I.</b> About constant Karman. Part II .....	94
<b>Galperin E.M.</b> Composition and volume of indicators determine the condition of flux distribution of water system .....	102
<b>Sarkisov Ju.S., Gorlenko N.P., Safronov V.N., Kugaevskaya S.A.</b> Effect of magnetic field on properties of disperse systems .....	111
<b>MANUFACTURING APPLICATION OF SCIENTIFIC DEVELOPMENTS</b>	
<b>Zhulin A.G., Elizarova O.D.</b> Removing iron from sapropelic drains .....	119

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.014.2

**В.М. ДОБРАЧЕВ, Д.С. ВЕРШИНИН**

### **НОВОЕ КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ЖЕСТКИХ УЗЛОВ СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ**

Представлен краткий обзор решений жестких узлов сопряжения ригеля с колонной стальных каркасов зданий, предложено новое конструктивное решение жесткого узла с помощью высокопрочной затяжки, произведено сравнение металлоемкости стального каркаса, содержащего различные узлы сопряжения ригеля с колонной, обозначена область применения нового конструктивного решения узла.

**Ключевые слова:** новое конструктивное решение, жесткий узел, высокопрочная затяжка, предварительное напряжение, фланцевый узел.

В связи с широким распространением рамных систем в многоэтажных каркасных зданиях снижение расхода стали в таких системах является актуальной задачей. Опыт строительства и проектирования позволил разработать ряд типовых конструктивных решений узловых сопряжений ригель-колонна<sup>1,2</sup>, применяемых в стальных каркасах зданий.

По степени защемления все узлы сопряжения балки с колонной можно разделить на шарнирные, жесткие и полужесткие [1]. Граница между шарнирными и жесткими узлами с полужесткими довольно условна. Объясняется это тем, что в большинстве случаев при шарнирном сопряжении имеется некоторое защемление ригеля в узле сопряжения с колонной, а при жестком сопряжении — некоторая податливость. Исследованию работы стальных каркасов зданий с учетом реальной изгибной жесткости узлов сопряжения ригеля с колонной посвящены материалы [1–5].

Некоторые наиболее широко применяемые типы жестких узлов представлены на рис. 1. Предлагаемое конструктивное решение узла сопряжения ригеля с крайней колонной [6] показано на рис. 2, вариант конструктивного решения для средней колонны [7] — на рис. 3. Целью нового конструктивного решения [6, 7] является повышение несущей способности жесткого фланцевого узла сопряжения ригеля с колонной. При этом используется высокопрочная затяжка, состоящая, как правило, из двух стержней, с предварительным натяжением. Затяжка располагается в опорной зоне ригеля со стороны верхнего пояса с эксцентрисите-

<sup>1</sup> Серия 2.440-2. Узлы стальных конструкций производственных зданий промышленных предприятий. Вып. 1. Шарнирные узлы балочных клеток и рамные узлы примыкания ригелей к колоннам / ЦНИИПроектстальконструкция, ГПИЛенпроектстальконструкция, ВНИПИПромстальконструкция. М., 1989.

<sup>2</sup> Серия 2.440-2. Узлы стальных конструкций производственных зданий промышленных предприятий. Вып. 7: Болтовые фланцевые рамные соединения балок с колоннами стальных каркасов зданий и сооружений / НИПИПромстальконструкция. М., 1994.

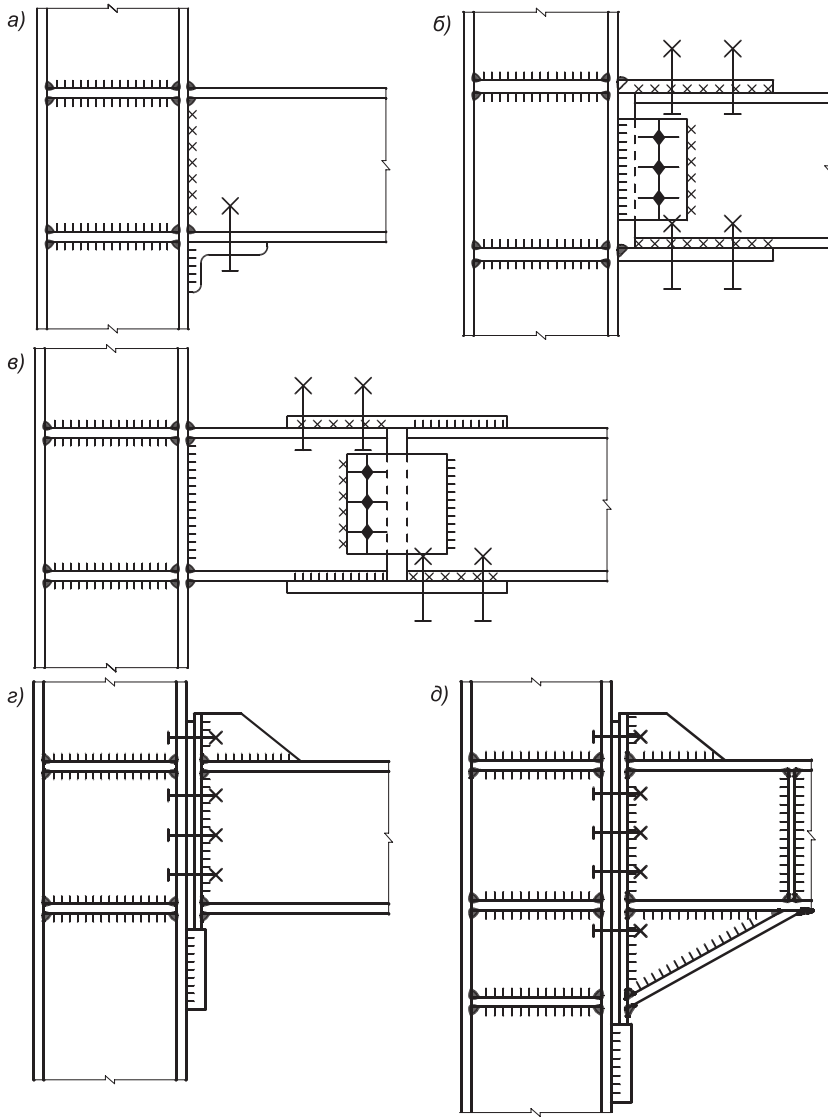


Рис. 1. Конструкции жестких узлов

*a* — приваренный впритык ригель; *б* — узел на накладках; *в* — выносной стык;  
*г* — фланцевый узел; *д* — усиление вутом

том  $e = h_0 + h_p / 2$  относительно оси ригеля. Одним концом она крепится к вертикальной пластине, приваренной к горизонтальным ребрам жесткости колонны, либо к полке колонны, другим — к упору, расположенному на верхнем поясе балки. Предварительное натяжение затяжки производится гайкой с контролем усилия натяжения. В узле опирания ригеля на среднюю колонну затяжка проходит через отверстия в полках колонны и крепится к упорам, расположенным на верхних поясах ригелей.

Высокопрочная затяжка с предварительным натяжением совместно с фланцевым соединением участвует в передаче доли изгибающего момента с ригеля на колонну. Кроме того, в результате предварительного напряжения она создает противоположный по знаку момент в опорной

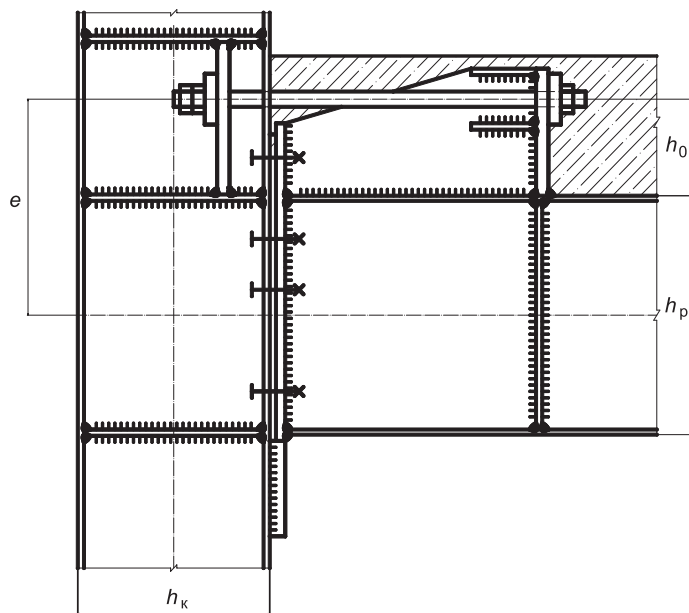


Рис. 2. Новое конструктивное решение рамного узла

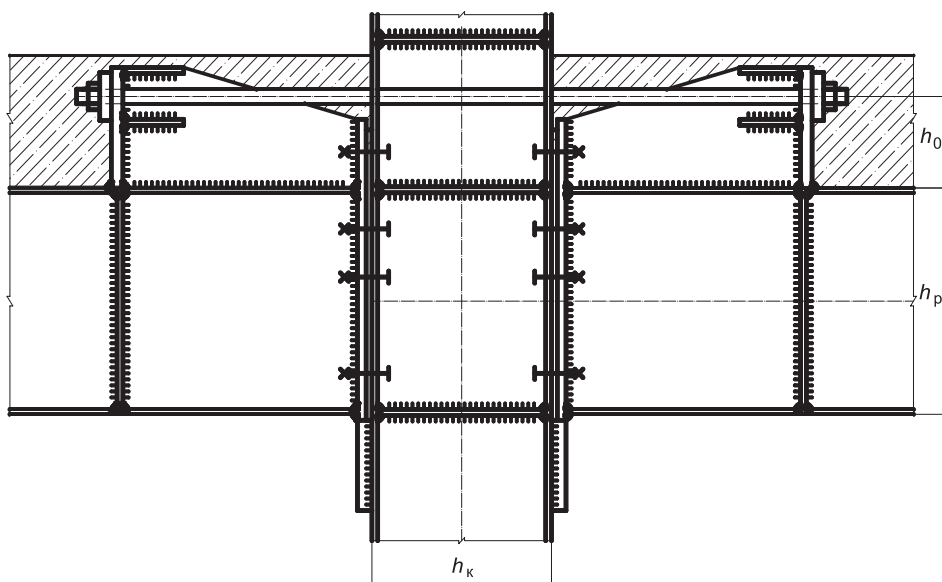


Рис. 3. Вариант решения узла при опирании ригелей на среднюю колонну

и пролетной зонах балки, что ведет к более благоприятному распределению усилий в ригеле. Ее использование приводит к уменьшению требуемой высоты ригеля перекрытия и снижению расхода стали на каркас здания. Например, при  $h_p = 0,4$  м,  $h_0 = 0,1$  м, усилия предварительного напряжения  $N^{п.н} = 0,19$  МН и моменте предварительного напряжения  $M^{п.н} = 6$  тсм может быть применена затяжка, состоящая из одного стержня диаметром 18 мм или из двух стержней диаметром 14 мм из стали 40Х.

Целью настоящего этапа исследования является обоснование эффективности и целесообразности применения предлагаемого конструктивного решения узлов сопряжения ригелей с колоннами с предварительным напряжением. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1) выявить особенности распределения внутренних усилий в рамных системах;

2) выработать укрупненный критерий для определения области рационального применения предлагаемого способа;

3) выполнить опытное проектирование двухпролетной пятиэтажной рамы с жестким фланцевым узлом сопряжения ригеля и колонны, с узлом на накладках и с предлагаемым конструктивным решением узла. Итерационным методом определить оптимальные параметры затяжки (диаметр, длина, марка стали и усилие предварительного напряжения);

4) на основании опытного проектирования сравнить металлоемкости стального каркаса, содержащего различные узлы сопряжения ригеля с колонной;

5) обозначить область рационального применения предлагаемых узлов.

### **1. Особенности распределения внутренних усилий в рамках с предлагаемым способом предварительного напряжения узлов.**

Рассмотрим на простейшем примере однопролетной одноэтажной рамы влияние предварительного напряжения затяжки в жестком узле на распределение внутренних усилий в элементах рамы. Для выявления особенностей распределения усилий была выполнена серия статических расчетов рамы с варьированием соотношения погонных жесткостей ригеля и колонны  $0,1 \leq k \leq 10$ , где  $k = i_p / i_k = I_p H / I_k L$ . Эти соотношения приняты как наиболее распространенные для одноэтажных однопролетных рам.

Анализируя характер распределения внутренних усилий в рассматриваемой одноэтажной однопролетной раме, можно отметить следующее. Для однопролетной одноэтажной рамы  $M_{оп} / M_{пр} = 4 / (3k + 2)$ , где  $k = i_p / i_k$  — соотношение погонных жесткостей ригеля и колонны. При  $k > 0,67$  опорный момент становится меньше пролетного.

Опорный и пролетный моменты в ригеле от предварительного напряжения противоположны по знаку соответствующим моментам в ригеле от вертикального нагружения. Предварительное напряжение уменьшает значения опорного и пролетного расчетных моментов в ригеле, а также разницу между ними. Соотношение опорного и пролетного моментов от предварительного напряжения зависит от соотношения погонных жесткостей ригеля и колонны  $k$  и лежит в диапазоне от  $M_{оп}^{п.н} / M_{пр}^{п.н} = 2,1$  при  $k = 0,1$  до  $M_{оп}^{п.н} / M_{пр}^{п.н} = 8,1$  при  $k = 10$ . В типовых решениях<sup>3</sup> таких рам соотношение погонных жесткостей находится в интервале  $0,7 < k < 1,5$  [8], соотношение моментов для этого интервала  $3,1 < M_{оп}^{п.н} / M_{пр}^{п.н} < 4,3$ , т.е. опорный момент всегда больше пролетного.

Предварительное напряжение существенно увеличивает поперечную силу в колонне на участке между ригелем и затяжкой (на величину усилия предварительного напряжения в затяжке) и изгибающий момент в колонне.

<sup>3</sup> Серия 11-2537 КМ. Стальные конструкции каркасов типа «Канск» одноэтажных производственных зданий с применением несущих рам из прокатных широкополочных и сварных двутавровых балок с шагом 12 м / ЦНИИПроектстальконструкция. М., 1987.



Учитывая результаты рассмотренного примера, а также анализируя соотношения погонных жесткостей типовых решений по серии «Канск», можно сделать вывод, что предлагаемый способ предварительного напряжения в конструкциях одноэтажных однопролетных зданий имеет ограниченное применение. Объясняется это тем, что в большинстве случаев соотношение погонных жесткостей в рамках  $k > 0,67$  и  $M_{оп} < M_{пр}$ ,  $M_{оп}^{п.н} > M_{пр}^{п.н}$ , при таких соотношениях предлагаемый способ не приводит к выравниванию расчетных опорного и пролетного моментов в ригеле. Исключение составляют относительно низкие рамы с большим пролетом (высотой 4,8 м и пролетами 18, 24 м), но и в этом случае возникает проблема конструктивного оформления кровли при размещении затяжки.

Авторами произведен расчетный конечно-элементный анализ влияния предварительного напряжения на распределение усилий в одно-, двух- и трехпролетных одно- и многоэтажных рамах. Для указанных рам получена зависимость отношения опорного и пролетного момента в ригеле  $M_{оп}/M_{пр}$  от соотношения погонных жесткостей  $k$ , которая сравнивалась со справочными данными [9]. Установлено, что расхождение не превышает 3 %. Результаты этого анализа позволяют сделать следующие выводы.

В реальных каркасах однопролетных многоэтажных рам соотношение погонных жесткостей лежит в интервале  $0,1 < k < 0,5$ . Указанному диапазону  $k$  соответствует диапазон соотношения опорного и пролетного моментов в ригеле от вертикального нагружения  $1,8 < M_{оп}/M_{пр} < 2,0$  и диапазон соотношения моментов в ригеле от предварительного напряжения  $2,0 < M_{оп}^{п.н}/M_{пр}^{п.н} < 3,0$ . Поэтому применение предлагаемого способа предварительного напряжения в таких рамах целесообразно, так как позволяет уменьшить опорный и пролетный расчетные моменты в ригеле и разницу между ними.

В многопролетных рамах отношение опорного и пролетного моментов в ригеле у средней колонны  $M_{оп}^{ср}/M_{пр} > 1,5$  при  $0,125 < k < 8$ , а отношение опорного и пролетного моментов в ригеле у крайней колонны  $M_{оп}^{кр}/M_{пр} > 1,2$  при  $k < 0,5$ , в реальных каркасах —  $0,1 < k < 0,5$ . Этот факт подтверждает использование предлагаемого способа во всем диапазоне соотношения погонных жесткостей.

С увеличением высоты здания возрастает опорный момент в ригеле от горизонтальных нагрузок. При этом опорный момент от горизонтального нагружения имеет разные знаки на концах ригеля, что ограничивает область применения предлагаемого способа в высотных зданиях, где момент от горизонтальных нагрузок сопоставим с моментом от вертикальных нагрузок. Например, для однопролетной 15-этажной рамы пролетом 6 м и высотой этажа 3,6 м при вертикальной нагрузке 9,81 кПа и I ветровом районе опорный момент в ригеле второго этажа от вертикальной нагрузки составляет 0,17 МН·м, от ветровой —  $\pm 0,17$  МН·м. Чем выше расположен этаж, тем меньше опорный момент в ригеле от горизонтальных нагрузок. С увеличением числа пролетов здания он уменьшается. Для аналогичной двухпролетной рамы опорный момент в ригеле от ветровой нагрузки становится меньше приблизительно в 2 раза. Поэтому применение предлагаемого способа предварительного напряжения целесооб-

разно в однопролетных многоэтажных зданиях высотой до 15 этажей, двухпролетных многоэтажных зданиях до 25–30 этажей, при числе пролетов от трех и более — до 50 этажей. В более высоких зданиях предлагаемый способ можно использовать только на верхних ярусах.

**2. Критерии для назначения области рационального применения предлагаемого способа предварительного напряжения.**

При предварительном напряжении материал ригеля (при его постоянном сечении) будет использоваться с максимальной эффективностью в случае равенства опорного и пролетного моментов от расчетной комбинации усилий. Учитывая, что вклад усилий от горизонтальных нагрузок в расчетное сочетание для зданий с высотой до 30 м невелик, а также при постоянной высоте ригеля, условие, при котором материал ригеля постоянного сечения используется с максимальной эффективностью, можно представить в виде:

$$\frac{M_{\text{оп}} + M_{\text{оп}}^{\text{п.н}}}{M_{\text{пр}} + M_{\text{пр}}^{\text{п.н}}} = 1, \quad (1)$$

где  $M_{\text{оп}}$ ,  $M_{\text{пр}}$  — опорный и пролетный моменты ригеля от нагружения вертикальной нагрузкой;

$M_{\text{оп}}^{\text{п.н}}$ ,  $M_{\text{пр}}^{\text{п.н}}$  — опорный и пролетный моменты ригеля от предварительного напряжения.

Опорный и пролетный моменты от вертикального нагружения ригеля и от предварительного напряжения можно представить в виде:

$$\begin{aligned} M_{\text{оп}} &= \alpha_1 M; & M_{\text{оп}}^{\text{п.н}} &= \alpha_2 M^{\text{п.н}}; \\ M_{\text{пр}} &= \beta_1 M; & M_{\text{пр}}^{\text{п.н}} &= \beta_2 M^{\text{п.н}}; \\ \alpha_1 + \beta_1 &= 1; & \alpha_2 + \beta_2 &= 1, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$  — коэффициенты распределения моментов, зависящие от соотношения погонных жесткостей  $k$ ;

$M$  — пролетный момент от вертикальных нагрузок для однопролетной шарнирно опертой балки, для случая равномерно распределенной нагрузки  $q$  по длине  $l$  балки, момент  $M = ql^2/8$ , для случая силы  $P$ , приложенной посередине балки, —  $M = Pl/4$ ;

$M^{\text{п.н}} = N^{\text{п.н}}e$  — момент для однопролетной шарнирно опертой балки при предварительном напряжении усилием  $N^{\text{п.н}}$ .

Условие (1) можно записать в виде:

$$f_1 = (2\alpha_1 - 1) - (2\alpha_2 - 1) \frac{M^{\text{п.н}}}{M} = 0. \quad (3)$$

Графики функции  $f_1(k)$  при значениях параметра  $\gamma = M^{\text{п.н}}/M$ , равного 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0, для однопролетной одноэтажной и однопролетной двухэтажной рамы (рис. 4) построены на основании серии статических расчетов рам методом конечных элементов.

Анализируя графики функции  $f_1(k)$ , можно отметить следующее. Для однопролетных одноэтажных рам условие (3) выполняется при  $k < 0,2$ , для типовых решений одноэтажных однопролетных рам —  $0,7 < k < 1,5$ ,

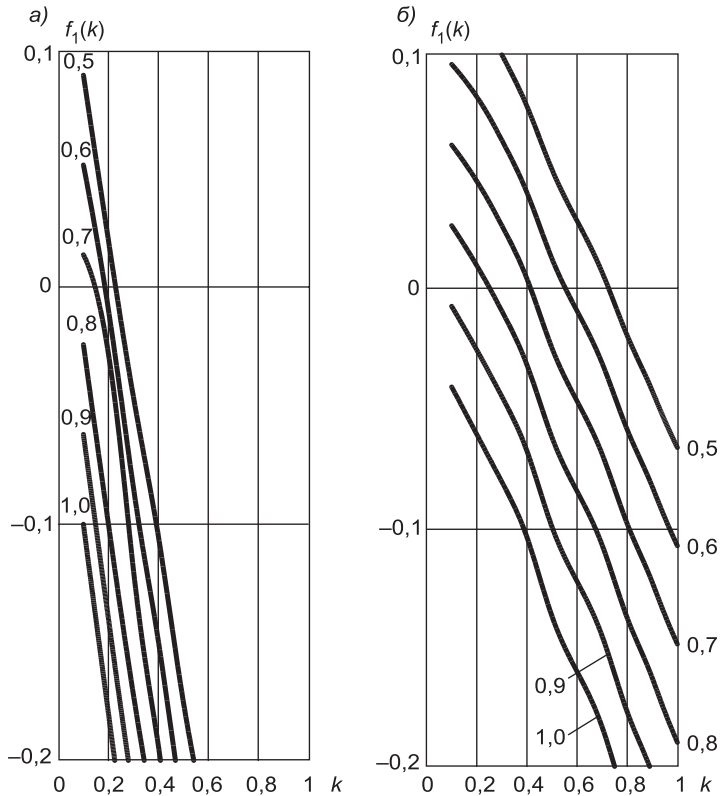


Рис. 4. Графики функции  $f_1(k)$  при параметре  $\gamma = 0,5 - 1,0$  для одноэтажной (а) и двухэтажной (б) однопролетной рамы

это значит, что в таких рамах применять предлагаемый способ предварительного напряжения невозможно. Для двухэтажных однопролетных рам условие (3) выполняется при  $0,1 < k < 0,8$ , в реальных каркасах многоэтажных однопролетных рам соотношение погонных жесткостей лежит в интервале  $0,1 < k < 0,5$ , таким образом, использование предлагаемого способа в данном случае целесообразно. С увеличением значения параметра  $k$  уменьшается значение параметра  $\gamma$ , при котором условие (3) выполняется. Следовательно, чем больше соотношение погонных жесткостей  $k$ , тем меньший момент предварительного напряжения  $M^{п.н}$  требуется для выравнивания опорного и пролетного расчетных моментов в ригеле.

**3. Опытное проектирование.** С целью сравнения металлоемкости стального каркаса, содержащего различное конструктивное оформление узлов сопряжения ригелей с колоннами, была выполнена серия статических расчетов двухпролетной пятиэтажной рамы методом конечных элементов, подбор сечений ригелей и колонн, а также конструирование основных узлов каркаса. Серия статических расчетов осуществлена в программных комплексах Robot и Ansys. Расхождение результатов, полученных в разных программных комплексах, не превышает 5 %. Колонны, ригели и затяжки моделировались с помощью стержневых элементов, для моделирования предварительного напряжения создавалось отдельное нагружение. В расчете учитывались постоянная нагрузка

от веса металлоконструкций и железобетонного перекрытия, полезная нормативная нагрузка (принята равной 3,92 кПа), снеговая нагрузка для IV снегового района и ветровое давление для типа местности В, соответствующее III ветровому району. Высота этажа принята равной 3,6 м, пролет здания — 3, 4, 5, 6, 9 и 12 м, шаг поперечных рам — 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 м.

При опытном проектировании рассмотрены три варианта конструктивного оформления узлов сопряжения ригелей с колоннами — ригели с жестким узлом сопряжения с колоннами (традиционный узел на накладках (см. рис. 1, б), фланцевый жесткий узел (см. рис. 1, в)) и предлагаемое конструктивное решение — ригели с предварительно напряженными затяжками (см. рис. 2, 3). Усилие предварительного напряжения было подобрано из условия (3), а также условия  $M_{оп}^{п.н} \leq M_{расч}$ , где  $M_{расч}$  — опорный момент в ригеле от расчетной комбинации усилий с учетом всех нагрузок. Условие  $M_{оп}^{п.н} \leq M_{расч}$  достигалось несколькими итерациями расчета и изменением параметров предварительного напряжения (длины затяжки, ее сечения, усилия предварительного напряжения и расстояния между осями ригеля и затяжки  $e$ ). Для назначения оптимального усилия предварительного напряжения затяжки применялись графики функции  $f_1(k)$  (см. рис. 4). При подборе сечений ригелей, затяжек и колонн использовались расчетные сочетания усилий для двух стадий: монтажа и эксплуатации конструкции. В стадии монтажа в расчетные сочетания усилий включались усилия от собственного веса конструкций и от предварительного напряжения. В стадии эксплуатации учитывались все загрузки. Необходимость выполнения дополнительного условия  $M_{оп}^{п.н} \leq M_{расч}$  объясняется тем, что для стадии монтажа определяющим моментом является  $M_{оп}^{п.н}$  и сечение ригеля подбирается по опорному моменту предварительного напряжения, если  $M_{оп}^{п.н} > M_{расч}$ , то требуемые сечения ригеля и затяжки будут больше чем при  $M_{оп}^{п.н} \leq M_{расч}$ .

При подборе ригелей и колонн была принята сталь С245, для фланцев ригелей — С345, для затяжек — высокопрочная сталь 40Х, диаметр затяжки от 16 до 36 мм. При подборе и проверке сечений ригелей и колонн осуществлены все необходимые проверки в соответствии с СНиП II-23–81\*, фланцы проверены по [8]. При подборе сечений колонн дополнительно определены прочность и устойчивость стенки в уровне опирания ригелей и установки затяжки, а также прочность полки колонны в месте анкерówki затяжки с учетом местного изгиба от усилий предварительного напряжения в затяжке. В случаях, когда стенка колонны не удовлетворяла данным проверкам, она усиливалась диагональным ребром жесткости, при необходимости локально увеличивалась толщина полки колонны.

**4. Сравнение металлоемкости каркаса, содержащего различные узлы сопряжения ригеля с колонной.** В табл. 1 представлены данные по расходу металла на каркас (с учетом конструктивных деталей) в зависимости от пролета и шага здания. На рис. 5 показаны графики расхода металла на каркас здания. Анализируя данные расчета рамы, можно сделать следующие выводы.

Расчетный момент в опорной и пролетной зонах ригеля при использовании предварительного напряжения затяжки уменьшается в 2–2,3 раза

Таблица 1. Суммарный расход металла на каркас

Вариант узла	Пролет, м	Расход металла, кг/м <sup>2</sup> / % от 2-го варианта, при шаге поперечных рам, м						
		3	4	5	6	7	8	9
1-й — узел на накладках	3	<u>19,901</u> 91	<u>17,523</u> 92	<u>16,398</u> 93	<u>15,71</u> 95	<u>15,445</u> 96	<u>15,177</u> 98	<u>14,65</u> 99
	4	<u>19,58</u> 92	<u>17,655</u> 94	<u>16,417</u> 95	<u>15,731</u> 97	<u>15,372</u> 99	<u>15,139</u> 100	<u>14,955</u> 102
	5	<u>20,104</u> 94	<u>18,298</u> 96	<u>17,289</u> 97	<u>16,353</u> 99	<u>15,834</u> 101	<u>15,455</u> 101	<u>15,174</u> 102
	6	<u>20,684</u> 96	<u>19,232</u> 97	<u>18,449</u> 99	<u>17,538</u> 100	<u>17,212</u> 102	<u>16,871</u> 103	<u>16,75</u> 103
	9	<u>26,275</u> 98	<u>23,25</u> 98	<u>22,236</u> 100	<u>21,39</u> 101	<u>21,3</u> 102	<u>20,384</u> 103	<u>19,996</u> 104
	12	<u>32,723</u> 99	<u>30,414</u> 100	<u>28,768</u> 101	<u>28,294</u> 102	<u>27,885</u> 103	<u>26,182</u> 103	<u>26,184</u> 103
2-й — жесткий фланцевый узел	3	<u>21,899</u> 100	<u>19,043</u> 100	<u>17,634</u> 100	<u>16,547</u> 100	<u>16,088</u> 100	<u>15,485</u> 100	<u>14,814</u> 100
	4	<u>21,239</u> 100	<u>18,792</u> 100	<u>17,262</u> 100	<u>16,229</u> 100	<u>15,525</u> 100	<u>15,076</u> 100	<u>14,697</u> 100
	5	<u>21,47</u> 100	<u>19,151</u> 100	<u>17,734</u> 100	<u>16,484</u> 100	<u>15,705</u> 100	<u>15,311</u> 100	<u>14,82</u> 100
	6	<u>21,566</u> 100	<u>19,911</u> 100	<u>18,728</u> 100	<u>17,533</u> 100	<u>16,829</u> 100	<u>16,435</u> 100	<u>16,202</u> 100
	9	<u>26,823</u> 100	<u>23,655</u> 100	<u>22,233</u> 100	<u>21,124</u> 100	<u>20,959</u> 100	<u>19,845</u> 100	<u>19,268</u> 100
	12	<u>32,997</u> 100	<u>30,312</u> 100	<u>28,368</u> 100	<u>27,661</u> 100	<u>27,122</u> 100	<u>25,382</u> 100	<u>25,37</u> 100
3-й — предлагаемое конструктивное решение	3	<u>21,887</u> 100	<u>19,178</u> 100	<u>17,827</u> 101	<u>16,814</u> 101	<u>16,191</u> 100	<u>15,576</u> 100	<u>14,928</u> 101
	4	<u>20,028</u> 94	<u>17,891</u> 95	<u>16,316</u> 94	<u>15,288</u> 94	<u>14,839</u> 96	<u>14,399</u> 96	<u>14,091</u> 96
	5	<u>19,752</u> 91	<u>17,529</u> 91	<u>16,544</u> 93	<u>15,569</u> 94	<u>14,767</u> 94	<u>14,431</u> 94	<u>13,959</u> 94
	6	<u>19,999</u> 93	<u>18,552</u> 93	<u>17,415</u> 93	<u>16,674</u> 95	<u>15,869</u> 94	<u>15,765</u> 95	<u>15,332</u> 94
	9	<u>23,598</u> 88	<u>21,987</u> 93	<u>19,732</u> 89	<u>19,61</u> 93	<u>19,462</u> 93	<u>18,772</u> 94	<u>18,395</u> 95
	12	<u>29,737</u> 90	<u>27,094</u> 89	<u>26,001</u> 92	<u>25,404</u> 92	<u>24,934</u> 92	<u>24,497</u> 97	<u>24,328</u> 96

по сравнению с традиционными решениями. Напряженно-деформированное состояние крайних колонн при предварительном напряжении ухудшается. Во-первых, на участке между ригелем и затяжкой увеличивается поперечная сила на величину (0,5–0,6)  $N^{п.н}$ . Во-вторых, при анкеровке затяжки на полку колонны необходимо проверять с учетом местного изгиба от усилий предварительного напряжения в затяжке (в большинстве случаев требуется локальное увеличение толщины пол-

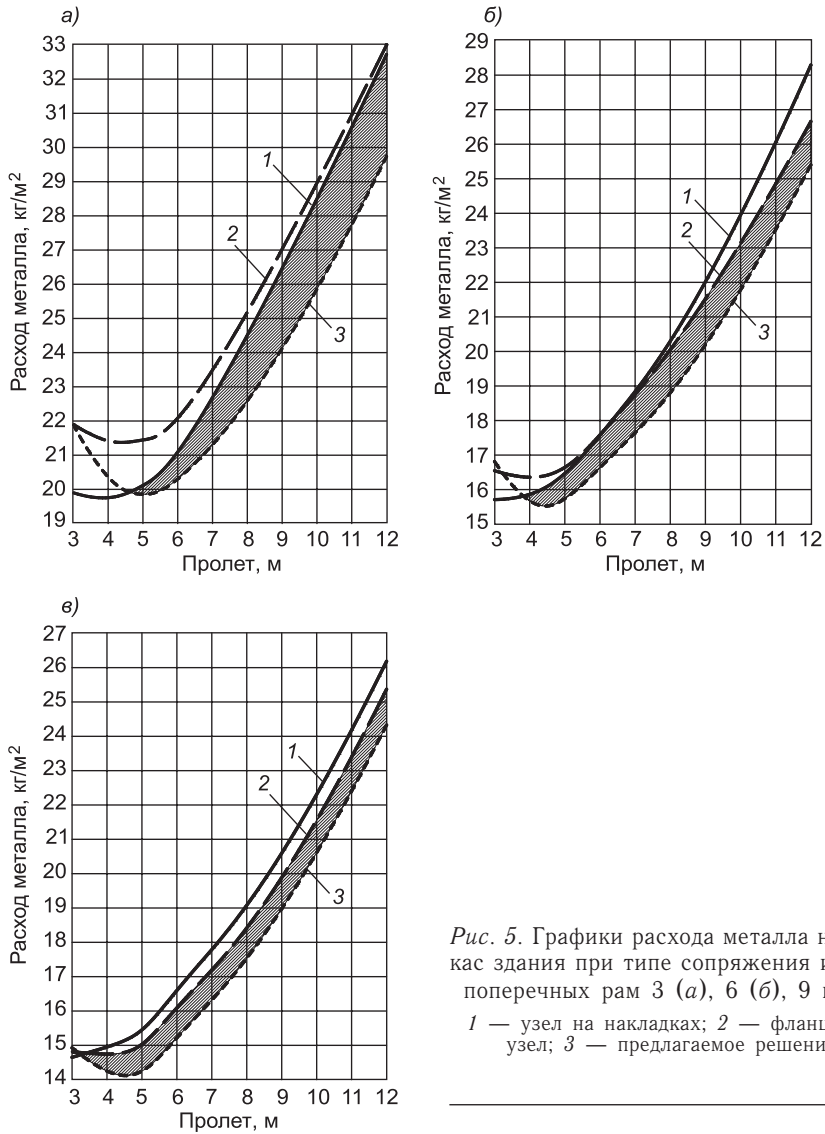


Рис. 5. Графики расхода металла на каркас здания при типе сопряжения и шаге поперечных рам 3 (а), 6 (б), 9 м (в)  
 1 — узел на накладках; 2 — фланцевый узел; 3 — предлагаемое решение

ки). В-третьих, моменты в колоннах от предварительного напряжения повышают расчетный момент на участке между затяжкой и ригелем. Увеличение момента необходимо учитывать при проверке прочности колонны и ее устойчивости в плоскости рамы, так как расчетный момент в средней трети длины колонны изменяется незначительно. Предварительное напряжение не ухудшает напряженно-деформированное состояние средних колонн, следовательно, эффективность предлагаемого способа возрастает в многопролетных зданиях.

Определяющие проверки при подборе сечений ригелей: проверка нормальных напряжений в опорном и пролетном сечениях и приведенных напряжений в опорном сечении. Определяющими при подборе сечений колонн были проверки устойчивости в плоскости и из плоскости рамы.

В результате детального расчета и конструирования основных узлов получены конструктивные коэффициенты (табл. 2). Предлагаемое решение имеет самое высокое значение конструктивного коэффициента за

Таблица 2. Конструктивные коэффициенты

Вариант узла сопряжения ригеля с колонной	Тип элемента		
	ригель	колонна	каркас в целом
Узел на накладках	1,13	1,19	1,15
Жесткий фланцевый узел	1,17	1,19	1,165
Предлагаемое конструктивное решение	1,29 (с учетом затяжек)	1,19	1,215

счет учета массы затяжки, а также массы дополнительных деталей для анкеровки затяжки на ригель и колонну. Экономия металла в варианте с предварительным напряжением жесткого узла достигается за счет уменьшения сечений ригелей. Расход металла на колонны возрастает в среднем на 3 %, но общий расход металла на каркас уменьшается на 7 %.

Усилия предварительного напряжения затяжки, усилия растяжения в затяжке при действии постоянной и полезной нагрузок представлены в табл. 3, данные этой таблицы приведены для шага рам 3 м. Длина затяжек 1/6 пролета рамы. Сжимающие усилия в затяжке, т.е. потери предварительного напряжения от усилий обратного знака, составили 8,83–11,77 кН для всех пролетов и шага 3 м. При нагружении каркаса ветровой нагрузкой усилия в затяжках имеют разные знаки и равны 0–14,72 кН при шаге 3 м и всех пролетах, с увеличением высоты этажа эти усилия уменьшаются.

Таблица 3. Усилия в затяжках для шага рам 3 м

Вид усилия	Пролет, м					
	3	4	5	6	9	12
Усилие предварительного напряжения, кН	88,3	117,7	147,2	235,5	441,5	735,8
Усилие растяжения при действии постоянной и полезной нагрузок, кН	8,8	14,7	20,6	32,4	76,5	141,3

Область, где рационально применять предварительное напряжение (заштрихованные области на рис. 5) для рам с шагом 3, 4, 5 м — при пролетах от 5 м, для рам с шагом 6, 7, 8, 9 — при пролетах от 4 м. Экономия металла на каркас здания для рассмотренных примеров в среднем составила 7 %. При увеличении числа пролетов экономия металла 10–15 %.

**5. Выводы.** Таким образом, на основании исследований установлено, что предлагаемый способ предварительного напряжения в одноэтажных однопролетных рамах использовать нецелесообразно. В таких зданиях область применения ограничивается зданиями высотой до 4,8 м и пролетами 18, 24 м и более. Соотношение погонных жесткостей для большинства реальных однопролетных одноэтажных зданий  $k > 0,67$ , при таком соотношении погонных жесткостей условие (3) не выполняется. В одноэтажных рамах с числом пролетов 2 и более применение предлагаемого способа предварительного напряжения ригелей возможно только над средними колоннами, при этом во всех одноэтажных зданиях возникает проблема конструктивного оформления кровли при размещении затяжки.

В многоэтажных рамах для интервала соотношения погонных жесткостей реальных объектов  $0,1 < k < 0,5$  условие (3) выполняется, т.е. применение предлагаемого способа целесообразно. Опытное проектирование и сравнение металлоемкости каркаса, содержащего различные узлы сопряжения ригеля с колонной, подтверждают этот факт. Экономия металла на каркас здания при использовании предварительного напряжения в среднем составляет 7 %, при увеличении числа пролетов экономия возрастает до 10–15 %. Для шага многоэтажных рам 3–5 м предлагаемый способ предварительного напряжения можно применять при пролетах от 5 м и более, для шага рам 6–9 м — при пролетах от 4 м и более. Область применения предварительного напряжения в многоэтажных рамах ограничивается их высотой и интенсивностью горизонтальных нагрузок, действующих на каркас здания. В однопролетных многоэтажных рамах применение предварительного напряжения целесообразно при количестве этажей не более 15, в двухпролетных — 25–30 этажей, при числе пролетов 3 и более — до 50 этажей, в более высоких зданиях — только на верхних ярусах.

Предлагаемый способ предварительного напряжения рекомендуется применять при реконструкции и усилении всех вышеуказанных рам, а также при увеличении вертикальных нагрузок на перекрытия таких рам.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов, А.Б. Основы проектирования стальных строительных конструкций каркасов зданий с учетом реальной изгибной жесткости и прочности узлов соединений их элементов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. [Текст] / А.Б. Павлов. — М., 1996. — 46 с.
2. Троицкий, П.Н. Опорные соединения разрезных балок на вертикальных накладках, привариваемых к стенке балки (узлы УНС) [Текст] / П.Н. Троицкий, И.В. Левитанский; ЦНИИПСК. — М.: Стройиздат, 1970. — № 4.
3. Троицкий, П.Н. Исследование действительной работы сварного рамного узла крепления и рекомендации по его расчету [Текст] / П.Н. Троицкий, И.В. Левитанский; ЦНИИПСК // Материалы по металлическим конструкциям. — 1977. — № 19.
4. Arlekar, Jaswant N. Improved truss model for design of welded steel moment-resisting frame connections [Текст] / Jaswant N. Arlekar, C.V.R. Murty // J. structural engineering. — 2004. — March.
5. Degertekin, S.O. Design of non-linear semi-rigid steel frames with semi-rigid column bases [Текст] / S.O. Degertekin, M.S. Nayalioglu // Electronic journal of structural engineering. — 2004. — N 4.
6. Добрачев, В.М. Патент на полезную модель № 146862 [Текст] / В.М. Добрачев, Д.С. Вершинин; опубл. 20.10.2014; Бюл. № 29.
7. Добрачев, В.М. Патент на полезную модель № 150481 [Текст] / В.М. Добрачев, Д.С. Вершинин; опубл. 20.02.2015; Бюл. № 5.
8. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций [Текст] / Центр. бюро науч.-техн. информ. — М., 1989. — 52 с.
9. Кузнецов, Н.В. Практический расчет рам и каркасов [Текст] / Н.В. Кузнецов. — Киев: Будивельник, 1970. — 215 с.

*ДОБРАЧЕВ Валерий Михайлович, канд. техн. наук  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*ВЕРШИНИН Дмитрий Сергеевич, инж.*

*Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово*

Получено после доработки 15.06.15



**Dobrachev Valery Mikhailovich**, candidate of technical sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia  
**Vershinin Dmitry Sergeevich**, engineer, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

## **NEW FRAME-PARTS ENGINEERING SOLUTIONS FOR THE STEEL FRAME OF THE BUILDING**

A brief review of existing solutions of rigid coupling bolt knots with a column of steel frames of buildings, invited to new design rigid knot with high string, compared the steel frame metal consumption containing various components coupling bolt to the column designated by the scope of the new constructive solutions knot.

Key words: new constructiv, solutions knot, high-strength string, prestressing, flange connection.

### REFERENCES

1. Pavlov, A.B. Basis of design of structural steel building under real flexural stiffness and strength joints for their elements: Abstract of the thesis for the degree of doctor of technical sciences: 05.23.01. [Text] / A.B. Pavlov. — M., 1966. — 46 p.
2. Troitsky, P.N. Reference compound split beams on vertical overlays welded to the beam web (nodes UNS) [Text] / P.N. Troitsky, I.V. Levitansky; CNIIPSK. — M. : Stroyizdat, 1970. — N 4.
3. Troitsky, P.N. Study the real work of a welded frame assembly fixtures and recommendations for its calculation [Text] / P.N. Troitsky, I.V. Levitansky; CNIIPSK // Materials for metal structures. — 1977. — N 19.
4. Arlekar, Jaswant N. Improved truss model for design of welded steel moment-resisting frame connections [Text] / Jaswant N. Arlekar, C.V.R. Murty // Journal of structural engineering. — 2004. — March.
5. Degertekin, S.O. Design of non-linear semi-rigid steel frames with semi-rigid column bases [Text] / S.O. Degertekin, M.S. Hayalioglu // Electronic journal of structural engineering. — 2004. — N 4.
6. Dobrachev, V.M. The utility model patent number 146862 [Text] / V.M. Dobrachev, D.S. Vershinin; publ. 20.10.2014; Bull. N 29.
7. Dobrachev, V.M. The utility model patent number 150481 [Text] / V.M. Dobrachev, D.S. Vershinin; publ. 20.02.2015; Bull. N 5.
8. Recommendations for the calculation, design, manufacture and installation of flanges of steel building structures [Text] / Central Bureau of Scientific and Technical Information. — M., 1989. — 52 p.
9. Kuznetsov N.V. Practical calculation of frames and carcasses [Text] / N.V. Kuznetsov. — Kiev : Budivelnik, 1970. — 215 p.

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.4:699.86

А.В. КОЛПАКОВ, В.З. АБДРАХИМОВ

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ПРИ ОБЖИГЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ИЗДЕЛИЯ ИЗ МЕЖСЛАНЦЕВОЙ ГЛИНЫ И ЗОЛОШЛАКОВОГО МАТЕРИАЛА

Исследованы процессы горения теплоизоляционных изделий из отходов производств: золошлакового материала и межсланцевой глины без применения природного традиционно-го сырья. Выявлено, что при термообработке теплоизоляционных изделий в интервале 400–600 °С из материала удаляется основная часть летучих веществ, в интервале 1050–1100 °С значительно ускоряется процесс восстановления железа, при температуре обжига 1100 °С в керамическом материале органические соединения практически отсутствуют.

Ключевые слова: межсланцевая глина, золошлаковый материал, термообработка, процессы горения, восстановление, керамический материал.

**Введение.** Одной из актуальных задач промышленности стеновой керамики в настоящее время является производство изделий для несущих и ограждающих конструкций с классом по средней плотности 0,8, которые по теплотехническим характеристикам относятся к группам изделий высокой эффективности с теплопроводностью менее 20 Вт/(м · °С) [1]. Производство и потребление таких теплоизоляционных материалов в России гораздо меньше, чем в Европе и Северной Америке, несмотря на то что во многих странах климат мягче.

Цель работы — исследовать процессы горения при обжиге теплоизоляционного изделия из отходов производств: золошлакового материала и межсланцевой глины без применения природного традиционного сырья, так как процессы горения при обжиге теплоизоляционных материалов формируют основные физико-механические свойства изделий.

В настоящей работе изложены вопросы кинетики выгорания угольных частиц при обжиге теплоизоляционного материала из оптимального состава [1, 2], мас. %: межсланцевая глина — 60, золошлаковый материал — 40.

**Экспериментальная часть.** Для производства керамических теплоизоляционных материалов в качестве глинистого компонента использовалась межсланцевая глина — отход горючих сланцев, достаточно хорошо изученная в работе [1]. По числу пластичности она относится к высокопластичному глинистому сырью (число пластичности 27–32) с истинной плотностью 2,55–2,62 г/см<sup>3</sup>. Оксидный и поэлементный составы представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Химический состав компонентов, мас. %

Компонент	Содержание оксидов						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	П.п.п.
Межсланцевая глина	45–47	13–14	5–6	11–13	2–3	3–4	9–20
Золошлаковый материал	48,15	16,7	7,42	3,99	2,36	0,1	20,84

Таблица 2. Поэлементный анализ компонентов, мас. %

Компонент	C	O	Na	Mg	Al + Ti	Si	S	K	Ca	Fe
Межсланцевая глина	7,73	50,06	0,46	1,04	7,20	17,66	1,83	1,75	10,53	3,35
Золошлаковый материал	5,88	51,48	—	—	11,5+1,44	17,56	1,1	3,59	3,03	4,42

В качестве отощителя и выгорающей добавки для производства теплоизоляционных изделий использовался золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС [2] (см. табл. 1, 2).

Одним из основных свойств золошлакового материала с повышенным содержанием углерода является его теплотворная способность, дающая возможность использовать данный компонент не только как отощитель, но и в качестве топливосодержащего исходного материала, позволяющего отказаться от ввода топлива в шихту. Содержание углерода и теплотворная способность Тольяттинского золошлака определены согласно ГОСТ 147–84. В исследуемом золошлаковом материале  $C_a$  (углерода) 5,88 %, а теплотворная способность  $\theta_p^H$  3582 кДж/кг [2].

Исследования состава газов, выделяющихся при обжиге теплоизоляционного материала, проводили на хроматографе ХЛ-4. Хроматографический метод — это физико-химический метод разделения сложных смесей газов на составляющие компоненты. При этом происходит распределение компонентов смеси между двумя фазами, одна из которых неподвижная, а другая — подвижная. В газовой хроматографии, как известно, подвижной фазой является газ.

Процесс горения твердого топлива углерода принято разбивать на пять этапов [3, 4]:

- 1) доставка окислителя из атмосферы к поверхности раздела фаз путем молекулярной и конвективной диффузии;
- 2) адсорбция молекул окислителя на поверхности углерода;
- 3) взаимодействие адсорбированного окислителя с атомами углерода и образование продуктов реакции, также адсорбированных на углероде;
- 4) десорбция продуктов реакции;
- 5) удаление (редиффузия) продуктов в атмосферу.

По мнению авторов работ [3, 4], процесс горения включает в себя три категории стадий: диффузионную, адсорбционную и химическую.

Газовая среда, окружающая керамический материал в период термообработки при нагревании, как известно, является одним из движущих факторов интенсивности протекания физико-химических процессов. С началом термической обработки до 180 °С из образцов выделяется

остаточная вода<sup>1, 2</sup>. Изучение динамики газовыделения из исследуемого материала показывает, что в условиях нормального давления, начиная с 250 °С, в результате разложения органических веществ наблюдается выделение  $H_2$ ,  $CO$ ,  $SO_3$  и  $CO_2$ . При термической обработке теплоизоляционного материала в интервале температур 400–600 °С из изделия удаляются летучие углеводороды<sup>1, 2</sup>. При температуре 400–500 °С физическая адсорбция диоксида углерода на поверхности углерода уступает место хемосорбции без выделения  $CO$  [3, 4]. Такая хемосорбция приводит к возникновению на поверхности углерода двух комплексов: кетенового  $CN_2=C=O$  и кето  $>C=O$  (карбонильная группа). При нагреве теплоизоляционных материалов до 600 °С в большинстве случаев углеводороды удаляются из изделий<sup>1, 2</sup>. С повышением температуры кетенные комплексы становятся неустойчивыми и при температуре 600–700 °С покидают поверхность углерода, а на их месте возникают новые кетенные комплексы [3, 4].

Условия доставки окислителей и отвода продуктов реакций от поверхности углерода во многом зависят от характера макропотоков дымовых газов. Авторы работы [4] различают два случая. Первый — ламинарное течение макропотока. У этого потока отсутствует составляющая, перпендикулярная границе раздела фаз, и поэтому ламинарный поток не увеличивает диффузию. Второй — турбулентное течение конвективного потока, которое характеризуется сложной траекторией движения струек газа.

В процессе нагрева органические примеси обугливаются (главным образом во внутренних слоях керамического материала, изолированных от доступа кислорода воздуха), распадаясь на летучие и углистые остатки, которые сгорают с трудом. Процесс этот аналогичен сухой перегонке топлива. Обугливание с образованием углистого остатка происходит в интервале температур 500–800 °С. При термообработке керамических материалов выделяется газовая фаза, которая также является активным реагентом, влияющим на протекающие в этих материалах физико-химические процессы<sup>2</sup>. Правильная оценка качественного состава и количественного соотношения компонентов газовой фазы будет способствовать выбору оптимальных режимов термообработки для получения керамического материала с заданными свойствами.

При термической обработке до 180 °С суммарное содержание газов — восстановителей (водорода и угарного газа), как следует из табл. 3, составляет около 29 %, что свидетельствует о восстановительном характере газовой среды. В интервале температур 350–550 °С в составе газовой среды отмечается интенсивное уменьшение содержания окислителя (кислорода) и нейтрального газа (азота). В интервале температур 550–1050 °С наблюдается незначительное снижение содержания кислорода и азота.

При температурах 800 °С и выше формируются пиролитические формы углерода (кокс и полукокс).

<sup>1</sup> Абдрахимов В.З., Рощупкина И.Ю., Абдрахимова Е.С. Процессы горения углерода при обжиге теплоизоляционного материала из отходов горючих сланцев // Кокс и химия. 2012. № 11. С. 35–41.

<sup>2</sup> Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Исследование процессов горения при обжиге теплоизоляционного материала из техногенного сырья цветной металлургии и энергетики // Журн. прикл. химии. 2012. Т. 85, вып. 8. С. 1247–1252.

Таблица 3. Состав газовой среды, выделяющейся при обжиге керамического материала, %

$t_{\text{обж}}, ^\circ\text{C}$	H <sub>2</sub>	CO	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
180	3,80	29,07	8,41	25,18	32,30	1,08
350	5,90	34,64	6,80	23,03	28,87	1,70
550	8,88	40,30	2,01	29,80	19,88	2,87
950	9,04	51,05	1,95	20,88	17,09	—
1050	7,20	70,25	1,94	4,03	16,58	—

Пиролитический углерод (пироуглерод) — это углеродные пленки, образующиеся на нагретых поверхностях по причине термического нарушения целостности вещества. Этот класс материалов, отличающихся структурой и свойствами, объединен принципом получения.

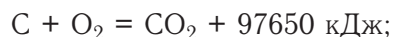
Пироуглерод получается путем кристаллизации из газовой фазы на гладкой твердой поверхности. Изначально происходит образование «зародышей» на поверхности и их рост, в процессе которого атомы газообразного углерода взаимодействуют с углеродом «зародышей», в результате чего образуется твердая структура. Твердая структура растет в виде конуса, медленно расширяясь, основания конусов заполняют всю поверхность образования «зародышей», превращаясь в цилиндры. Внутренние слои углеродных атомов образуют графитоподобную структуру. Существуют два типа пироуглерода<sup>2</sup>, структура и свойства которых определяются температурами образования: низкотемпературный (800–1100 °С) и высокотемпературный (1400–2200 °С).

Исследования показали, что основными компонентами газовой фазы при обжиге керамических материалов при температуре 950 °С являются: CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и некоторые другие газы (см. табл. 3)<sup>1, 2</sup>.

При выгорании образовавшегося углистого остатка происходят следующие процессы [3, 4]:

- а) диффузия кислорода через слой керамики;
- б) химические реакции горения с образованием внутри керамики оксида углерода;
- в) диффузия образовавшегося оксида углерода к поверхности керамики;
- г) сгорание оксида углерода за счет кислорода окружающей среды.

Скорость выгорания углистого остатка определяется самым медленным процессом — диффузией кислорода через слой керамики. Кислород вступает в соединение с углеродом по реакциям [3, 4]:



Наличие внутри керамического материала кокса при недостатке кислорода приводит к восстановлению CO<sub>2</sub> до оксида углерода по реакции:



При обжиге керамических изделий выгорание углерода усложняется процессом дегидратации, которая в условиях скоростного обжига происходит при температурах выше 500 °С. Химически связанная вода из гли-

нистого материала выделяется постепенно (дегидратация) в широком интервале температур (от 200 до 800 °С и выше, но основная масса воды — при температуре выше 500 °С) в зависимости от характера и степени изоморфного замещения одних атомов другими в кристаллической решетке<sup>2</sup>. В связи с этим затрудняется диффузия кислорода и соответственно выгорание углистого остатка. Количество органических примесей в образцах, обожженных в парогазовой среде и в среде водяного пара в пределах температур 750–850 °С, в 6–7 раз больше, чем в образцах, обожженных в окислительной среде<sup>1,2</sup>.

Начиная с температуры 800 °С, CO<sub>2</sub> взаимодействует с низкотемпературным пироуглеродом не только с поверхности<sup>1,2</sup>. Молекулы CO<sub>2</sub> внедряются в межбазисное пространство низкотемпературного пироуглерода и ослабляют связи атомов углерода с массой кристалла пироуглерода, подготавливая их к взаимодействию с внешними молекулами CO<sub>2</sub>. Согласно работам<sup>1-4</sup>, реакция CO<sub>2</sub> с С складывается из двух этапов: первый — молекулы CO<sub>2</sub>, ударяясь о поверхность пироуглерода, приводят к образованию адсорбированного и газообразного оксида углерода. Эта часть реакции идет по схеме реакции первого порядка. Как известно, реакция первого порядка описывается уравнением [3, 4]:

в дифференциальной форме

$$-dc/d\tau = k_1c; \quad (1)$$

в интегральной форме

$$k_1 = (1/\tau)\ln(c_0/c). \quad (2)$$

Второй этап — десорбция адсорбированного оксида углерода: реакция идет по схеме второго порядка. Кинетическое уравнение реакции второго порядка при постоянном значении диоксида углерода в дифференциальной форме описывается уравнением [3, 4]:

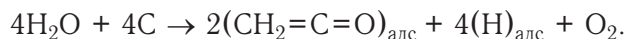
$$-dc/d\tau = k_2c^2; \quad (3)$$

в интегральной форме

$$k_2 = (1/\tau)(1/c - 1/c_0), \quad (4)$$

где  $c_0$  — начальное содержание (концентрация) пироуглерода, %;  $c$  — содержание пироуглерода, % в момент времени  $\tau$ .

Эксперименты, проведенные в работах<sup>1-3</sup> в условиях глубокого вакуума, показали, что в результате реакции H<sub>2</sub>O с С образуются СО и H<sub>2</sub> и только в эквимолекулярных количествах. В интервале температур 750–1050 °С молекулы воды, ударяясь о поверхность пироуглерода, распадаются на кетокомплексы (CH<sub>2</sub>=C=O)<sub>адс</sub> и адсорбированные атомы водорода (H)<sub>адс</sub>:



Адсорбционный комплекс (H)<sub>адс</sub> является более прочным, чем кетокомплекс. При температуре 900 °С и выше разлагается кетокомплекс,

<sup>3</sup> Вдовина Е.В., Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Определение черной сердцевины при обжиге кирпича из бейделлитовой глины и продукта сгорания базальтовой шихты // Башкир. хим. журн. 2007. Т. 14, № 2. С. 102–104.

<sup>4</sup> Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Исследование тепломассообменных процессов при обжиге керамических материалов из техногенного сырья // Материаловедение. 2008. № 1. С. 18.

и, таким образом, на каждый моль израсходованной  $\text{CO}_2$ , образуется уже два моля  $\text{CO}$ , т.е. образование  $\text{CO}$  соответствует обычной стехиометрической записи реакции<sup>1,2</sup>:



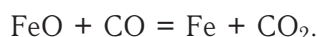
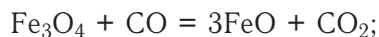
Наличие в изделии при спекании невыгоревшего углерода может стать причиной не только вспучивания и образования черной сердцевины, но и появления трещины. Эти дефекты особенно характерны для масс с повышенным содержанием органики.

Дымовые газы<sup>1-3</sup>, поступающие в зону подогрева теплоизоляционного материала (температура материала 400–1000 °С), содержат следующие компоненты, % по объему:  $\text{H}_2\text{O} = 15,0$ ;  $\text{CO}_2 = 8,0$ ;  $\text{O}_2 = 8,0$ ;  $\text{N}_2 = 69,0$ .

Совместное рассмотрение взаимодействия указанных окислителей с углеродом представляется крайне затруднительным, поскольку реакции проходят одновременно и тепловые эффекты накладываются друг на друга<sup>1,2</sup>.

Углеводородные соединения, создавая восстановительную среду при низких температурах, способствуют переводу в расплав минеральной части при температурах 1100–1200 °С. По данным работ<sup>1-4</sup> на образование газовой фазы тратится пироуглерод, масса которого составляет всего 0,1 % от массы гранулы. Избыточное содержание углерода снижает вспучиваемость и прочность изделия.

Если в процессе спекания с участием жидкой фазы углеродистый материал изолируется от воздуха до того, как он полностью окислится, то при более высоких температурах он будет действовать как восстановитель. В интервале температур 1050–1100 °С значительно ускоряется процесс восстановления железа<sup>1,2</sup>. В железосодержащих массах оксид железа может восстанавливаться по реакциям:



При температуре обжига 1100 °С в керамическом материале органические соединения практически отсутствуют (табл. 4). При повышении температуры обжига до 1100 °С происходит образование более сложных соединений (анортит, муллит), которые придают изделию высокую механическую прочность<sup>2</sup>.

Середина и поверхность образца сильно различаются содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{FeO}$ . На поверхности керамического материала  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  преобладает над  $\text{FeO}$ , а в середине наоборот (см. табл. 4).

При поддержании окислительной среды в зоне обжига более темный цвет возникает только в середине обожженного керамического теплоизо-

**Таблица 4. Содержание органических соединений и оксидов железа в керамическом материале при обжиге 1100 °С**

Материал	Органика	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$
Исходная масса	9,44	6,12	1,26
Черная сердцевина керамики после обжига	Следы	1,80	4,25
На поверхности керамики	Следы	4,02	2,15

ляционного материала. При наличии в зоне обжига СО изделие имеет две зоны — более темный цвет в середине и более светлый цвет на поверхности, а между ними располагается зона, имеющая нормальный для данной массы цвет.

В рассмотренном случае источником восстановления  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в  $\text{FeO}$  и образования темного цвета в середине керамического материала является выгоревший углерод, а на поверхности — СО в газовой среде зоны обжига.

**Выводы.** С началом термической обработки до  $180\text{ }^\circ\text{C}$  из образцов выделяется остаточная вода. Изучение динамики газовой выделенности из исследуемого материала показывает, что в условиях нормального давления, начиная с  $250\text{ }^\circ\text{C}$ , в результате разложения органических веществ наблюдается выделение  $\text{H}_2$ , СО,  $\text{SO}_3$  и  $\text{CO}_2$  из керамических образцов. При температуре  $400\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$  физическая адсорбция диоксида углерода на поверхности углерода уступает место хемосорбции без выделения СО. Такая хемосорбция приводит к возникновению на поверхности углерода двух комплексов: кетенового  $\text{CH}_2=\text{C}=\text{O}$  и кето  $>\text{C}=\text{O}$  (карбонильная группа).

При нагреве теплоизоляционных материалов до  $600\text{ }^\circ\text{C}$  углеводороды удаляются из изделия. С повышением температуры кетенные комплексы становятся неустойчивыми и при температуре  $600\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$  покидают поверхность углерода, а на их месте возникают новые кетенные комплексы. При температуре  $900\text{ }^\circ\text{C}$  и выше разлагается кетокомплекс, и, таким образом, на каждый моль израсходованной  $\text{CO}_2$  образуется уже два моля СО, т.е. образование СО соответствует обычной стехиометрической записи реакции.

В интервале температур  $1050\text{--}1100\text{ }^\circ\text{C}$  значительно ускоряется процесс восстановления железа. При температуре обжига  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  в керамическом материале органические соединения практически отсутствуют.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдрахимов, В.З. Экологические, теоретические и практические аспекты использования шламов флотационного углеобогащения в производстве теплоизоляционных материалов [Текст] / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова // Кокс и химия. — 2013. — № 3. — С. 39–43.
2. Абдрахимов, В.З. Исследование теплопроводности теплоизоляционных изделий на основе бейделлитовой глины и золошлакового материала [Текст] / В.З. Абдрахимов, В.А. Михеев, Е.С. Абдрахимова // Новые огнеупоры. — 2011. — № 7. — С. 50–54.
3. Есин, О.А. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. 1: Реакции между газообразными и твердыми фазами [Текст] / О.А. Есин, П.В. Гельд. — Свердловск : Металлургия, 1962. — 671 с.
4. Петров, В.П. Процессы горения [Текст] / В.П. Петров, Б.А. Максимов // Современное состояние и перспектива развития строительного материаловедения: материалы восьмых академических чтений РААСН. СГАСУ. — Самара, 2004. — С. 407–410.

КОЛПАКОВ Александр Викторович, асп.; E-mail: roland.alex@mail.ru  
Самарская академия государственного и муниципального управления  
АБДРАХИМОВ Владимир Закирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru  
Самарский государственный экономический университет

Получено 21.03.14



**Kolpakov Aleksandr Viktorovich**, post-graduate student; E-mail: roland.alex@mail.ru, Samara Academy State and Municipal Management, Russia

**Abdrakhimov Vladimir Zakirovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: 3375892@mail.ru, Samara State University of Economics, Russia

## **RESEARCH OF COMBUSTION PROCESSES DURING BURNING OF HEAT-INSULATION PRODUCTS FROM INTERSHALE CLAY AND BOTTOM-ASH MATERIAL**

Combustion processes of heat-insulation products researched from waste production: intershale clay and bottom-ash material without use of traditional natural raw materials. Revealed, that during heat treatment of heat-insulation products the main part of the volatiles from the material removed in the range of 400–600 °C, iron recovery process is greatly accelerated in the range of 1050–1100 °C, organic compounds are practically absent in the burned ceramic material at the burning temperature of 1100 °C.

Key words: intershale clay, bottom-ash material, heat treatment, combustion processes, recovery, ceramic material.

### REFERENCES

1. Abdrakhimov, V.Z. Ecological, theoretical and practical aspects of the use of sludge flotation of coal preparation in the production of heat-insulation materials [Text] / V.Z. Abdrakhimov, E.S. Abdrakhimova // Coke and Chemistry. — 2013. — N 3. — P. 39–43.
2. Abdrakhimov, V.Z. Thermal conductivity research of heat-insulation materials on base of beidellite clay and bottom-ash material [Text] / V.Z. Abdrakhimov, V.A. Mikheev, E.S. Abdrakhimova // New Refractories. — 2011. — N 7. — P. 50–54.
3. Esin, O.A. Physical chemistry of pyrometallurgical processes. P. 1: Reactions between the solid and gaseous phases [Text] / O.A. Esin, P.V. Geld. — Sverdlovsk : Metallurgiya, 1962. — 671 p.
4. Petrov, V.P. Combustion processes [Text] / V.P. Petrov, B.A. Maksimov // Current state and prospects of development of building materials: materials eighth academic readings RAASN. SGASU. — Samara, 2004. — P. 407–410.

## **ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**УДК 69.05:658.512.6.001**

**Ю.Б. КАЛУГИН**

### **ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СРОКОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА С ВЕРОЯТНОСТНЫМИ ВРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Изложены модель и метод оценки сроков выполнения работ с вероятностными временными параметрами. Графоаналитическая модель основана на использовании бинарного дерева событий календарного графика. Приближенный метод базируется на применении вероятностных параметров отдельных работ и коэффициента их совмещения. Установлены зависимости между коэффициентами совмещения работ календарного плана и смещением математического ожидания совместных событий параллельных работ. Реализация предлагаемого метода позволит еще на стадии планирования определить наиболее вероятные сроки выполнения комплексов работ, повысить надежность и достоверность календарных планов.

**Ключевые слова:** календарное планирование и управление проектом, метод критического пути с неопределенными продолжительностями работ, законы распределения, бинарное дерево событий, коэффициент совмещения работ, вероятное время окончания проекта.

Недостаточная точность и достоверность методов и моделей календарного планирования очень часто приводят к отказу от планирования в целом. В современных условиях, характеризующихся ростом неопределенности, задача строительной науки предложить к практическому использованию методы, позволяющие существенно повысить достоверность планов и графиков с учетом воздействия случайных факторов.

Основным структурообразующим элементом любого календарного плана служит технологический процесс (простой или сложный), результатом которого является законченный вид работ, или готовый конструктивный элемент здания (сооружения). Технологические процессы реализуются в ходе функционирования частных или специализированных потоков (работы звеньев или специализированных команд).

Очевидно, что точность и достоверность календарного планирования при решении различных задач зависят в первую очередь от точности определения параметров соответствующих технологических процессов (производительности, продолжительности и др.). Ряд исследований [1] показал, что воздействие дестабилизирующих факторов (технических, технологических, организационных, природно-климатических и др.)

может существенно увеличивать фактическую продолжительность различных технологических процессов в сравнении с плановой. Так, для ряда технологических процессов железнодорожного строительства получены равновероятные значения продолжительности работ на захватке, соответствующей сменной выработке (норм времени), для различных уровней воздействия случайных факторов (табл. 1) [2].

Таблица 1. Равновероятные значения продолжительности работ на единичном участке для различных уровней воздействия случайных факторов

Уровни воздействия случайных факторов	Равновероятные значения продолжительности работ для различных уровней воздействия факторов (смен)													$t_{\text{ср}}$
Сильный (S)	7,682	4,688	3,664	2,846	2,370	2,005	1,742	1,536	1,360	1,196	1,042	0,866	2,583	
Средний (M)	3,415	2,125	1,614	1,363	1,207	1,083	0,987	0,919	0,862	0,813	0,762	0,695	1,3204	
Слабый (L)	2,594	1,610	1,214	1,014	0,925	0,808	0,738	0,696	0,648	0,617	0,581	0,558	1,000	

При сильном уровне воздействия (низкая квалификация рабочих, изношенная техника, неустоявшийся график поставки материалов и др.) вероятная продолжительность выполнения технологического процесса изменяется в диапазоне от 0,866 до 7,682 смены, при среднем значении 2,583; при среднем уровне от 0,695 до 3,415 смены; при слабом уровне воздействия случайных факторов (высоком уровне организации и управления) от 0,558 до 2,594, при среднем значении 1,0 смена.

Кроме того, на итоговые сроки реализации проекта в значительной степени влияют и структура самого календарного графика, его сложность, насыщенность и др.

Известно, что в любом календарном графике (плане) независимо от его вида и формы (линейный одномерный, циклограмма, сетевой, матричный и др.) основными структурообразующими элементами являются:

- ресурс (исполнитель, вид работ);
- объект (фронт работ, участок, захватка).

Наиболее ярко эти структурообразующие элементы представлены в календарных графиках поточного строительства.

Рассмотрим хорошо известную модель строительного потока (рис. 1), представленную в виде ориентированного графа, на котором отображены его ресурсные (организационные) и объектные (технологические) связи.

Модель ясно иллюстрирует, что каждое начальное событие любой работы графика (кроме событий первого вида работ (A) и событий на первом объекте) является результатом двух предшествующих работ — перехода ресурса с предыдущего фронта работ ( $j-1$ ) и окончания работы предшествующего ресурса ( $i-1$ ) на данном фронте работ.

Аналогичный вывод можно сделать при анализе структуры цепочки работ с учетом неявных ресурсных и объектных связей к событиям графика (рис. 2) [3].

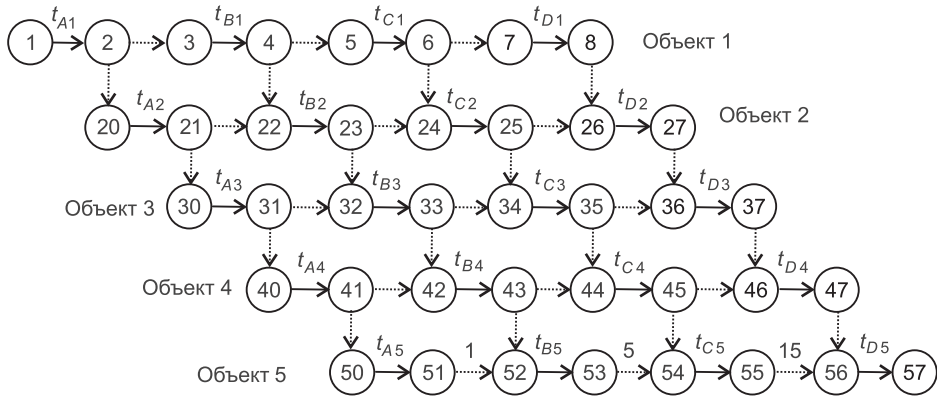


Рис. 1. Модель строительного потока

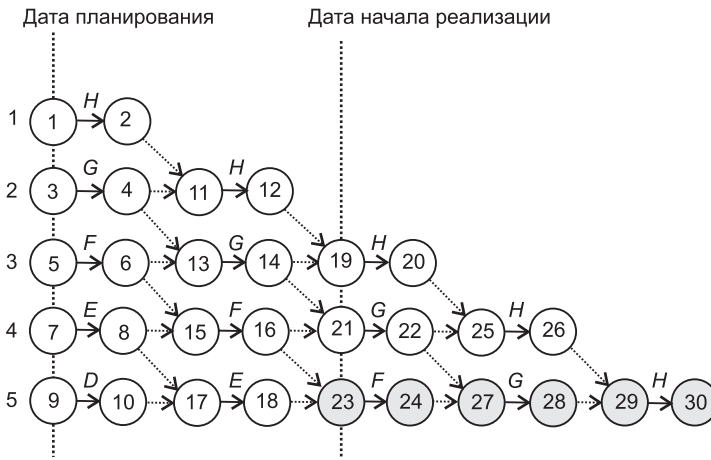


Рис. 2. Модель цепочки работ с учетом даты планирования и неявных ресурсных и объектных связей

В этой связи представляется, что структура любого календарного графика явно или неявно бинарная, и следовательно, может быть адекватно отображена бинарной структурой, фрагментами которой являются ресурсные и объектные связи. Сущность этих связей состоит в реализации зависимости

$$T_{ij}^H = \max(T_{i,j-1}^o; T_{i-1,j}^o), \tag{1}$$

где  $T_{ij}^H$  — срок начала работы  $i$ -й команды (подразделения) на  $j$ -м объекте;  
 $T_{i,j-1}^o$  — срок окончания работы  $i$ -й команды (подразделения) на  $(j-1)$ -м объекте;  
 $T_{i-1,j}^o$  — срок окончания работы  $(i-1)$ -й команды (подразделения) на  $j$ -м объекте.

Использование данного подхода позволяет представить календарный график (рис. 3) в виде бинарного дерева (рис. 4). В этих условиях на каждом уровне бинарной структуры две работы (в данном случае  $i-j$  и  $k-l$ ) выполняются параллельно по времени и определяют после совместного

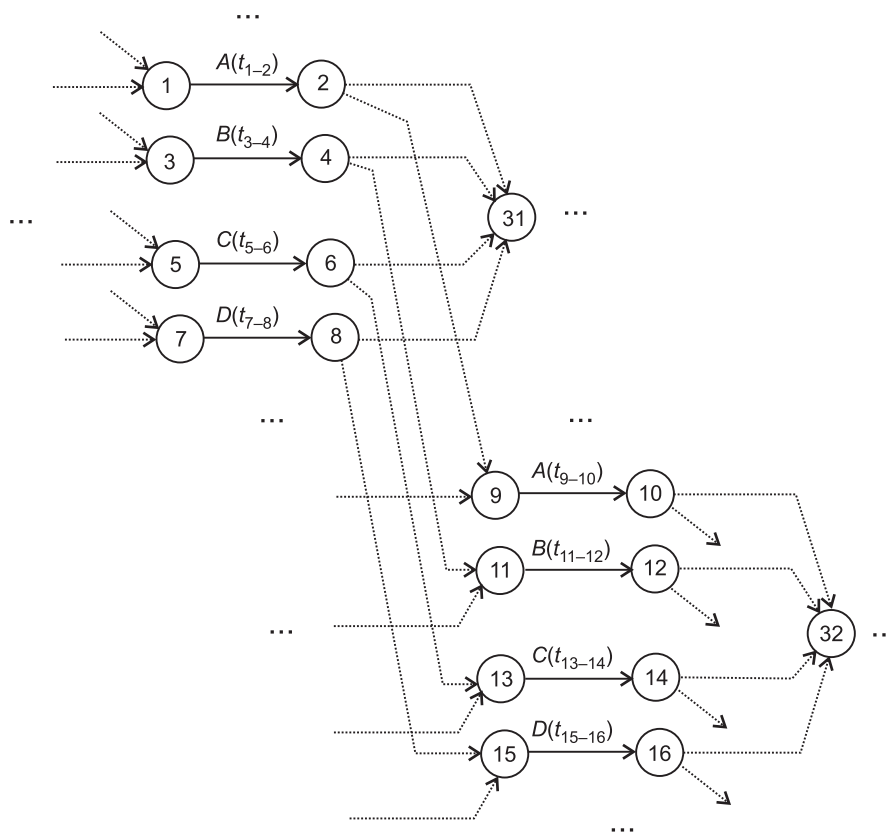


Рис. 3. Первоначальный фрагмент графика

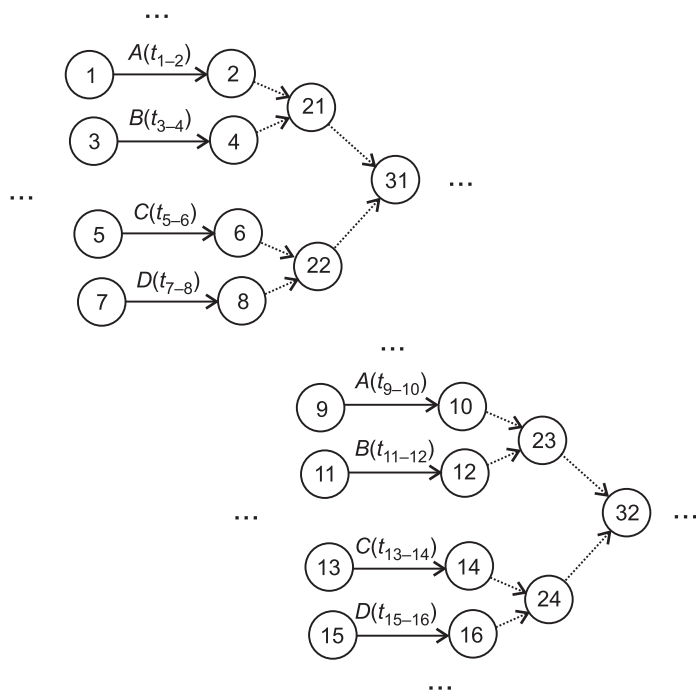


Рис. 4. Фрагмент графика в виде бинарного дерева

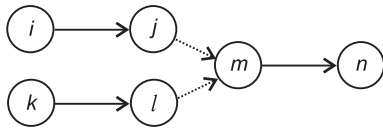


Рис. 5. Расчетная схема к определению  $t_{mn}^{PH}$

завершения срок свершения события  $m$  (раннего начала работы  $m-n$ ) (рис. 5).

Очевидно, что этот срок определится максимальным из ранних сроков окончания:

$$t_{mn}^{PH} = \max(t_{ij}^{PO}, t_{kl}^{PO}). \quad (2)$$

Продолжительности выполнения каждой работы являются случайными величинами ( $X$  и  $Y$ ), подчиненными соответствующим законам распределения  $f_1(x)$  и  $f_2(y)$ .

Требуется найти закон распределения величины:

$$Z = \max(X, Y). \quad (3)$$

В отсутствие функциональной связи между параллельными работами решение поставленной задачи реализовано с помощью универсального метода расчета вероятностных параметров [4], что позволило установить величину смещения математического ожидания сроков свершения события  $m$  от сроков свершения событий  $j$  ( $l$ ). Смещение ( $\Delta_2$ ) составило: для слабого и среднего уровней воздействия случайных факторов — 27 %; для сильного — 35 % (при использовании вероятностных параметров, представленных в табл. 1).

Пусть  $\Delta_2^1$  — смещение математического ожидания окончания двух параллельных работ с вероятностными временными параметрами 1-2 и 3-4 (двух элементов бинарной структуры первого уровня) (рис. 6).

Математическое ожидание срока свершения события 22 также сместится на величину  $\Delta_2^1$  (при равных продолжительностях работ 1-2, 3-4, 5-6, 7-8).

На втором уровне бинарной структуры графика в результате композиции вероятностных параметров событий 21 и 22 (при выборе максимального значения в каждой композиции в соответствии с (2) и (3)) смещение математического ожидания сроков свершения события 31 от событий 21 и 22 составит  $\Delta_2^2$ .

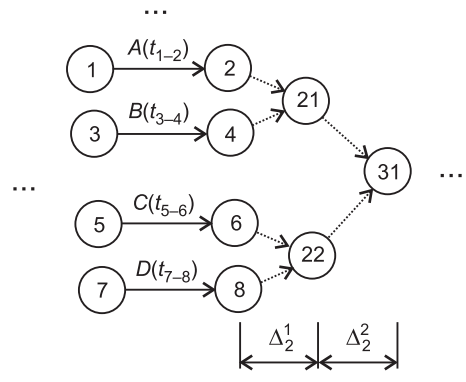


Рис. 6. Фрагмент бинарной структуры

Пусть для первого уровня бинарной структуры смещение составит:

$$\Delta_2^1 = at. \quad (4)$$

Здесь  $a$  — доля величины смещения математического ожидания от продолжительности работ (сроков завершающих событий работ). Для данных, представленных в табл. 1, 0,27–0,35.

Тогда математическое ожидание сроков свершения события 21 (22) увеличится на величину  $at$

$$T_{21} = t + at. \quad (5)$$

Для второго уровня бинарной структуры смещение составит:

$$\Delta_2^2 = a(t + at) = t(a + a^2). \quad (6)$$

Для  $n$ -го уровня структуры смещение математического ожидания

$$\Delta_2^n = t(a + a^2 + \dots + a^n) \quad (7)$$

$$\text{или } \Delta_2^n = \frac{ta(1 - a^n)}{1 - a}. \quad (8)$$

Анализ зависимости (7) применительно к значениям величины  $a$  показывает, что первый член геометрической прогрессии составляет 70–80 %, что позволяет (с некоторым приближением) использовать выражение (4) для вычисления  $\Delta_2^n$  на любом уровне структуры.

Тогда фрагмент бинарной структуры будет иметь вид (рис. 7). При определении числа уровней ( $n$ ) следует учитывать, что для бинарной структуры, имеющей  $r$  параллельных работ на первом уровне,

$$r = 2^n. \quad (9)$$

После логарифмирования выражение (9) будет иметь вид:

$$\ln r = n \ln 2; \quad (10)$$

$$n = 1,443 \ln r. \quad (11)$$

Тогда общее смещение математического ожидания сроков совместного окончания  $r$  параллельных работ с учетом (4) и (11) составит:

$$\Delta^{\text{общ}} = \Delta_2 \cdot 1,443 \ln r. \quad (12)$$

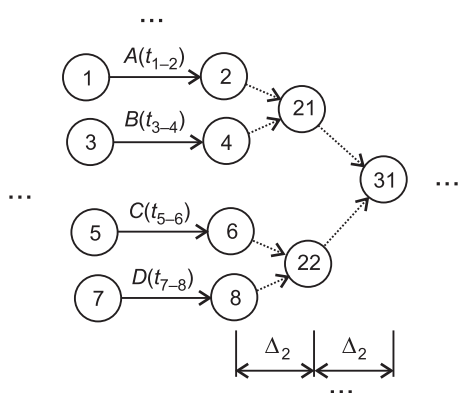


Рис. 7. Фрагмент бинарной структуры (упрощенный)

Полученная зависимость описывает смещение математического ожидания в идеальной бинарной структуре, имеющей на первом уровне параллельные работы равной продолжительности. Очевидно, что структура реальных календарных планов более разнообразна и изменчива, количество работ на каждом временном интервале меняется в достаточно широких пределах.

Известно, что одним из основных показателей, оценивающих насыщенность работ календарного графика, и, как следствие, возможное смещение сроков свершения совместных событий, является коэффициент совмещения работ ( $K_{\text{совм}}$ ). В этих условиях среднее число параллельных работ на каждом этапе графика может быть представлено коэффициентом совмещения работ календарного плана:

$$K_{\text{совм}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{T}, \quad (13)$$

где  $\sum_{i=1}^n t_i$  — последовательная сумма продолжительностей всех работ;

$T$  — продолжительность работ по графику.

Тогда выражение (12) приобретет следующий вид:

$$\Delta^{\text{общ}} = \Delta_2 \cdot 1,443 \ln K_{\text{совм}}. \quad (14)$$

Выражение (14) и является приближенной формулой для оценки возможного смещения математического ожидания сроков свершения работ календарного графика. Эта простая зависимость, использующая минимальное число параметров, основанная на приближенном методе (в отличие от точного универсального), может применяться для предварительной оценки сроков реализации проекта.

При слабом уровне воздействия случайных факторов ( $\Delta_2 = 27\%$ ) выражение (14) может быть записано как:

$$\Delta^{\text{общ}} = 27 \cdot 1,443 \ln K_{\text{совм}} = 39 \ln K_{\text{совм}}. \quad (15)$$

Здесь  $\Delta^{\text{общ}}$  — общее смещение математического ожидания, %.

Средний уровень воздействия случайных факторов ( $\Delta_2 = 27\%$ ) предполагает смещение математического ожидания продолжительности каждой работы на 32 % (см. табл. 1), что вводит в выражение (15) свободный член и коэффициент 1,32 при логарифме:

$$\Delta^{\text{общ}} = 32 + 27 \cdot 1,443 \cdot 1,32 \ln K_{\text{совм}} = 32 + 51,4 \ln K_{\text{совм}}. \quad (16)$$

Сильный уровень воздействия случайных факторов ( $\Delta_2 = 35\%$ ) предполагает смещение математического ожидания продолжительности каждой работы на 158 % (см. табл. 1), что вводит в выражение (15) свободный член и коэффициент 2,58 при логарифме:

$$\Delta^{\text{общ}} = 158 + 35 \cdot 1,443 \cdot 2,58 \ln K_{\text{совм}} = 158 + 130,3 \ln K_{\text{совм}}. \quad (17)$$

Для проверки полученных выражений с использованием точного универсального метода [5] были выполнены расчеты по определению сроков свершения событий графиков различных видов и структур (рис. 8), проведено исследование связи и установлены корреляционные зависимости между коэффициентами совмещения работ и смещениями математических ожиданий сроков совместных событий графика.

Для каждого варианта последовательно рассчитывался коэффициент совмещения (для одной, двух, трех, ... , десяти работ) и соответствующее смещение сроков окончания работ от детерминированной оценки в процентах. Результаты расчетов по трем видам параллельных структур для слабого уровня воздействия факторов представлены на рис. 9.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$Y = a + b \ln x. \quad (18)$$

$$Y = -3,49 + 36,6 \ln K_{\text{совм}}, \quad (19)$$

где  $Y$  — смещение сроков окончания работ, %;  
 $K_{\text{совм}}$  — коэффициент совмещения.



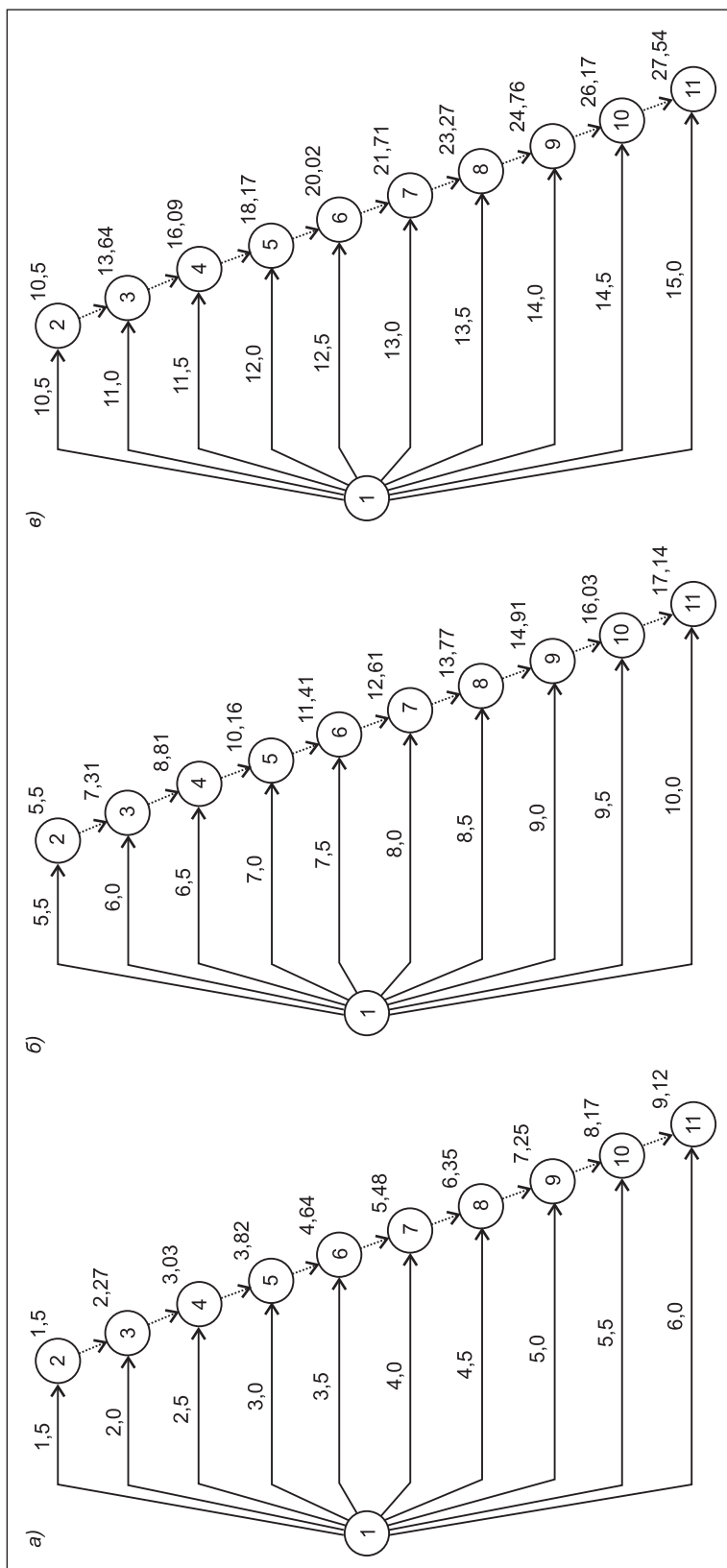


Рис. 8. Варианты графиков параллельной структуры [2] со сроками окончания работ (слабый уровень воздействия факторов) с равномерным распределением сроков окончания работ (а), со сроками окончания работ во второй половине графика (б) и в последней трети графика (в)

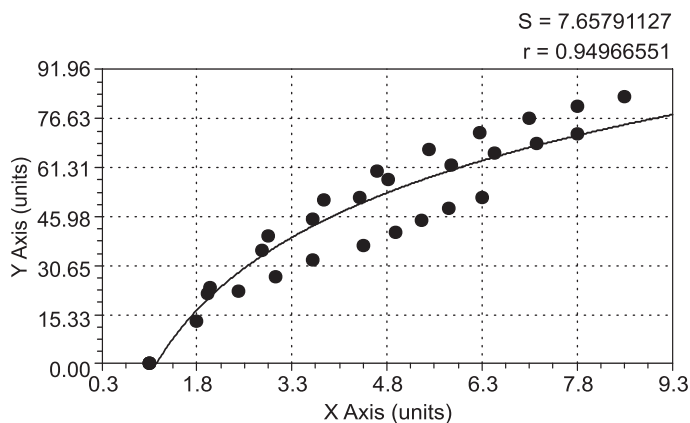


Рис. 9. Поле корреляции и кривая регрессии для слабого уровня воздействия факторов

Расчеты, выполненные для среднего и сильного уровней воздействия дестабилизирующих факторов, позволили установить уравнения регрессии

— для среднего уровня:

$$Y = 27,5 + 48,2 \ln K_{\text{совм}}; \quad (20)$$

— для сильного уровня:

$$Y = 151,3 + 125,1 \ln K_{\text{совм}}. \quad (21)$$

Аналогичные расчеты были выполнены для структуры с поточной организацией работ (равноритмичный поток пяти видов работ, восьми объектов).

Результаты расчетов для слабого уровня воздействия факторов представлены на рис. 10.

Уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$Y = 1,35 + 38,0 \ln K_{\text{совм}}. \quad (22)$$

Для среднего уровня воздействия факторов:

$$Y = 34,1 + 49,73 \ln K_{\text{совм}}. \quad (23)$$

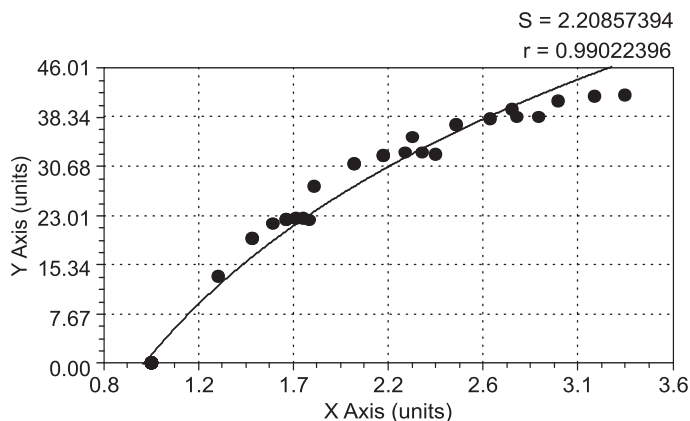


Рис. 10. Поле корреляции и кривая регрессии для слабого уровня воздействия факторов при поточной организации работ

Для сильного уровня воздействия факторов:

$$Y = 163,0 + 125,7 \ln K_{\text{совм}} \quad (24)$$

Значения корреляционных отношений для зависимостей (19)–(24) в пределах 0,95–0,99 позволяют предположить высокую предсказательную силу всех уравнений регрессии. Сопоставление корреляционных зависимостей (19)–(24), полученных с использованием универсального метода, с зависимостями (15)–(17), полученными с помощью бинарных структур, показывает их близость (табл. 2).

**Таблица 2. Результаты расчетов смещения математических ожиданий сроков выполнения работ приближенным и точным методом, %**

Методы расчета	$K_{\text{совм}}$	Вид структуры и уровни воздействия факторов					
		Поточная структура			Параллельная структура		
		слабый	средний	сильный	слабый	средний	сильный
Точный	2	27,7	68,6	250,1	21,9	60,9	238
	3	43,1	88,7	301,1	36,7	80,45	288,7
	4	54,03	103	337,3	47,25	94,3	324,7
Приближенный	2	27	67,6	248,3	27	67,6	248,3
	3	42,85	88,5	301,15	42,85	88,5	301,15
	4	54,1	103,3	338,6	54,1	103,3	338,6

Таким образом, изложенный приближенный способ позволяет установить смещение наиболее вероятных сроков завершения комплексов отдельных работ и технологических процессов от их детерминированной оценки в зависимости от уровня воздействия дестабилизирующих факторов и коэффициента совмещения работ календарного плана.

**Выводы.** 1. Известно, что точность и достоверность календарного планирования в значительной степени зависят от применяемых методов и моделей, особенно в условиях воздействия на технологические процессы и комплексы работ разнообразных дестабилизирующих факторов. Реализованные методы (в том числе универсальный метод расчета вероятностных временных параметров) позволяют с достаточной степенью точности и за приемлемое время оценивать достоверность календарных графиков, устанавливать расчетные сроки выполнения работ с той или иной вероятностью.

2. Вместе с тем в отсутствии программного продукта, реализующего универсальный метод, представляется целесообразным использование приближенного подхода, основанного на оценке структуры технологических процессов календарного графика, его сложности, степени совмещения работ, числа параллельных работ. Установлено, что в любом календарном графике (плане) независимо от его вида и формы основными структурообразующими элементами являются ресурс (исполнитель, вид работ); объект (фронт работ, участок, захватка), что позволяет считать структуру любого календарного плана бинарной (в явном или неявном виде).

Использование данного подхода дает возможность представить любой календарный график в виде бинарного дерева.

3. Реализация идеальной бинарной структуры в условиях вероятностных временных параметров параллельных работ позволила установить

величину смещения математического ожидания сроков свершения совместных событий работ для первого, второго и  $n$ -го уровней иерархии (по мере выполнения комплекса работ календарного графика).

4. Так как одним из основных показателей, оценивающих насыщенность работ календарного графика, и, как следствие, возможное смещение сроков свершения совместных событий, является коэффициент совмещения работ, получены зависимости (15)–(17), определяющие математическое ожидание вероятных сроков календарного графика в зависимости от уровня воздействия случайных факторов и коэффициента совмещения.

5. Для проверки достоверности предложенного метода он сравнивался с точным универсальным методом расчета вероятностных параметров календарного графика. Установлено, что при использовании приближенного метода расчета вероятностных параметров календарного графика поточной структуры, основанного на применении зависимостей (15)–(17), результаты расчетов практически не отличаются от результатов, полученных на основании точного универсального метода и соответствующих корреляционных зависимостей.

Для параллельных структур с различными свойствами приближенный способ дает несколько завышенные оценки продолжительности календарного графика (в среднем на 5–15 %), что для вероятностных статистических расчетов представляется вполне допустимым.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калугин, Ю.Б. Моделирование воздействия дестабилизирующих факторов на технологический комплекс [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 7. — С. 93–102.
2. Калугин, Ю.Б. Сущность календарного планирования работ с вероятностными временными параметрами [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 9. — С. 92–106.
3. Калугин, Ю.Б. Прогнозирование сроков реализации проекта с помощью модели квазипараллельных работ [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 3. — С. 45–51.
4. Калугин, Ю.Б. Календарное планирование работ с вероятностными временными параметрами в иерархических структурах [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 10. — С. 30–39.
5. Калугин, Ю.Б. Вероятностная структура строительного потока [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 7. — С. 36–43.

*КАЛУГИН Юрий Борисович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Yuri\_Kalugin@inbox.ru  
Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений, г. Санкт-Петербург*

Получено 26.06.15

**Kalugin Yuri Borisovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: Yuri\_Kalugin@inbox.ru, Military Institute of Rail Transport Troops and Military Communications, St. Petersburg, Russia

#### **GRAPHIC-ANALITICAL MODEL AND APPROXIMATE METHOD OF COMPUTING FINISH TIME FOR NETWORKS WITH IMPRECISE DURATIONS**

Model and approximate method of computing finish time for networks with imprecise duration is stated. The graphic-analytical model is based on use of a binary tree of events of the

schedule diagram. The approximate method is based on use of probabilistic parameters of works and coefficient of their saturation. Dependences between coefficients of a saturation of works of the planned schedule and finish time of the project are established. Realization of the offered method will allow to determine the most probable terms of performance of complexes of works at a stage of planning, to increase reliability of planned schedules.

**Key words:** project management and scheduling, fuzzy critical path method network with imprecise durations, fuzzy finish time, probability distribution functions, binary tree of events, coefficient of a saturation of works, finish time.

## REFERENCES

1. Kalugin, Yu.B. Modeling of influence of destabilizing factors of the technological complex [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 7. — P. 93–102.
2. Kalugin, Yu.B. Essence of scheduling of works with probabilistic temporary parameters [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 9. — P. 92–106.
3. Kalugin, Yu.B. Predicting the timing of the project with the help of a model quasi-parallel processes [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 3. — P. 45–51.
4. Kalugin, Yu.B. Planning of works with probabilistic temporary parameters in hierarchical structures [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 10. — P. 30–39.
5. Kalugin, Yu.B. Probabilistic structure of the flow of works [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 7. — P. 36–43.

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 628.16:518.001

Ю.Л. СКОЛУБОВИЧ, М.С. СОППА, Н.В. СИНЕЕВА

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ КОНТАКТНОЙ МАССЫ В РЕАКТОРЕ-ОСВЕТИТЕЛЕ

Рассмотрена физическая модель процесса фильтрования в контактной массе псевдооживленного слоя. Получены уравнения, описывающие возникновение автоколебательного движения зерен фильтрующей загрузки. Применение численных расчетов позволило установить основные параметры нестационарного процесса, дать оценку периода и частоты колебаний, оценить энергетические потери. Построенная модель является основой описания технологии фильтрации водных суспензий при очистке.

**Ключевые слова:** моделирование, нестационарное движение, контактная масса псевдооживленного слоя, реактор-осветлитель.

**Введение.** Актуальной задачей в исследовании проблем очистки природных подземных вод является проектирование, расчет и реализация конструкций новых реакторов-осветлителей, использующих технологию фильтрации воды в псевдооживленном контактном слое частиц зернистой структуры [1]. Разработанные ранее физико-математические модели таких конструкций [2, 3] оставляли вне поля зрения нестационарный характер движения частиц контактной массы. В данной работе с помощью упрощенных подходов изучаются процессы возникновения автоколебательных движений в псевдооживленном слое.

**Постановка задачи.** В принципиальной схеме реактора-осветлителя

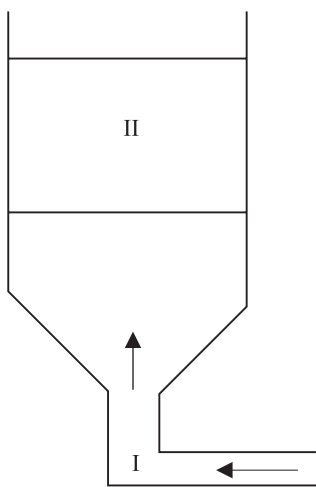


Рис. 1

через канал I показана подача очищаемой воды в реактор с добавлением коагулянтобразующих реагентов. В области II происходит процесс фильтрования примеси через контактную массу, взвешенную несущим очищаемым потоком. Продукты гидролиза в виде хлопьев адсорбируются на поверхности зерен контактного слоя. В течение определенного времени происходит высокоэффективная очистка воды от примеси. Завершение процесса очистки обуславливается возникновением отрыва хлопьев коагулянта от зерен и выносом их в поток. Согласно технологическим требованиям после этого производится регенерация фильтрующего слоя, и цикл очистки может быть возобновлен.

Движение частиц контактной массы зависит от давления потока очищаемой воды, которое удерживает зерна контактной массы во взвешенном состоянии. В рамках упрощенной одномерной модели считается, что на отдельные ее частицы действуют сила тяжести, выталкивающая сила воды и сила сопротивления при движении в вязкой жидкости. Кроме того, частица испытывает воздействие окружающих частиц. На этапе свободного движения частицы для ее вертикальной скорости можно записать дифференциальное уравнение:

$$m \frac{du}{dt} = -mg + \rho_v Vg - 6\pi\mu R(u - U), \quad (1)$$

здесь  $U$  — скорость несущего потока очищаемой воды;

$m$  — масса частицы;

$R$  — радиус частицы;

$V = (4/3)\pi R^3$  — ее объем;

$\rho_v$  — плотность воды;

$\mu$  — коэффициент вязкости;

$F_c = 6\pi\mu Rv$  — сила сопротивления вязкой жидкости по закону Стокса;

$v$  — относительная скорость.

Нестационарный колебательный процесс, в котором участвует частица, обуславливается столкновениями и обменом импульсами с соседними в вертикальном канале частицами фильтрующего слоя. Предполагается, что если в некоторый момент  $t_0$  частица сталкивается с соседней, то из соображений симметрии происходит зеркальное отражение, абсолютно упругое или с частичной потерей скорости. Для последующего участка движения в противоположном направлении для функции  $u(t_1)$  ставится начальное условие

$$u(0) = -u(t_0), \quad t_1 = t - t_0.$$

**Исследование математической модели.** Интегрирование уравнения (1) на участке первого этапа при движении частицы вверх приводит к соотношениям:

$$m \frac{du}{dt} = -6\pi\mu R u + (6\pi\mu R U - mg + \rho_v Vg),$$

$$\frac{du}{dt} = -q(u - p),$$

где  $p = U - (mg - \rho_v Vg) / (6\pi\mu R)$ , а  $q = 6\pi\mu R / m$ .

Теперь

$$\frac{d(u - p)}{(u - p)} = -q dt.$$

Отсюда  $u(t) = Ce^{-qt} + p$ .

Произвольная константа  $C$  находится из начального условия  $u_0 = C + p$ ,  $C = u_0 - p$ .

Таким образом,

$$u(t) = (u_0 - p)e^{-qt} + p. \quad (2)$$

В работе [2] приведена оценка времени релаксации для подобного процесса, в связи с чем величина  $1/q$  выбирается в уточненном виде.

Вертикальная координата частицы  $x(t)$  вычисляется с помощью интегрирования выражения (2) по времени:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + \int_0^t u(\tau) d\tau = x_0 + \int_0^t (u_0 - p)e^{-q\tau} + p) d\tau = \\ &= x_0 + pt - (u_0 - p) \int_0^t e^{-q\tau} d(-q\tau) / q = \\ &= x_0 + pt + (u_0 - p)(1 - e^{-qt}) / q. \end{aligned}$$

На графиках (рис. 2, 3) приведены зависимости скорости частицы  $u(t)$  и ее вертикальной координаты  $x(t)$  при движении вверх на участке  $0 \leq x \leq L$ .

Величина участка  $[0, L]$  выбирается с учетом того, что из эксперимента известно увеличение высоты столба контактной массы при заполнении ее потоком очищаемой воды, поэтому  $L$  составляет примерно 10 % от размеров частицы.

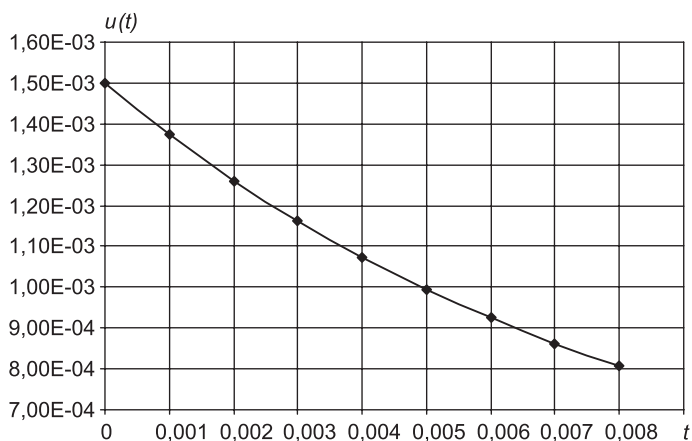


Рис. 2

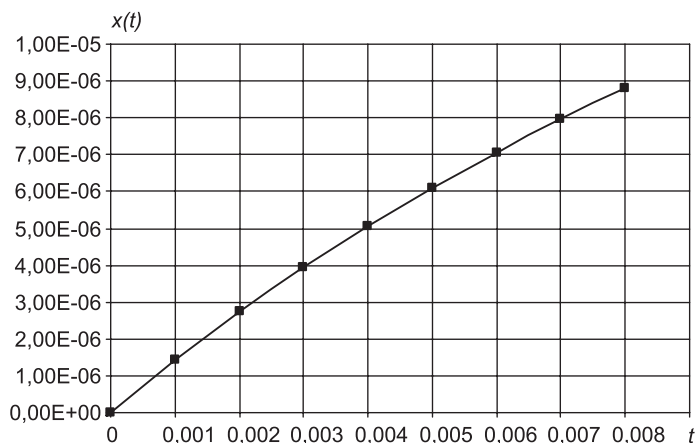


Рис. 3



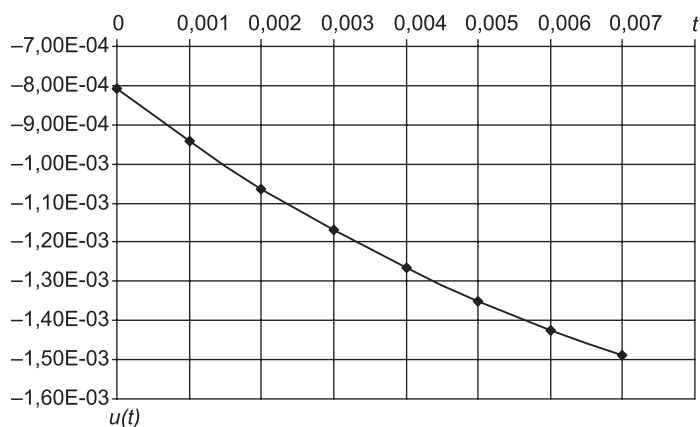


Рис. 4

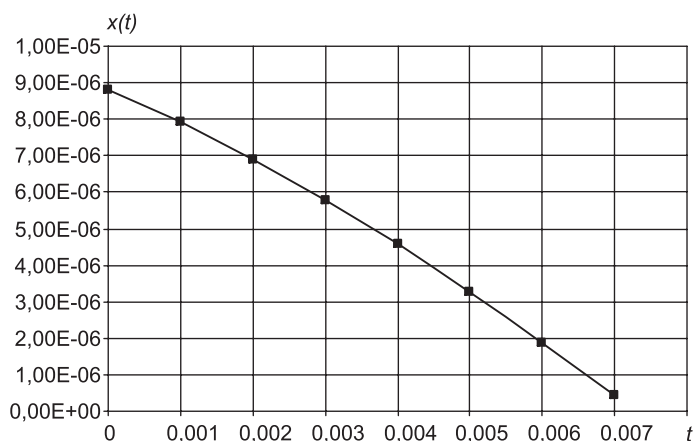


Рис. 5

На втором этапе, при движении частицы фильтрующего слоя вниз, в связи с резким изменением (увеличением) числа Рейнольдса происходит явление, известное под названием «кризис сопротивления» [4]. Точка отрыва турбулентного пограничного слоя смещается вниз по потоку, в результате чего заметно снижается сопротивление тела при его движении в вязкой жидкости. Графики зависимостей  $u(t)$ ,  $x(t)$  на участке от  $x = L$  до  $x = 0$  приведены на рис. 4, 5.

На рис. 6 показан фазовый портрет исследуемых автоколебаний.

Очевидно, что для поддержания установившегося автоколебательно-го процесса необходим дополнительный расход энергии, связанный, помимо прочих факторов, с величиной площади «линзы», изображенной на фазовом портрете.

При рассматриваемых значениях физических переменных данной задачи можно определить период колебаний частиц контактной массы:  $T = T_1 + T_2 = 0,015c$ , где  $T_1$  и  $T_2$  — параметры первого и второго участка движения, удовлетворяющие соотношениям  $x(T_1) = L$  и  $x(T_2) = 0$ . Соответственно частота автоколебаний находится по формуле  $f = 1/T$ .

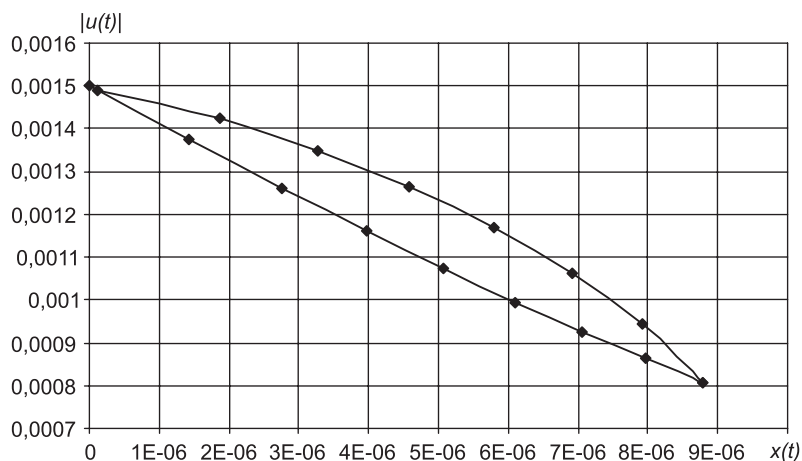


Рис. 6

**Заключение.** Предложенные в статье подходы позволяют получить усовершенствованную физико-математическую модель функционирования фильтра реактора-осветлителя. Учет нестационарного колебательно-го движения зерен структуры фильтра необходим для более точных оценок параметров работы конструкции. Приведенные результаты и построенная модель будут использованы в дальнейшем для исследования процесса фильтрации частиц примеси.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сколубович, Ю.Л. Подготовка питьевой воды из поверхностных источников с повышенным природным и антропогенным загрязнением: моногр. [Текст] / Ю.Л. Сколубович, Е.Л. Войтов. — Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2010. — 217 с.
2. Сколубович, Ю.Л. Физическая модель процесса очистки водных суспензий во взвешенном слое контактной массы [Текст] / Ю.Л. Сколубович, С.М. Зеркаль, Б.А. Паклин, Е.Л. Войтов, А.Ю. Сколубович // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 4. — С. 116–121.
3. Сколубович, Ю.Л. Математическая модель процесса фильтрования во взвешенном слое контактной массы с учетом ограничения его размеров по горизонтали [Текст] / Ю.Л. Сколубович, О.А. Бойко, С.М. Зеркаль, С.В. Рогазинский, Н.В. Синеева // Вестн. МГСУ. — 2013. — № 10. — С. 309–316.
4. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1973. — 848 с.

*СКОЛУБОВИЧ Юрий Леонидович, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*СОППА Михаил Сергеевич, д-р физ.-мат. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*СИНЕЕВА Наталья Валерьевна, канд. техн. наук*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 17.04.15

**Skolubovich Yuriy Leonidovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Soppa Mikhail Sergeevich**, doctor of physical and mathematical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia  
**Sineeva Natalya Valerievna**, candidate of technical sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

### **SIMULATION OF NONSTATIONARY MOTION CHARACTERISTICS PARTICLES OF CONTACT MASS IN THE REACTOR-CLARIFIER**

The article considers the physical model of the filtering process in the contact mass of the fluidized layer and the equations describing the emergence of self-oscillating motion of grains of filter media. Application of numerical calculations allowed us to find the basic parameters of a non-stationary process, to evaluate the period and frequency fluctuations, evaluate the energy loss. The constructed model is the basis of the description of filtering technology of water suspensions during cleaning.

Key words: simulation, nonstationary motion, contact mass of the fluidized layer, reactor-clarifier.

#### REFERENCES

1. Skolubovich, Yu.L. Drinking water from surface sources with high natural and anthropogenic pollution : monograph [Text] / Yu.L. Skolubovich, E.L. Voytov. — Novosibirsk : Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 2010. — 217 p.
2. Skolubovich, Yu.L. Physical model of the process peelings water suspenziy in weighted layer of the contact mass [Text] / Yu.L. Skolubovich, S.M. Zerkal, B.A. Paklin, E.L. Voytov, A.Yu. Skolubovich // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 4. — P. 116–121.
3. Skolubovich, Yu.L. A mathematical model of a weighted filter layer of the contact mass subject to the limitation of its size horizontally [Text] / Yu.L. Skolubovich, O.A. Boyko, S.M. Zerkal, S.V. Rogazinsky, N.V. Sineeva // Bull. of MGASU. — 2013. — N 10. — P. 309–316.
4. Loitsiansky, L.G. Fluid and Gas Mechanics [Text] / L.G. Loitsiansky. — M. : Nauka, 1973. — 848 p.

УДК 697.432.8.001.24

А.Г. БАГОУТДИНОВА, Я.Д. ЗОЛОТОНОСОВ

**ЗМЕЕВИКОВЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ  
И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ**

В работе приведены конструкции современных змеевиковых теплообменников типа «труба в трубе», а также уравнения, описывающие проточную часть таких аппаратов, записанные в векторно-параметрической форме с использованием фундаментальных положений аналитической и дифференциальной геометрии.

Ключевые слова: теплообменный элемент, поверхность, математическая модель.

В настоящее время в центральных тепловых пунктах систем теплоснабжения жилых и промышленных зданий используются устаревшие кожухотрубчатые теплообменные аппараты (бойлеры). В связи с этим становится актуальной и весьма перспективной их замена на современные малогабаритные змеевиковые теплообменники типа «труба в трубе».

Одна из первых конструкций такого теплообменника описана в работе [1]. Аппарат (рис. 1) содержит установленные с зазором наружную 1 и внутреннюю 2 трубы, выполненные в виде спирали.

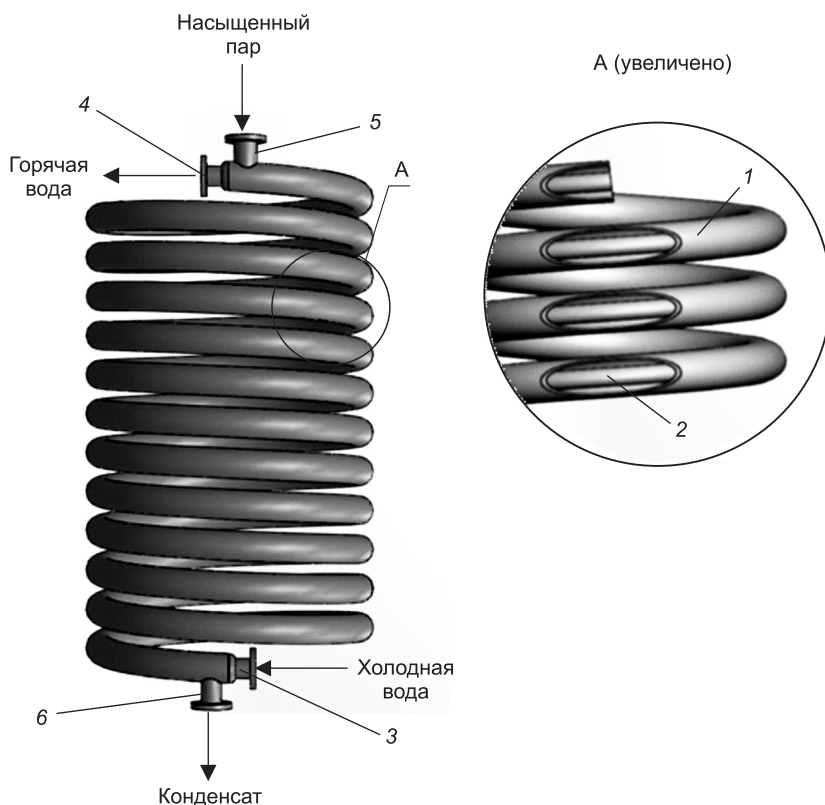


Рис. 1. Змеевиковый теплообменник типа «труба в трубе»

1 — наружная труба; 2 — внутренняя труба; 3, 4 — патрубки для входа и выхода нагреваемой жидкости; 5, 6 — патрубки для входа и выхода пара

На внутренней трубе 2 расположены патрубки 3, 4 соответственно для входа и выхода нагреваемой жидкости, а на наружной 1 — патрубки 5, 6 для входа и выхода греющего теплоносителя. Поток нагреваемой жидкости (холодной воды) через патрубок 3 направляется во внутреннюю трубу 2, а в противоток через патрубок 5 подается греющий теплоноситель (насыщенный водяной пар), который в виде конденсата выводится из аппарата через патрубок 6. Такая конструкция аппарата позволяет существенно интенсифицировать теплообмен, при этом уменьшить длину аппарата в 4–5 раз, диаметр в 3–4, вес в 6–10 раз [1].

В целях снижения металлоемкости и интенсификации теплообмена в аппарате авторами настоящей работы предложен ряд инновационных змеевиковых теплообменников типа «труба в трубе» (рис. 2).

На рис. 2, а представлена конструкция теплообменного аппарата, проточная часть внутренней трубы и межтрубного пространства которого выполнены на конус.

При противоточной схеме движения теплоносителей холодная вода через штуцер 1 поступает во внутреннюю коническую трубу. Одновременно в межтрубное коническое пространство через штуцер 2 подается насыщенный водяной пар. После прохождения проточной части теплообменника горячая вода через штуцер 3, а конденсат через штуцер 4 выводятся из аппарата.

В процессе движения воды в проточной части конической трубы ее скорость увеличивается. Это вызывает дополнительную турбулизацию потока и рост коэффициента теплоотдачи от внутренней стенки трубы. При подаче пара в коническое межтрубное пространство его скорость также возрастает.

Под действием центробежной силы, возникающей при движении теплоносителя по змеевику, происходит сброс конденсатной пленки с внешней поверхности внутренней трубы, что уменьшает термическое сопротивление конденсатной пленки и вызывает рост коэффициента теплоотдачи на наружной стенке внутренней трубы.

Снижение частных термических сопротивлений теплоотдачи приводит к росту коэффициента теплопередачи, что в последующих процессах проектирования позволит уменьшить габаритные размеры теплообменного аппарата.

Стремление увеличить эффективность теплообменного оборудования привело к созданию змеевиковых теплообменников в виде усеченных конусов с цилиндрическими трубами (рис. 2, б) и трубами на конус (рис. 2, в). Кроме того, авторами предложен змеевиковый теплообменник типа «труба в трубе» в форме шара (рис. 3) из цилиндрических труб (рис. 3, а) и труб на конус (рис. 3, б).

Такие теплообменники компактны и могут быть использованы в системе транспортировки и нагрева нефтепродуктов в зимних условиях. Пар, применяемый для подогрева нефтепродукта от внешних стенок теплообменника, одновременно служит и для нагрева воды во внутренних трубах аппарата, что важно для технологических и производственных нужд промышленных объектов нефтепромыслов.

В целях дальнейшей интенсификации теплообмена и поддержания требуемого температурного напора при комбинации различных схем дви-

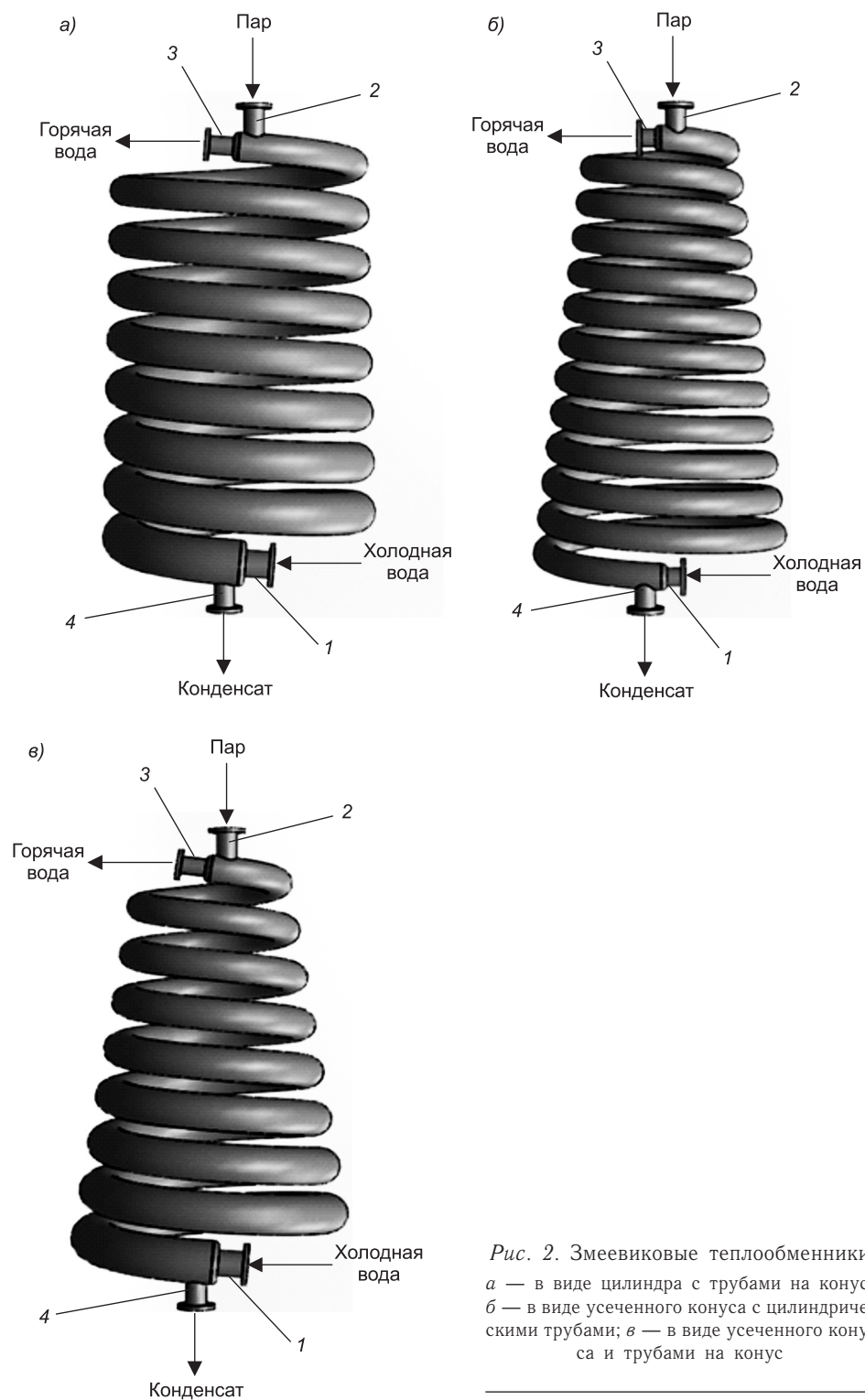


Рис. 2. Змеевиковые теплообменники  
а — в виде цилиндра с трубами на конус;  
б — в виде усеченного конуса с цилиндрическими трубами;  
в — в виде усеченного конуса и трубами на конус

жения рабочих жидкостей в теплообменниках предполагается их различная компоновка — в виде сдвоенных усеченных конусов (рис. 4) или каскада аппаратов (рис. 5).

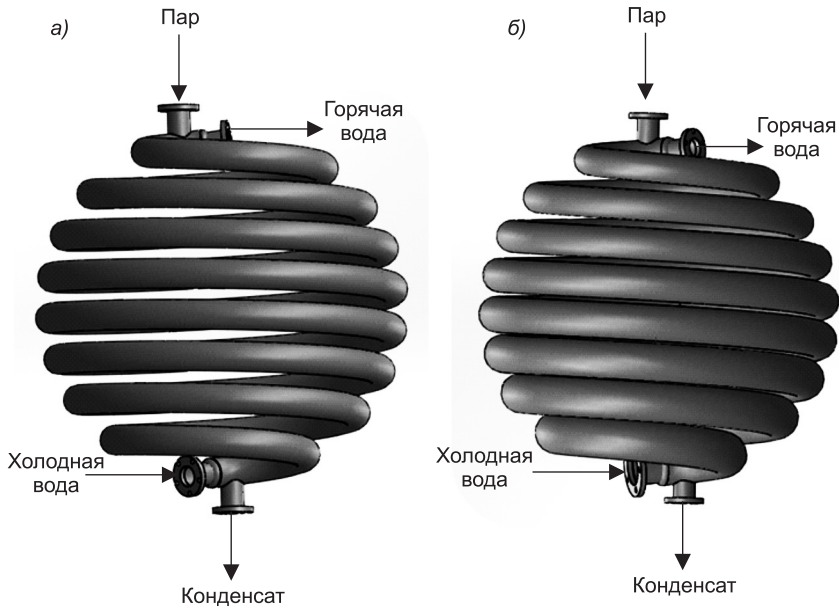


Рис. 3. Змеевиковый теплообменник в форме шара  
 а — из цилиндрических труб; б — из труб на конус

При противоточной схеме движения теплоносителей (см. рис. 4) холодная вода поступает во внутреннюю трубу змеевикового теплообменника 1. Одновременно через штуцер 4, внешнего змеевика конуса 5, подается насыщенный водяной пар. Двигаясь в противоток, пар из штуцера 6 направляется через штуцер 7 в межтрубное пространство теплообменника 8. Подогретая вода из штуцера 9 через штуцер 10 также поступает в теплообменник 8. Из теплообменника 8 горячая вода через штуцер 11, а конденсат через штуцер 12, выводятся из аппарата.

На рис. 5 представлена одна из схем компоновки модулей в каскаде теплообменных аппаратов.

Следует отметить, что внутренние трубы змеевиковых теплообменников могут быть различной модификации [2], в том числе в виде пружинно-витых каналов [3], полученных с помощью лазерной сварки [4, 5] и винтовых теплообменных элементов [6], изготовленных с использованием ротационнойковки [7, 8].

Для организации производства предлагаемых инновационных змеевиковых теплообменных аппаратов, осуществляемого с помощью компьютерных технологий, необходимо строгое математическое описание конфигурации их теплообменных поверхностей. В работе [9] рассмотрен общий метод построения поверхности, образованной перемещением окружности радиуса  $r$ , заданной в полярной системе координат с полярным углом  $\varphi$ , вдоль некоторой направляющей кривой в пространстве  $\vec{r} = \vec{r}(t)$ .

Согласно этому методу радиус-вектор точки поверхности представляется в виде

$$\vec{r}(t, \varphi) = \vec{r}(t) + r \cos(\varphi) \vec{\nu}(t) + r \sin(\varphi) \vec{\beta}(t), \quad \varphi \in [0; 2\pi], \quad t \in [t_1; t_2], \quad (1)$$

где  $\vec{\nu}(t)$  и  $\vec{\beta}(t)$  — единичные векторы главной нормали и бинормали в точке, соответствующей значению параметра  $t$ .

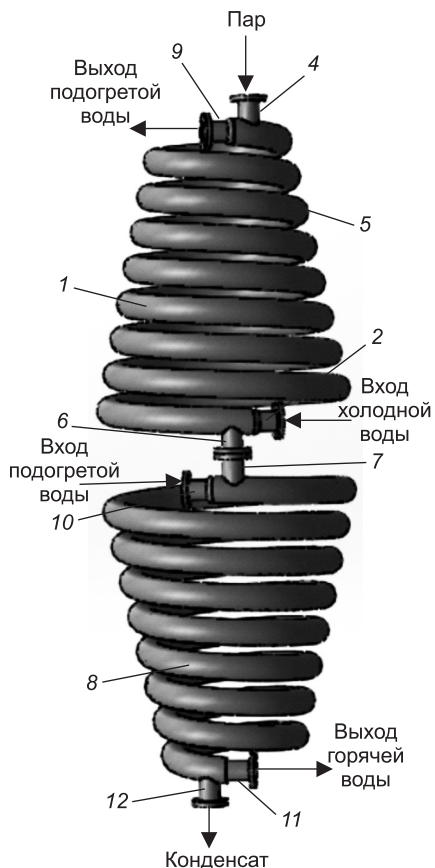


Рис. 4. Змеевиковый теплообменник из сдвоенных усеченных конусов

Единичные векторы касательной  $\vec{\tau}$ , нормали  $\vec{\nu}$  и бинормали  $\vec{\beta}$  образуют подвижный ортогональный базис, перемещающийся вдоль кривой  $\vec{r} = \vec{r}(t)$ , и вычисляются по формулам [10]:

$$\vec{\tau} = \frac{\vec{r}'}{|\vec{r}'|}, \quad \vec{\nu} = \frac{\vec{r}' \vec{r}''}{|\vec{r}' \vec{r}''|}, \quad \vec{\beta} = \vec{\tau} \vec{\nu}. \quad (2)$$

Для описания теплообменной поверхности змеевика (см. рис. 1) в качестве направляющей кривой выберем винтовую линию, расположенную на круговом цилиндре радиуса  $r$ :

$$x = r \cos t, \quad y = r \sin t, \quad z = bt. \quad (3)$$

Здесь  $t$  — параметр, характеризующий положение точки на винтовой линии ( $0 \leq t \leq 2\pi n$ );  $n$  — число витков;

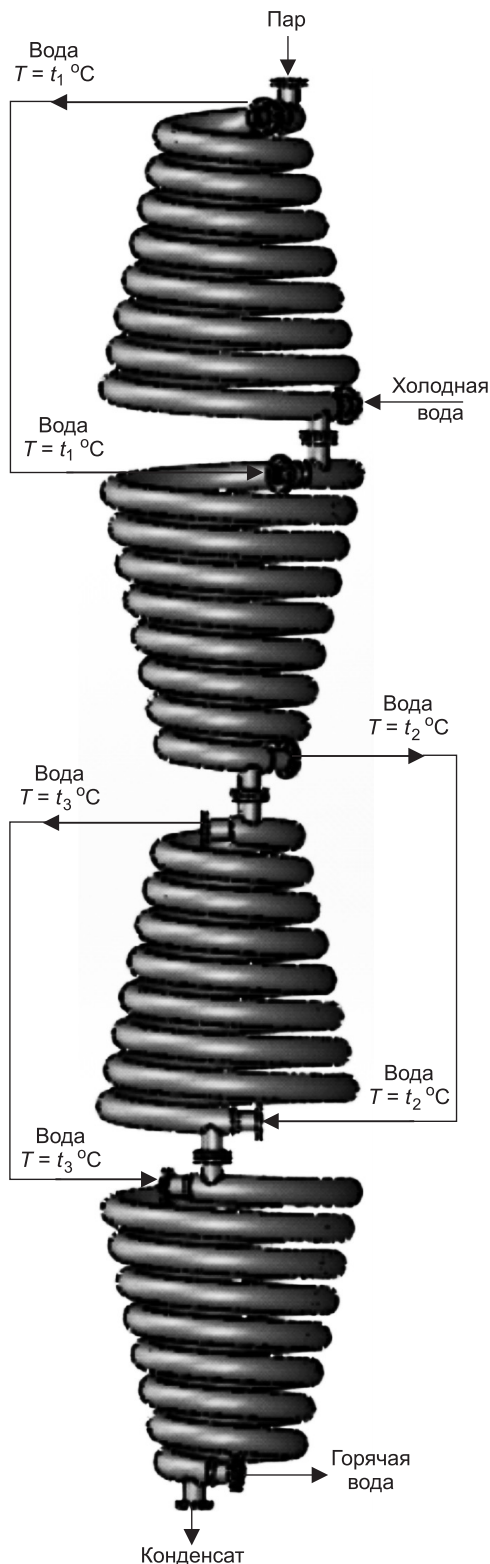


Рис. 5. Каскад теплообменных аппаратов



$b$  — параметр, характеризующий расстояние между витками змеевика.

Тогда уравнение (1) с учетом (2) для описания поверхности змеевика в виде цилиндра запишется в виде:

$$\begin{aligned} \vec{r}(t, \varphi) = & \begin{pmatrix} r \cos t \\ r \sin t \\ bt \end{pmatrix} + \frac{\rho \cos(\varphi)}{\sqrt{b^2 + 1}} \begin{pmatrix} b \sin t \\ -b \cos t \\ r \end{pmatrix} + \\ & + \frac{\rho \sin(\varphi)}{\sqrt{(b^2 + 1)(b^2 + r^2)}} \begin{pmatrix} (r^2 - b^2) \cos t \\ (r^2 + b^2) \sin t \\ -r b \sin 2t \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

$\varphi \in [0; 2\pi], \quad t \in [0; 2\pi n].$

Уравнение (4) опишет также поверхность змеевикового теплообменника в виде цилиндра с трубами на конус (см. рис. 2, *a*), если в качестве образующей выбрать окружность переменного радиуса

$$\rho(t) = \frac{(r_1 - r_2)t}{2\pi n} + r_2, \quad (5)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  — соответственно радиусы входного и выходного сечений проточной части.

Для описания поверхности змеевикового теплообменника (см. рис. 2, *б*) в качестве направляющей кривой выберем винтовую линию, расположенную на усеченном конусе

$$x = (r + bttg\psi) \cos t, \quad y = (r + bttg\psi) \sin t, \quad z = bt, \quad t \in [0; 2\pi n].$$

Здесь  $\psi$  — угол раствора конуса;

$r$  — радиус основания конуса.

Тогда уравнение (1) с учетом (2) для описания поверхности змеевика в виде усеченного конуса с цилиндрическими трубами запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} \vec{r}(t, \varphi) = & \begin{pmatrix} M \cos t \\ M \sin t \\ bt \end{pmatrix} - \frac{\rho \cos \varphi}{\sqrt{M^2 + 4b^2 tg^2 \psi}} \begin{pmatrix} M \cos t + 2btg\psi \sin t \\ M \sin t - 2btg\psi \cos t \\ 0 \end{pmatrix} - \\ & - \frac{\rho \sin \varphi}{\sqrt{M^2 + 4b^2 tg^2 \psi} \sqrt{b^2 + b^2 tg^2 \psi + M^2}} \begin{pmatrix} 2b^2 tg\psi \cos t - M b \sin t \\ 2b^2 tg\psi \sin t + N b \cos t \\ -2b^2 tg^2 \psi - M^2 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $M = (r + bttg\psi)$ ,  $t \in [0; 2\pi n]$ ,  $\varphi \in [0; 2\pi]$ .

Уравнение (6) может быть использовано для описания поверхности змеевикового теплообменника в виде усеченного конуса и трубами на конус (см. рис. 2, *в*), если в качестве образующей выбрать окружность переменного радиуса (5).

Следует отметить, что разработанная математическая модель (уравнение (6)) является универсальной. Так, при  $\psi = 0$  и  $\rho = \text{const}$  она опишет поверхность змеевика (см. рис. 1); если  $\psi = 0$ , а  $\rho = \rho(t)$  вычислено

по выражению (5) — получим уравнение поверхности змеевика в виде цилиндра с трубами на конус (см. рис. 2, а). В случае  $\psi \neq 0$  и условии  $\rho = \text{const}$  уравнение (6) опишет поверхность змеевика в виде усеченного конуса с цилиндрическими трубами (см. рис. 2, б), а при  $\rho = \rho(t)$  — поверхность змеевика в виде усеченного конуса и трубами на конус (см. рис. 2, в).

Для описания теплообменника в форме шара (см. рис. 3) в качестве направляющей кривой необходимо выбрать винтовую линию, расположенную на сфере радиуса  $R$ :

$$x = \sqrt{R^2 - (R - bt)^2} \cos t, \quad y = \sqrt{R^2 - (R - bt)^2} \sin t, \quad z = bt, \quad t \in [0; 2\pi n], \quad (7)$$

а в качестве образующей — окружность постоянного ( $\rho = \text{const}$ ) радиуса для описания поверхности теплообменника (см. рис. 3, а) или переменного радиуса ( $\rho = \rho(t)$ ) для описания поверхности теплообменника (см. рис. 3, б).

С целью проверки соответствия полученных уравнений геометрии рассматриваемых змеевиковых теплообменников разработаны программы и построены поверхности в системе Matlab. В качестве примера на рис. 6 показана поверхность змеевикового теплообменника типа «труба в трубе» в форме шара.

Настоящая статья является попыткой наметить тенденции в конструировании инновационных змеевиковых теплообменников, отвечающих требованиям в вопросах энерго- и ресурсосбережения.

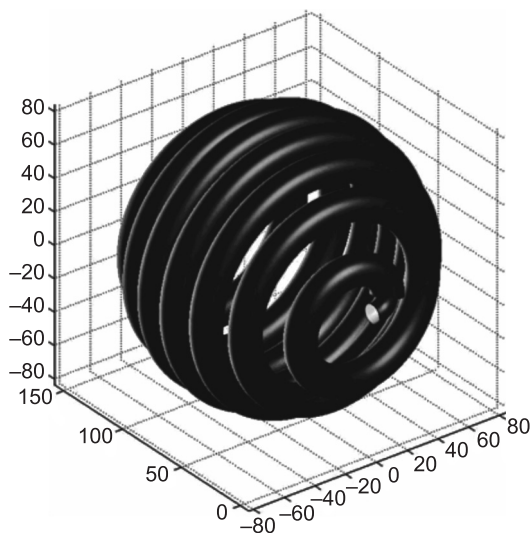


Рис. 6. Сферический теплообменник, построенный в системе Matlab

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2115876 на изобретение РФ. Теплообменник типа «труба в трубе» [Текст] / Коптелов А.Л. — № 96101976/06; заявл. 01.02.96; опубл. 20.07.98.
2. Багоутдинова, А.Г. Современные теплообменные элементы теплообменного оборудования и технологии их изготовления [Текст] / А.Г. Багоутдинова, А.Я. Золотонос, Я.Д. Золотонос, М.Н. Яхнев // Изв. КГАСУ. — 2013. — № 2 (24). — С. 150–156.
3. Багоутдинова, А.Г. Конструкции эффективных теплообменных элементов для скоростных теплообменников [Текст] / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотонос, В.Н. Посохин // Сантехника, отопление, кондиционирование. — 2014. — № 7. — С. 72–75.
4. Чирков, А.М. Применение лазерной сварки для производства кожухотрубчатых теплообменных аппаратов нового поколения на базе пружинно-витых каналов [Текст] / А.М. Чирков, И.А. Князева, Я.Д. Золотонос, А.Г. Багоутдинова // Изв. КГАСУ. — 2013. — № 1 (23). — С. 154–158.
5. Пат. 150006 на полезную модель РФ. Установка для лазерной сварки витой трубы с пружинно-витым каналом [Текст] / Золотонос Я.Д., Князева И.А. — № 2014123281; заявл. 06.06.14; опубл. 27.01.15, Бюл. № 3.

6. Багоутдинова, А.Г. Математическое моделирование винтовых теплообменных элементов [Текст] / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, В.Н. Посохин // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 8. — С. 41–46.
7. Багоутдинова, А.Г. Технология изготовления труб типа «конфузор–диффузор» с винтовой поверхностью теплообмена [Текст] / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, М.Н. Яхнев // Актуальные инженерные проблемы химических и нефтехимических производств: материалы Всерос. науч.-практ. конф. — Казань, 2013. — С. 151–154.
8. Пат. 2542865 на изобретение РФ. Способ изготовления витых труб типа «конфузор — диффузор» [Текст] / Золотоносов А.Я., Золотоносов Я.Д., Шарипов Н.М., Миннигареев Д.З., Матюшко А.А., Багоутдинова А.Г., Яхнев М.Н. — № 2013116659/02; заявл. 11.04.2013; опубл. 27.02.2015.
9. Багоутдинова, А.Г. Математическое описание и визуализация теплообменных поверхностей в форме пружинно-витых каналов и труб типа «конфузор — диффузор» [Текст] / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов // Изв. вузов. Проблемы энергетики. — 2012. — № 7–8. — С. 80–86.
10. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. — М.: Наука, 1973. — 832 с.

*БАГОУТДИНОВА Альфия Гиззетдиновна, канд. техн. наук  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
ЗОЛОТОНОСОВ Яков Давидович, д-р техн. наук, проф.  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 10.06.15

**Bagoutdinova Alfija Gizzetdinovna**, candidate of technical sciences, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

**Zolotonosov Yakov Davidovich**, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

## **COIL HEAT EXCHANGERS AND THEIR MATHEMATICAL DESCRIPTION**

The paper presents the design of modern coil heat exchangers type «pipe in pipe» and the equations describing the flow part of these devices recorded in the vector-parametric form using the fundamental principles of analytical and differential geometry.

**Key words:** heat exchange element, surface, the mathematical model.

### REFERENCES

1. Koptelov, A.L. Heat exchanger type «pipe in pipe»: Patent of the Russian Federation N 2115876 for an invention. N 96101976/06; Appl. 01.02.96; publ. 20.07. 98.
2. Bagoutdinova, A.G. Modern heatexchange elements of the heatexchange equipment and technology of their production [Text] / A.G. Bagoutdinova, A.Ya. Zolotonosov, Ya.D. Zolotonosov, M.N. Yakhnev // Izvestia KGASU. — 2013. — N 2 (24). — P. 150–156.
3. Bagoutdinova, A.G. Designs of effective heatexchange elements for high-speed heat exchangers [Text] / A.G. Bagoutdinova, Ya.D. Zolotonosov, V.N. Posokhin // Bathroom equipment, heating, conditioning. — 2014. — N 7. — P. 72–75.
4. Chirkov, A.M. Application of laser welding for shell and tube heat exchangers based on the new generation spring-twisted channels [Text] / A.M. Chirkov, I.A. Knyazeva, Ya.D. Zolotonosov // Izvestia KGASU. — 2013. — N 1 (23). — P. 154–158.
5. Pat. Russian Federation N 150006 for useful model. Installation for laser welding of a twisted pipe with the spring and twisted channel [Text] / Zolotonosov Ya.D., Knyazeva I.A. N 2014123281; Appl. 06.06.14; publ. 27.01.15, Bull. N 3.

6. Bagoutdinova, A.G. Mathematical modeling of screw heat exchange elements [Text] / A.G. Bagoutdinova, Ya.D. Zolotonosov, V.N. Posokhin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 8. — P. 41–46.
  7. Bagoutdinova, A.G. Pipe technology such as «konfuzor-diffuser» with helical surface heat transfer [Text] / A.G. Bagoutdinova, Ya.D. Zolotonosov, M.N. Yakhnev // Actual engineering problems of chemical and petrochemical industries: Proceedings of All-Russian scientific and practical conference. — Kazan, 2013. — P. 151–154.
  8. Pat. Russian Federation N 2542865 for the invention. Way of production of twisted «Confusor-diffuser» [Text] / Zolotonosov A.Ya, Zolotonosov Ya.D., Sharipov N.M., Minnigareev D.Z., Matyushko A.A., Bagoutdinova A.G., Yakhnev M.N. — N 2013116659/02; Appl. 11.04.2013; publ. 27.02.2015.
  9. Bagoutdinova, A.G. Mathematical description and visualization of heat-exchange surfaces in form the spring-curly channels and pipes of type «confusor-diffusor» [Text] / A.G. Bagoutdinova, Ya.D. Zolotonosov // Proceedings of the universities. Energy problems. — 2012. — N 7–8. — P. 80–86.
  10. Korn, G. Handbook on mathematics for scientists and engineers [Text] / G. Korn, T. Korn. — M. : Nauka, 1973. — 832 p.
-

УДК 697.12

В.М. УЛЯШЕВА, Н.М. ЕРМОЛЕНКО, А.Ю. КОШКАРЕВ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА  
ЧЕРЕЗ НЕУТЕПЛЕННЫЕ ПОЛЫ НА ГРУНТЕ**

Представлены результаты численного моделирования теплообмена через неутепленные полы на грунте в производственном помещении с источниками тепловыделений. Исследования выполнены с использованием программного продукта Star-CD. Применена  $k-\epsilon$  модель турбулентности. Проведена оценка влияния температурных условий в помещении на теплообмен неутепленного пола.

**Ключевые слова:** теплопотери, источник тепловыделений, микроклимат, численный метод, модель турбулентности.

Нагрузка на системы отопления определяется на основании теплового баланса помещения, главными составляющими которого являются потери теплоты через наружные ограждения. Обычно потери теплоты через пол в сравнении с аналогичными показателями других ограждающих конструкций здания (наружные стены, оконные и дверные проемы) априори принимаются незначительными. В основу таких расчетов закладывается упрощенная система учетных и поправочных коэффициентов сопротивления теплопередаче различных строительных материалов. В связи с естественной неоднородностью температурных полей грунта потери теплоты через неутепленный пол на грунте рассчитываются методом зонирования площади теплопередачи. Несмотря на незначительный вклад теплопотерь через пол в общий тепловой баланс, их роль существенна с точки зрения теплового состояния воздушной среды в нижней части помещения. Это особенно важно в горячих цехах со сложными объемно-планировочными решениями, к числу которых относятся машинные залы компрессорных станций с газотурбинными установками.

Как известно, особенностью машинных залов компрессорных цехов с газотурбинными установками является размещение тепловыделяющего технологического оборудования и коммуникаций выше уровня пола (рис. 1), что определяет характер циркуляционных течений в этих помещениях [1]. Сечения при  $X = 0$  м и  $X = 15$  м соответствуют внутренним поверхностям наружных стен. Для изучения пространственного распределения параметров воздушной среды на таких объектах выполнены натурный и численный эксперименты. Открытым остается вопрос теплообмена в окрестностях неутепленного пола, поскольку, несмотря на принятые меры энергосбережения, температура воздуха в непосредственной близости пола существенно ниже нормируемых значений [2].

В данной работе представлены результаты численного эксперимента с использованием программного продукта Star-CD. В основе численного моделирования турбулентных течений воздуха в помещениях с источниками теплоты лежит численное решение системы основных дифференци-

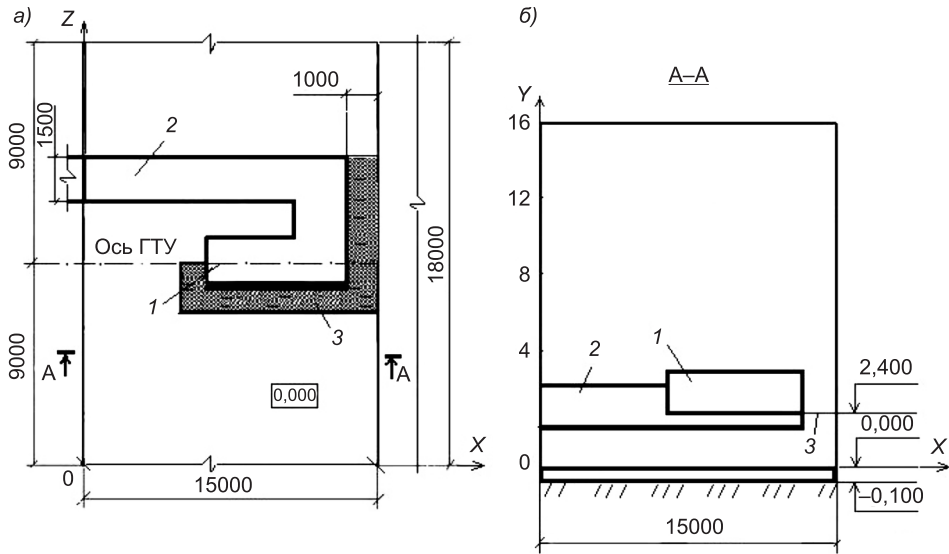


Рис. 1. План (а) модуля машинного зала и разрез А-А (б)  
 1 — газотурбинная установка; 2 — газоход; 3 — площадка обслуживания

альных уравнений неразрывности, сохранения импульса в форме Навье — Стокса и энергии:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0,$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + g\beta(T - T_0) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{T' u'_j}),$$

где  $t$  — время;

$\rho$  — плотность;

$\bar{u}_j \bar{u}_i$  — компоненты вектора осредненной скорости по осям координат;

$\nu$  — коэффициент кинематической вязкости;

$(T - T_0)$  — отклонение фактической температуры от фиксированной средней;

$\beta = T^{-1}$  — коэффициент теплового расширения воздуха;

$\bar{P}, \bar{T}$  — осредненные давление и температура;

$$(-\overline{u'_i u'_j}) = \frac{\tau_{ij}}{\rho};$$

$\tau_{ij}$  — турбулентные напряжения (дополнительные напряжения Рейнольдса);

$\rho c_p \overline{u'_j T'}$  — дополнительный тепловой поток;

$u'_i, u'_j, T'$  — локальные пульсации скорости и температуры потока.

В исследованиях использована разновидность модели турбулентности  $k-\varepsilon$  — *Kato Launder*. Адекватность применения данной модели при изучении процессов теплообмена в рассматриваемых объектах доказана в работе [1].

Для перехода от дифференциальных уравнений к дискретным применен метод конечных объемов на структурированной неортогональной несмещенной сетке. Сетка сгущается вблизи твердых границ. Аппроксимация членов уравнений (1), описывающих конвективный перенос количества движения, выполнена по противопоточной схеме первого порядка точности. Коррекция давления проведена по алгоритму SIMPLEC. В качестве граничных условий для скоростей воздуха на стенках заданы, как обычно, условия «прилипания». На поверхностях, через которые имеет место поток теплоты (поверхности газотурбинной установки и газохода, наружных конструкций), приняты плотности потока тепловой энергии, а на поверхности грунта — средняя температура грунта (+5 °С). В приточных отверстиях задавались скорость и температура воздуха.

На рис. 2 представлены поля температуры и воздуха в горизонтальных плоскостях. Сплошными черными линиями выделены зоны, размещенные под газотурбинной установкой, газоходом и приточными устройствами. Как показывают результаты численного эксперимента, в бетонной плите пола имеет место достаточно равномерное поле температуры. Температура практически равна температуре грунта на уровне 5–6 °С, только в пределах наружных стен опускается до 0 °С. Что касается распределения температуры воздуха вблизи пола, то в горизонтальной плоскости на отметке +0,020 м, т.е.  $y = 0,02$  м, наблюдается крайне неравномерное поле температуры от 0 до 20 °С. Это связано с особенностями размещения тепловыделяющего оборудования и радиационным теплообменом.

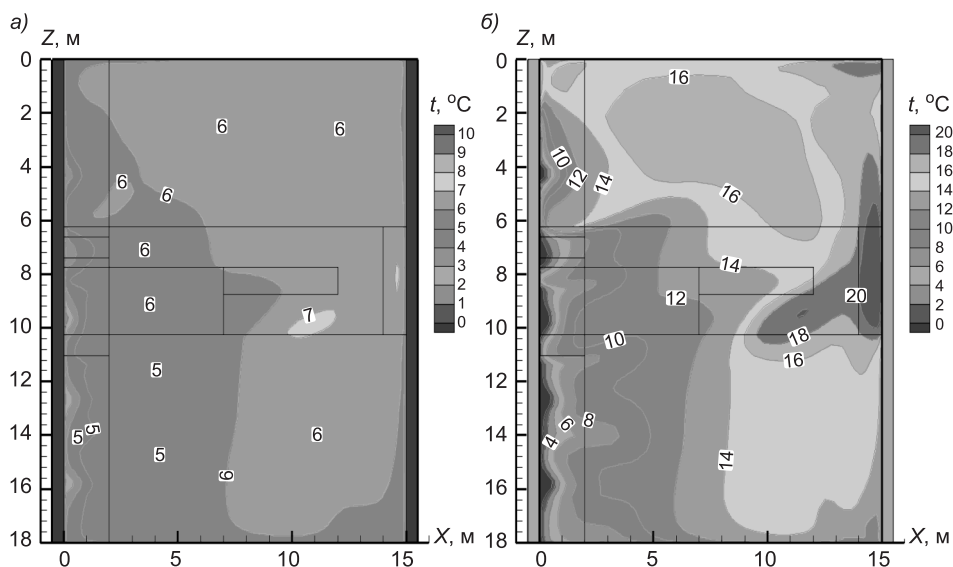


Рис. 2. Распределение температуры в конструкции неутепленного пола на отметке -0,001 м (а) и воздуха на отметке +0,020 м (б)

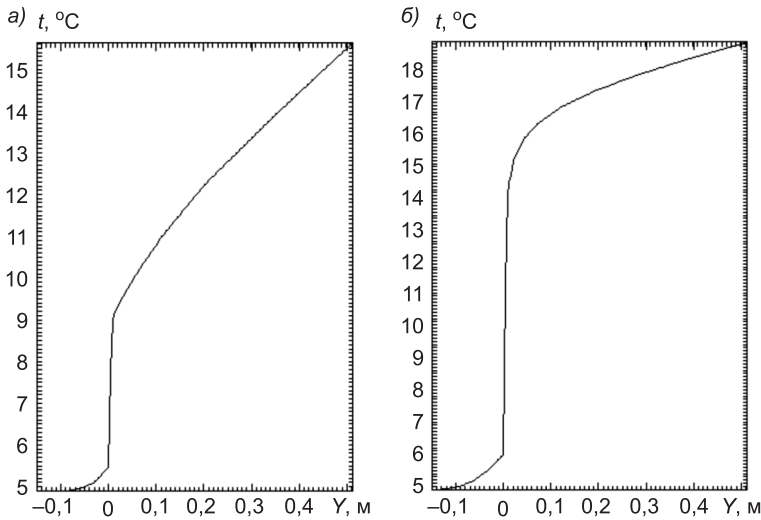


Рис. 3. Распределение температуры по оси  $Y$  в точке с координатами  $X = 2,0$  м,  $Z = 16,0$  м (а) и  $X = 13,0$  м,  $Z = 16,0$  м (б)

На рис. 3 приведено распределение температуры по оси  $Y$ . Наиболее интенсивно изменение температуры происходит на границе твердая поверхность — воздух. Причем в точках, лежащих в окрестностях наружной стены с координатой  $X = 0$ , перепад температуры составляет величину порядка  $3^\circ\text{C}$ . В то время как у противоположной стены перепад достигает  $10^\circ\text{C}$ . Это связано с тем, что наружная стена с координатой  $X = 0$  характеризуется большими значениями потерь теплоты из-за размещения технологических проемов и ворот. На рис. 4 приведено распределение температуры по оси  $Y$ . Данные отражают идентичность характера изменения температуры. Однако наличие теплоотдающих поверхностей газотурбинной установки обеспечивает более значительный перепад температуры в непосредственной близости от неутепленного пола (см. рис. 4, а).

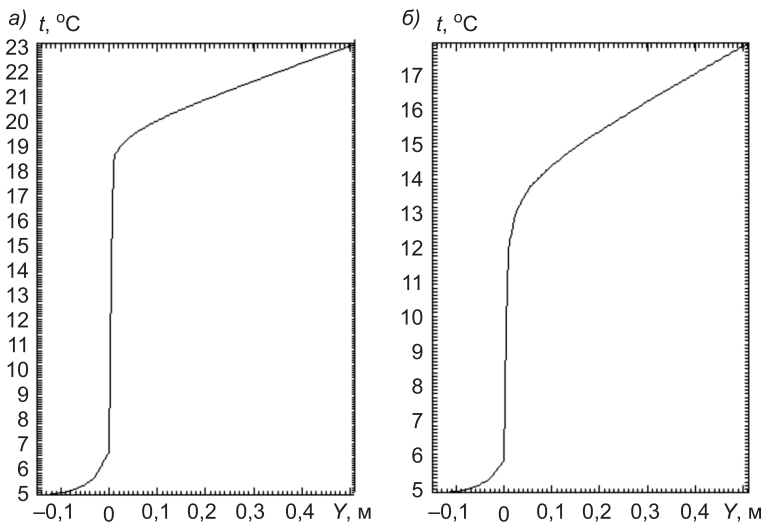


Рис. 4. Распределение температуры в точке с координатами  $X = 13,0$  м,  $Z = 9,0$  м (а) и  $X = 7,0$  м,  $Z = 9,0$  м (б)



**Выводы.** Получено достаточно равномерное распределение температуры в бетонной плите на отметке  $-0,010$  м практически на границе с воздушной средой. Это отражает слабое влияние теплоотдающих поверхностей и пространственного распределения температуры воздуха в помещении на процессы теплообмена в глубине неутепленного пола.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Позин, Г.М. К вопросу применения моделей турбулентности при численном моделировании вентиляционных процессов [Текст] / Г.М. Позин, В.М. Уляшева, И.Д. Киборт // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 10. — С. 48–56.
2. Позин, Г.М. Распределение параметров воздуха в помещениях с источниками тепловыделений [Текст] / Г.М. Позин, В.М. Уляшева // Инженерно-строит. журн. — 2012. — № 6 (32). — С. 42–47.

*УЛЯШЕВА Вера Михайловна, д-р техн. наук, доц.; E-mail: ulyashevavm@mail.ru  
Ухтинский государственный технический университет  
ЕРМОЛЕНКО Николай Михайлович, канд. техн. наук, доц.  
Ухтинский государственный технический университет  
КОШКАРЕВ Антон Юрьевич, инж.; E-mail: koshkarev11@mail.ru  
Ухтинский государственный технический университет*

Получено 11.06.15

**Ulyasheva Vera Mikhailovna**, doctor of technical sciences, assistant professor; E-mail: ulyashevavm@mail.ru, Ukhta State Technical University, Russia

**Ermolenko Nikolai Mikhailovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Ukhta State Technical University, Russia

**Koshkarev Anton Urievich**, engineer; E-mail: koshkarev11@mail.ru, Ukhta State Technical University, Russia

#### **NUMERICAL SIMULATION OF HEAT EXCHANGED THROUGH NON-INSULATED FLOORS ON GROUND**

The results of numerical modeling of heat transfer through non-insulated floors on the ground in the production room with a heat source are presented. The researches were performed using the software Star-CD.  $k$ - $\epsilon$  turbulence model is applied. The influence of temperature conditions in the room for heat transfer non-insulated floor is evaluated.

**Key words:** heat loss, heat source, microclimate, numerical method, turbulence model.

#### REFERENCES

1. Pozin, G.M. To a question of turbulence models applying at a numerical modeling ventilation processes [Text] / G.M. Pozin, V.M. Ulyasheva, I.D. Kibort // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 10. — P. 48–56.
2. Pozin, G.M. Air parameters distribution in puttings with heat development sources [Text] / G.M. Pozin, V.M. Ulyasheva // Magazine of Civil Engineering. — 2012. — N 6 (32). — P. 42–47.

УДК 69.055.621.1

П.А. ЩИННИКОВ, Д.С. СИНЕЛЬНИКОВ

## ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ПРИ МАЛОЭТАЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПРИ ОТСУТСТВИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В момент начала строительства малоэтажных зданий на территориях, предназначенных для индивидуального жилого строительства, нередко полностью отсутствует инфраструктура. Собственники начинают работы, применяя для энергоснабжения различные варианты микроТЭС на базе двигателей внутреннего сгорания карбюраторного типа с воздушным охлаждением. Указанные микроТЭС (бензогенераторы) используются по прямому назначению для выработки электроэнергии, вместе с тем существует возможность повысить их эффективность за счет применения когенерации, т. е. дополнительной выработки теплоты.

Ключевые слова: когенерация, энергосбережение, эффективность, двигатель внутреннего сгорания, бензогенератор, коэффициент полезного действия.

Ниже предлагаются результаты исследования опытной лабораторной когенерационной установки на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с воздушным охлаждением (Хитачи-2400) мощностью 2,4 кВт с возможностью утилизации теплоты от контура охлаждения двигателя. Это обеспечивается следующими техническими решениями: генерация электроэнергии; воздух из контура охлаждения двигателя направляется в газоход и обеспечивает отопительную нагрузку; выхлопные газы после ДВС поступают в теплообменник, водяной контур которого обеспечивает нагрузку горячего водоснабжения (ГВС).

Функционально теплоэнергетическая установка (ТЭУ) делится (рис. 1) на части: топливоподача, бензиновая электростанция, система охлаждения двигателя, система эвакуации дымовых газов, система подогрева сетевой воды, система измерительных приборов, нагрузка и дополнительное оборудование [1].

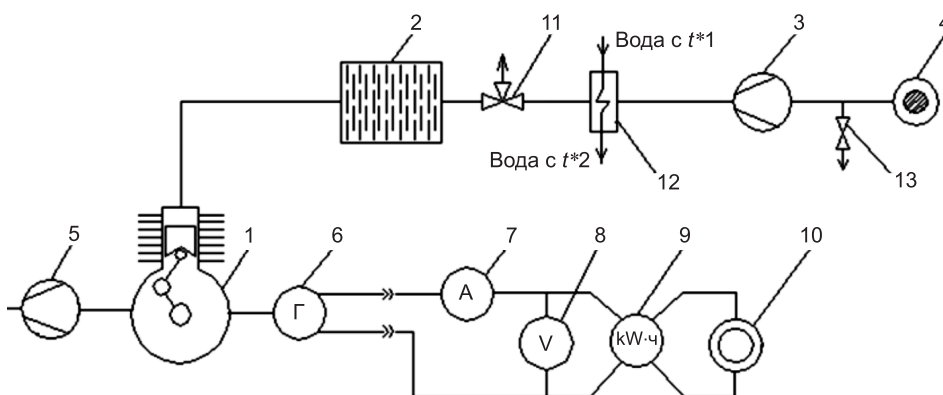


Рис. 1. Принципиальная схема установки

1 — двигатель внутреннего сгорания; 2 — глушитель; 3 — расходомер уходящих газов; 4 — дымовая труба; 5 — расходомер топлива; 6 — генератор; 7 — амперметр; 8 — вольтметр; 9 — счетчик электрической энергии; 10 — нагрузка; 11 — трехходовой кран; 12 — кожухотрубчатый газоводяной теплообменник; 13 — слив конденсата

Бензиновая электростанция состоит из четырехтактного двигателя мощностью 2400 Вт, электрогенератора в защитном исполнении от механических и климатических воздействий окружающей среды, панели управления генератора (вольтметр, прерыватель цепи, терминал подключения переменного тока).

Система охлаждения двигателя обеспечивает отопительную нагрузку и представляет собой вентилятор, расположенный на валу ДВС. Движение охлаждающего двигателя потока воздуха ограничено коробом, который направляет воздух в помещение объемом  $\approx 150 \text{ м}^3$ .

Система эвакуации дымовых газов представляет собой последовательно соединенные гофрированным газопроводом глушитель с защитным кожухом и дымовую трубу. Компонентами системы подогрева сетевой воды являются сетевой подогреватель и расходомер воды, проходящей через него. Сетевой подогреватель — это кожухо-трубчатый газовойдяной теплообменный аппарат. Нагреваемая вода проходит внутри медных трубок, а дымовые газы — в межтрубном пространстве. Площадь поверхности трубок равна площади поверхности теплообмена:  $F_{\text{медь}}^{\text{труб}} \approx 1140 \text{ см}^2$ . Внутренняя площадь корпуса теплообменного аппарата:  $F_{\text{внутр}}^{\text{корп}} \approx 1032,4 \text{ см}^2$ .

Электрическая нагрузка представляет собой гирлянду ламп накаливания мощностью  $n$ , кВт, и автомат защиты сети для включения нагрузки. Нагрузка ГВС обеспечивается постоянным сливом горячей воды.

Анализ рабочего цикла двигателя показывает, что только часть теплоты, выделяющейся при сгорании топлива, используется для полезной работы, остальная же составляет тепловые потери. Вместе с тем в когенерационной установке большая часть тепловых потоков полезно используется.

Распределение теплоты, полученной при сгорании вводимого в цилиндр топлива, называют тепловым балансом, который обычно определяется экспериментальным путем.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q = Q_e + Q_{\text{г.в}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{пот}} + Q_{\text{от}} + Q_{\text{ост}}, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где  $Q$  — теплота топлива, введенная в двигатель;

$Q_e$  — теплота, превращенная в полезную работу;

$Q_{\text{г.в}}$  — теплота с горячей водой на нужды ГВС;

$Q_{\text{г}}$  — теплота, потерянная с отработавшими газами;

$Q_{\text{пот}}$  — теплота, потерянная в окружающую среду через стенки системы эвакуации дымовых газов;

$Q_{\text{от}}$  — теплота с охлаждающим агентом (водой или воздухом), направленная на нужды отопления;

$Q_{\text{ост}}$  — остаточный член баланса, который равен сумме всех неучтенных потерь.

Количество располагаемой (введенной) теплоты

$$Q = \frac{B_i Q_p^H}{\tau}, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где  $B_i$  определяется по формуле

$$B_i = B_{i_{\text{изм}}} \rho \cdot 10^{-6}, \text{ кг}; \quad (3)$$

$i$  — режим;

$\rho = 725\text{--}780 \text{ кг/м}^3$  — плотность топлива.

Теплота, превращенная в полезную работу

$$Q_e = N_e, \text{ кВт}. \quad (4)$$

Теплота, теряемая с отработавшими газами

$$Q_\Gamma = \frac{V_\Gamma c_{\text{пр}} t_\Gamma}{\tau}, \text{ кВт}, \quad (5)$$

где  $V_\Gamma$  — расход газов,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;

$c_{\text{пр}}$  — средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;

$t_\Gamma$  — температура отработавших газов,  $^\circ\text{С}$ .

Теплота, отведенная от ДВС обдувающим воздухом (отопительная нагрузка), и потери теплоты:

$$Q_{\text{от}} = \alpha F \Delta t, \text{ кВт}, \quad (6)$$

$$Q_{\text{пот}} = \alpha F_{\text{гл}} \Delta t, \text{ кВт}, \quad (7)$$

где  $F, F_{\text{гл}}$  — площадь поверхности камеры сгорания ДВС и поверхности глушителя и газоотводных труб соответственно;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;

$\Delta t$  — соответствующий температурный напор.

Теплота, отведенная на нужды горячего водоснабжения

$$Q_{\text{г.в}} = G c_p \Delta t, \quad (8)$$

где  $G$  — расход воды через теплообменник;

$c_p$  — изобарная теплоемкость воды;

$\Delta t$  — температурный напор на теплообменнике.

Остаточный член теплового баланса

$$Q_{\text{ост}} = Q - (Q_e + Q_{\text{г.в}} + Q_\Gamma + Q_{\text{пот}} + Q_{\text{от}}), \text{ кВт}. \quad (9)$$

Показатели эффективности установки оцениваются следующим образом [2, 3].

Электрический КПД учитывает все виды потерь и не учитывает отпуск теплоты

$$\eta_e = \frac{N_e}{B_i Q_p^H}. \quad (10)$$

Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии

$$b_y = \frac{0,123}{\eta_e}, \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}. \quad (11)$$

Коэффициент использования теплоты топлива

$$\eta = \frac{Q_e + Q_{\text{от}} + Q_{\text{г.в}}}{B_i Q_p^H}. \quad (12)$$

В этом выражении в числителе первое слагаемое учитывает отпуск только электроэнергии (электрический КПД), второе — отпуск теплоты на отопление, третье слагаемое — отпуск теплоты на нужды горячего водоснабжения. Второе и третье слагаемые обеспечивают когенерационные возможности установки.

Следует отметить, что потоки энергии с отпускаемой теплотой являются «даровыми» для данной установки, так как не требуют дополнительных затрат топлива, поэтому когенерация позволяет вытеснять то топливо, которое затрачено на ТЭЦ при централизованном отпуске теплоты. При физическом методе разнесения затрат эта величина составит

$$b_Q = \frac{0,123}{\eta_Q}, \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}; \quad b_Q = \frac{147}{\eta_Q}, \text{ кг/Гкал}, \quad (13)$$

где  $\eta_Q$  — КПД установки по отпуску теплоты.

При сравнительных оценках когенерационных установок на базе ДВС (как и других типов) следует опираться на комплексный (системный) подход к оценкам, который заключается в приведении вариантов к сопоставимому виду как по затратам во все виды ресурсов (топливо, вода, воздух и т.д.), так и по отпускаемым видам продукции. В случае применения установок, подобных рассматриваемой в статье, можно вести технико-экономические оценки при замыкании затрат на теплоту, которую необходимо купить у ТЭЦ. Пессимистический вариант от эффекта когенерации будет достигнут при условии КПД по отпуску теплоты на ТЭЦ, равным единице ( $\eta_Q = 1$ ), что соответствует удельному расходу топлива в  $b_Q = 0,123 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$  (147 кг/Гкал). На реальных ТЭЦ  $\eta_Q < 1$  (0,78–0,88 в зависимости от вида топлива, типа оборудования и его износа, уровня эксплуатационной культуры и т.п.), что увеличивает расход топлива на отпуск данного вида продукции, а следовательно, растет и эффект от когенерации.

Для исследуемой установки коэффициент использования теплоты топлива в условиях когенерации растет с ростом мощности и находится на уровне 0,47, а собственно когенерация повышает эффективность в  $\approx 2,5$  раза (рис. 2).

Кроме того, можно видеть (см. рис. 2), что работа ТЭУ на базе ДВС с воздушным охлаждением (Хитачи) в сравнении с ТЭУ на базе ДВС с водяным охлаждением (ПЭС-15) отличается тем, что для первой когенерация (отопительная нагрузка,  $\eta^{\text{II}}$ ) обеспечивает прирост коэффициента использования топлива в  $\approx 1,5$  раза, а для второй — в  $\approx 3-4$  раза, что очевидно и связано с применением разных теплоносителей (воздух и вода).

Несложные расчеты показывают, что при отсутствии когенерации с использованием водяного контура в установке с воздушным охлаждением необходимо дополнительно затрачивать топливо в количестве, по меньшей мере, 100 г/ч на производство теплоты. Вместе с тем в проводимых опытах нагрев воздуха в помещении (отопительная нагрузка,  $\eta^{\text{II}}$ ) от 18 °С до комфортной температуры в 21 °С за счет возможностей когенерации происходит за 30 мин.

Энергетическая диаграмма (рис. 3) работы установки иллюстрирует полезный эффект (стрелки вверх) и потери (стрелки вправо). КПД ТЭУ

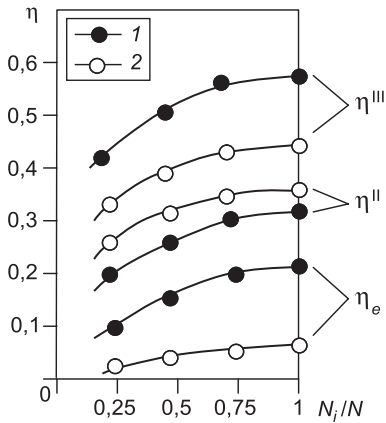


Рис. 2. Показатели эффективности поршневых ДВС в условиях когенерации

$\eta^{\text{e}}$  — КПД по отпуску электроэнергии;  
 $\eta^{\text{II}}$  — коэффициент использования теплоты топлива при обеспечении отопительной нагрузки;  $\eta^{\text{III}}$  — коэффициент использования теплоты топлива при обеспечении нагрузки ГВС  
 1 — Hitachi; 2 — ПЭС-15

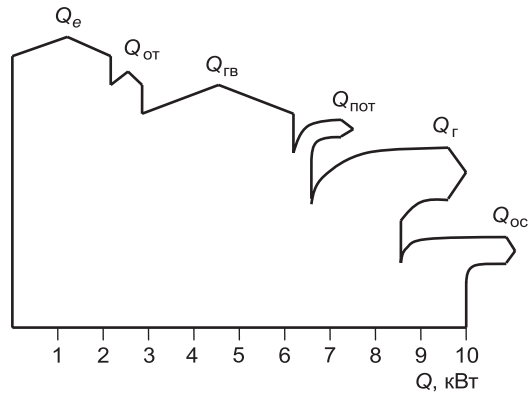


Рис. 3. Энергетическая диаграмма когенерационной установки

по отпуску электроэнергии  $\eta^{\text{e}} \approx 22\%$ , а остаточный член баланса ( $Q_{\text{ост}}$ ) включает в себя неполноту сжигания топлива на уровне 1,5 кВт ( $> 14\%$ ). Методика оценки химического недожога подробно представлена в работе [1].

Приращение коэффициента использования теплоты топлива для опытной установки составляет при когенерации около 10%, а при когенерации с использованием водяного контура — 20–25% (рис. 4). Относительное увеличение эффекта от когенерации с помощью лишь теплоты охлаждающего ДВС воздуха составляет 50–150% в зависимости от нагрузки (меньшие значения для больших нагрузок) (рис. 5).

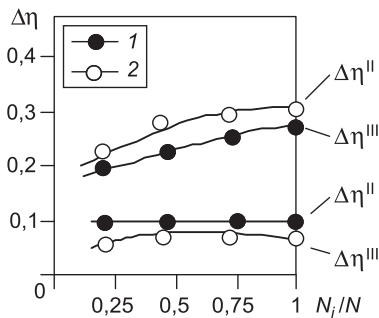


Рис. 4. Приращение коэффициента использования теплоты топлива  
 1 — Hitachi; 2 — ПЭС-15

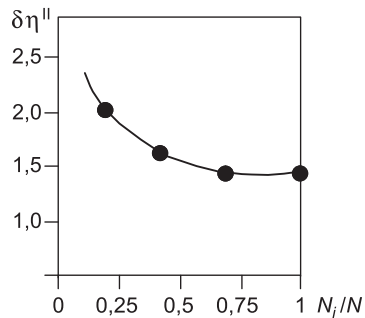


Рис. 5. Относительное увеличение коэффициента использования теплоты топлива при когенерации для ДВС с воздушным охлаждением

**Вывод.** Представлена опытная когенерационная теплоэнергетическая установка на базе ДВС с воздушным охлаждением и возможностью работы в режиме когенерации с использованием теплоты от контура охлаждения двигателя и утилизацией теплоты уходящих газов, для которой разработаны основные положения методики исследования. Показана работоспособность методики при различных нагрузках работы установки.

Когенерация для ТЭУ на базе ДВС с воздушным охлаждением повышает коэффициент использования теплоты топлива в  $\approx 0,5$  раза, а для ТЭУ на базе ДВС с водяным охлаждением — в  $\approx 3-4$  раза. Когенерация для ТЭУ на базе ДВС с воздушным охлаждением позволяет увеличить полноту использования топлива в  $\approx 2,5$  раза.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шинников, П.А. Теплоэнергетика: метод. указания [Текст] / П.А. Шинников, А.С. Кутузова. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. — 47 с.
2. Ноздренко, Г.В. Тепловая электростанция на базе ДВС: метод. указания [Текст] / Г.В. Ноздренко, Ю.И. Шаров, И.В. Бородин. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. — 39 с.
3. Григорьева, О.К. Расчет тепловых схем теплофикационных паротурбинных установок: метод. указания [Текст] / О.К. Григорьева, О.В. Боруш. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. — 63 с.

*ШИННИКОВ Павел Александрович, д-р физ.-мат. наук, проф.*

*Новосибирский государственный технический университет*

*СИНЕЛЬНИКОВ Денис Сергеевич, студ.*

*Новосибирский государственный технический университет*

Получено 08.06.15

**Shchinnikov Pavel Aleksandrovich**, doctor of physical and mathematical sciences, professor, Novosibirsk State Technical University, Russia

**Sinelnikov Denis Sergeevich**, student, Novosibirsk State Technical University, Russia

#### **POWER SUPPLY IN THE LOW-RISE CONSTRUCTION IN THE LACK OF INFRASTRUCTURE**

At the beginning of the low-rise buildings construction in areas designated for individual housing construction, as a rule, completely lack the infrastructure. The owners are beginning to work through the various options of energy micro-thermal power plants based on internal combustion engines type carburetor air-cooled. These microTPPs (gasoline generators) is used for its intended purpose to generate electricity at the same time there is an opportunity to increase their efficiency through the use of cogeneration, that is generating more heat.

**Key words:** cogeneration, energy efficiency, effectiveness, the internal combustion engine, gasoline generator, efficiency.

#### REFERENCES

1. Shchinnikov, P.A. Thermal engineering: methodical instructions [Text] / P.A. Shchinnikov, A.S. Kutuzova. — Novosibirsk : Publishing House of the NSTU, 2009. — 47 p.
2. Nozdrenko, G.V. Thermal power plant based on the internal combustion engine: methodical instructions [Text] / G.V. Nozdrenko, Yu.I. Sharov, I.V. Borodikhin. — Novosibirsk : Publishing House of the NSTU, 2008. — 39 p.
3. Grigorieva, O.K. Calculation of thermal schemes cogeneration steam turbines: methodical instructions [Text] / O.K. Grigorieva, O.V. Borush. — Novosibirsk : Publishing House of the NSTU, 2014. — 63 p.

УДК 697.921.2

В.А. БРОЙДА

**ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАБИЛИЗАТОРА РАСХОДА  
ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ**

В холодный период года с понижением температуры увеличивается больше расчетного объем естественной вытяжки, возрастают затраты тепла на нагрев наружного воздуха, замещающего удаляемый воздух. Применяя стабилизаторы расхода воздуха, можно избежать или уменьшить перерасход тепла. В статье рассчитываются характеристики стабилизатора расхода воздуха прямого действия с упругими элементами, имеющими линейные характеристики.

Ключевые слова: стабилизатор, расход, упругий элемент.

Наиболее радикальный способ снижения затрат тепла на нагревание наружного воздуха в холодный период года — это применение утилизаторов тепла удаляемого воздуха. Однако такое решение не всегда рационально, особенно для небольших рассредоточенных систем естественной вытяжной вентиляции, которые широко используются в зданиях различного назначения.

Естественные вытяжные системы работают в условиях изменяющегося гравитационного давления. При повышении гравитационного давления они удаляют излишнее количество воздуха, что приводит к повышенным затратам тепла на нагрев воздуха, компенсирующего вытяжку в холодный период года. Снизить дополнительные затраты тепла можно, поддерживая расчетный расход воздуха с помощью недорогих стабилизаторов расхода прямого действия. Такие устройства не потребляют энергию внешнего источника, в ответ на повышение давления или скорости воздушного потока в канале сокращают площадь сечения для прохода воздуха, увеличивают потерю давления и приближают расход к расчетному значению. Для компенсации усилия от давления потока на регулирующий элемент могут использоваться противовесы или силы натяжения упругих элементов [1, 2 и др.].

Целью исследования является определение характеристик работы стабилизирующего устройства прямого действия с упругими элементами, обладающими линейной характеристикой упругости.

Гравитационное давление  $P$ , возникающее при некоторой температуре наружного воздуха  $t$ , находится по формуле:

$$P = gh(\rho - \rho_{\text{в}}), \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха при любой температуре  $t$ , в том числе при температуре внутреннего воздуха  $t_{\text{в}}$ , определяется выражением:

$$\rho = 353 / (273 + t); \quad (2)$$

$h$  — разница отметок центра входной решетки и устья вытяжного канала, м.



Естественная вытяжная вентиляция рассчитывается на гравитационное давление  $P_5$ , соответствующее температуре наружного воздуха  $t = 5$  °С, при которой расход воздуха имеет расчетное значение  $L = L_5$ .

Гравитационное давление затрачивается на преодоление потерь давления в стабилизаторе  $\Delta P$  — устройстве с изменяемой геометрией и потерь давления в остальной части системы с неизменяемой геометрией, которые удобно выразить через характеристику  $s$ , тогда:

$$P = \Delta P + sL^2. \quad (3)$$

Изменение проходного сечения в стабилизирующем устройстве, например [2], происходит за счет аэродинамической силы, под действием которой перемещается регулирующий элемент устройства. Такое перемещение ограничивает упругий элемент, в котором оно вызывает растягивающее или сжимающее усилие.

Коэффициент местного сопротивления стабилизатора  $\xi$ , отнесенный к скорости в воздушном канале, для устройства определенной конструкции можно описать выражением:

$$\xi = a_1(l/d)^{b_1}, \quad (4)$$

где  $l$  — расстояние, характеризующее положение подвижного элемента, изменение которого связано с изменением площади для прохода воздуха, м;

$d$  — диаметр канала, м;

$a_1, b_1$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от конструкции устройства.

Тогда перепад давления, который гасится в устройстве за счет изменяющегося местного сопротивления,  $\Delta P$ , равен:

$$\Delta P = \zeta(\rho/2)(L/f)^2 = a_1(l/d)^{b_1}(\rho/2)(L/f)^2, \quad (5)$$

где  $f$  — площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>.

При  $t = 5$  °С начальная величина  $l = l_0$ , а относительный размер —  $l_0/d$ . Сила давления на подвижный элемент, которую уравновешивает натяжение упругого элемента, может быть выражена формулой:

$$F = k(\rho/2)(L/f)^2 f_0, \quad (6)$$

где  $k$  — эмпирический коэффициент, также зависящий от  $l/d$ ;

$f_0$  — площадь поперечного сечения элемента, воспринимающего давление воздушного потока, м<sup>2</sup>.

Зависимость  $k$  от  $l/d$  описывается формулой

$$k = a_2(l/d)^{b_2}, \quad (7)$$

где  $a_2, b_2$  — эмпирические коэффициенты.

Упругий элемент может работать на растяжение или сжатие, в зависимости от его конструктивного размещения в устройстве. При линейной характеристике упругости  $\alpha$  сила его воздействия на подвижный элемент

зависит от величины растяжения или сжатия  $x$  и связана с перемещением подвижного элемента  $l_0 - l$ :

$$F = -\alpha x = -\alpha(l_0 - l + x_0), \quad (8)$$

где  $x_0$  — начальное растяжение упругого элемента, при котором регулирующий орган устанавливается в начальное положение  $l = l_0$ , соответствующее расчетному давлению  $P_5$  и расходу  $L_5$ .

Для выбора характеристики упругого элемента  $\alpha$  можно поставить дополнительное условие, например, чтобы при минимальной расчетной температуре наружного воздуха  $t_m$  и соответственно максимальном гравиационном давлении  $P_m$  расход воздуха оставался расчетным  $L_m = L_5$ .

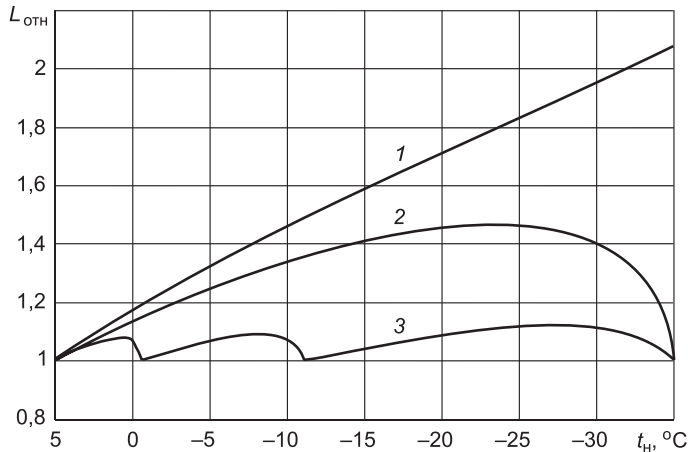
Совокупность приведенных зависимостей позволяет рассчитывать изменение расхода воздуха при работе стабилизирующего устройства.

Показательным является относительный расход воздуха  $l_{отн} = L/L_5$ , для нестабилизированного расхода в такой же системе  $L_{отн} = L_0$  составляет:

$$L_0 = \sqrt{((273 + 5)(t_b - t)) / ((273 + t)(t_b - 5))}. \quad (9)$$

Далее представлены результаты расчетов, выполненных при следующих условиях:  $h = 16$  м,  $t_b = 20$  °С, диапазон изменения температуры наружного воздуха от +5 до -35 °С,  $L_5 = 100$  м<sup>3</sup>/ч,  $d = 0,21$  м ( $f = 0,0346$  м<sup>2</sup>),  $f_0 = 0,0174$  м<sup>2</sup>. Эмпирические коэффициенты:  $a_1 = 2,75$ ,  $b_1 = -0,71$ ,  $a_2 = 0,33$ ,  $b_2 = -0,81$ .

С понижением температуры в указанном диапазоне при отсутствии стабилизации расход воздуха возрастает более чем в 2 раза (рисунок, линия 1).



Изменение относительного расхода вытяжного воздуха  
 1 — без стабилизации; 2 — при стабилизаторе с одним упругим элементом; 3 — при стабилизаторе с составным упругим элементом из трех элементарных

При использовании в стабилизаторе одного упругого элемента с постоянной характеристикой упругости  $\alpha = 6,409$  Н/м, с начальным растяжением  $x_0 = 0,00194$  м, при  $l_0/d = 0,05$  потери давления стабилизатора

очень велики, так при  $t = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta P = 9,0\text{ Па}$ , при гравитационном давлении  $P = 10,2\text{ Па}$ . В течение холодного периода расход воздуха возрастает приблизительно в 1,5 раза (рисунок, линия 2). Да и начальное сопротивление стабилизатора очень велико — требуется вытяжной канал с малыми потерями давления, с очень завышенным поперечным сечением, что нереально.

Применяя составной упругий элемент из трех отдельных с линейными характеристиками, приведенными в таблице, можно добиться хорошей стабилизации расхода в течение холодного периода (рисунок, линия 3). Расход воздуха отличается от расчетного не более чем на 12 %. При этом начальные потери давления в устройстве составляют всего 4,5 Па при  $l_0/d = 0,14$ , что практически осуществимо и не требует каналов завышенного сечения.

**Характеристики и настройка упругих элементов**

Значения $\zeta$ на границах диапазонов работы	11,2	22,0	43,7	98,1
Значения $k$ на границах диапазонов работы	1,62	3,5	7,60	18,92
Характеристика напряжения $\alpha$ , Н/м	0,347	1,965	12,9	
Начальное растяжение элементарных упругих элементов $x_0$ , мм	156,5	5,99	1,97	
Размер $l$ на границах диапазонов работы, мм	29,44	11,35	4,34	1,4

В заключение следует отметить, что использование одного упругого элемента с линейной характеристикой упругости  $\alpha$  дает ограниченный эффект стабилизации. Для лучшей стабилизации требуется упругий элемент с нелинейной характеристикой, такой элемент изготовить достаточно сложно. Можно применить составной упругий элемент с постоянными характеристиками упругости  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и т.д. Расчеты показывают, что достаточно точное поддержание заданного расхода возможно при использовании составного упругого элемента из трех элементарных с линейными характеристиками упругости.

Работа стабилизаторов расхода воздуха прямого действия возможна при значительном гравитационном давлении, их можно устанавливать на нижних этажах многоэтажных зданий (начиная с 3–4-го при отсчете этажей сверху здания). Применение стабилизирующих устройств в естественных вытяжных системах значительно снижает перерасход тепловой энергии на нагревание наружного воздуха в холодный период года [3].

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Пат. RU № 2277206 Российская Федерация, МПК F24F 11/04, F24F 13/08. Устройство для регулирования расхода воздуха [Текст] / Капустин Н.И., Федоренко И.Я., Демин А.В., Капустин В.Н.; Заявитель и патентообладатель Капустин Н.И. — Заявка 2004135681; заявл. 06.12.2004; опубл. 27.05.2006, Бюл. № 15. — 15 с.
2. Пат. RU № 2547602 Российская Федерация, МПК F24F 13/00. Устройство стабилизации расхода воздуха [Текст] / Бройда В.А. (RU); Патентообладатель ФГБОУВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет» КГАСУ(RU). — Заявка: 2013151943/12; заявл. 21.11.2013; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10. — 14 с.

3. Бройда, В.А. Экономия тепловой энергии за счет стабилизации расхода естественной вытяжной вентиляции [Текст] / В.А. Бройда // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 10. — С. 54–58.

*БРОЙДА Владимир Аронович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: broida@mail.ru  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 15.06.15

**Broyda Vladimir Aronovich**, candidate of technical sciences, assistant professor;  
E-mail: broida@mail.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

### **CHARACTERISTICS OF VENTILATION AIR FLOW STABILIZER WITH DIRECT ACTION**

In the cold season with decreasing temperature, increases more than the predicted natural exhaust flow rate, increases costs to heat the outdoor air, displacing exhaust air. Applying airflow stabilizers can reduce or prevent useless heat losses. In this article characteristics of airflow stabilizer of direct action with elastic elements having linear features are calculated.

Key words: stabilizer, airflow, elastic element.

#### REFERENCES

1. Pat. RU N 2277206 Russian Federation, MPK F24F 11/04, F24F 13/08. Device for air supply control [Text] / Kapustin N.I., Fedorenko I.Ya., Demin A.V., Kapustin V.N.; Applicant and patent holder N.I. Kapustin. — Application 2004135681; appl. 06.12.2004; Published 27.05.2006, Bull. N 15. — 15 p.
2. Pat. RU N 2547602 Russian Federation, MPK F24F 13/08, 13/00. Device for air supply stabilization [Text] / Broyda V.A. (RU); Patent holder FGBUVO «Kazan State University of Architecture and Engineering» KGASU (RU) — Application 2013151943/12; appl. 21.11.2013; Published 10.04.2015, Bull. N 10. — 14 p.
3. Broyda, V.A. Heat savings based on air flow rate stabilization of natural ventilation [Text] / V.A. Broyda // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 10. — P. 54–58.