

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**
СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 4 (664)
Апрель 2014 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.Л. Баладинский, д-р техн. наук, проф.
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.
П.А. Дмитриев, 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)
Е.М. Лобанов, д-р техн. наук, проф.
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 E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 25.04.14. Формат 70×108¹/₁₆
Усл. печ. л. 11,03+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 5908

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2014

СО Д Е Р Ж А Н И Е

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОН-
СТРУКЦИИ**

**Руднев И.В., Жаданов В.И.,
Лисов С.В.** Соединения
элементов деревянных кон-
струкций с применением
вклеенных стальных пла-
стин 5

**ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕР-
НЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Дукарт А.В., Олейник А.И.
Об эффективности динами-
ческих гасителей при пус-
ковом режиме прохожде-
ния виброизолированной
конструкции через резонанс 13

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МА-
ТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

Хархардин А.Н. Матема-
тические модели вложения
и разбиения образований
на элементы дискретности
вещества. Часть 3 23

**Селяев В.П., Неверов В.А.,
Куприяшкина Л.И., Се-
ляев П.В., Окин М.А.**
Прогнозирование теплопро-
водности наполнителей ва-
куумных изоляционных па-
нелей 30

**Ильина Л.В., Бердов Г.И.,
Гичко Н.О., Теплов А.Н.**
Изменение механической
прочности и структуры
портландцементного камня
при введении комплексных
дисперсных минеральных
наполнителей 38

**Траутвайн А.И., Яды-
кина В.В., Гридчин А.М.,
Вербкин В.И.** Управление

процессом взаимодействия в системе «органическое вяжущее — минеральный наполнитель»	45
Машкин Н.А., Шаравин Ю.А., Каткова Т.Ф., Величко Б.П., Ступин В.П. Технология и свойства дисперсно-армированного керамического кирпича из пылеватых суглинков	52
Тацки Л.Н., Машкина Е.В. Пути повышения качества керамического кирпича на основе местного сырья	64
ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	
Дегтярев-мл. В.В., Ершов Д.И. Математическая модель расчета гидродинамики потока на устьевых взморьях бесприливных рек	68
Кузнецов Г.И., Балацкая Н.В. Влияние фильтрационных и криогенных факторов на безопасность гидротвалов в суровых климатических условиях.....	76
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., Толмачева Е.И. Разработка способов снижения объема аспирации при перегрузках сыпучих материалов ковшовыми элеваторами. Сообщение 3. Результаты расчетов и их обсуждение	86
Рымаров А.Г., Савичев В.В. К расчету требуемого воздухообмена в помещениях общественных зданий в зависимости от количества человек	99
Бройда В.А. Годовой расход тепла на вентиляцию зданий	103
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Суворов Д.Г., Никулин М.С. Пневматическая трамбовка с автоматически управляемым рабочим процессом	108
Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Крутиков Е.И., Попов Д.А. Пневматический ударный механизм с комбинированным воздухораспределением	114
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Ижендеев А.В. Матрица начальных напряжений изгибаемого тонкостенного стержня открытого профиля	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 4 (664)

April 2014

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

Editorial Board:

A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
V.L. Baladinsky, DSc (Eng), Prof.
V.A. Vorobyov, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
P.A. Dmitriev, DSc (Eng), Prof.
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)
Ye.M. Lobanov, DSc (Eng), Prof.
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 E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTIONS

Rudnev I.V., Zhadanov V.I., Lisov S.V.
Connections of wooden constructions elements with the use of the pasted steel plates 5

THE THEORY OF ENGINEERING STRUCTURES

Dukart A.V., Oleinik A.I.
On efficiency of dynamic absorbers at starting mode of passing vibroisolated structure through resonance 13

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Kharkhardin A.N. Mathematical models of integration and desintegration of discreteness elements of substance. Part 3 23

Selyaev V.P., Neverov V.A., Kupriyashkina L.I., Selyaev P.V., Okin M.A.
Prediction of heat conduction fillers vacuum insulation panels 30

Ilina L.V., Berdov G.I., Gichko N.O., Teplov A.N.
Changing structure and mechanical strength portland cement stones when introducing complex dispersive mineral fillers 38

Trautvain A.I., Yadykina V.V., Gridchin A.M., Verbkin V.I. The management of the process of interaction in the system «organic binder — mineral filler» 45

Mashkin N.A., Sharavin Yu.A., Katkova T.F., Velichko B.P., Stupin V.P. Technology and properties of dispersive-reinforced ceramic brick of silty loam	52
Tatski L.N., Mashkina E.V. Means to increase quality of ceramic brick on base regional raw	64
HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION	
Degtyarev-youn. V.V., Ershov D.I. Numerical modelling of the hydrological mode in areas mixtures of river and sea waters	68
Kuznetsov G.I., Balatskaya N.V. Effect of filtration and cryogenic factors on safety gidrootvalov in harsh climatic conditions	76
SANITARY ENGINEERING	
Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A., Tolmacheva E.I. Development of methods for reducing the volume of aspiration during overloads of granular materials by bucket elevators. Message 3. The results of calculations and discussion	86
Rymarov A.G., Savichev V.V. To calculate the required air exchange in rooms of public buildings depending on the number of people	99
Broyda V.A. Annual heat consumption for ventilation of buildings	103
BUILDING AND ROAD MACHINES	
Suvorov D.G., Nikulin M.S. Pneumatic rammer with automatically controlled work process	108
Abramenkov D.E., Abramenkov E.A., Dedov A.S., Krutikov Eu.I., Popov D.A. Pneumatic hammer mechanism with a combination of the air.....	114
SCIENTIFIC AND METHODOICAL SECTION	
Izhendeev A.V. The matrix of the initial stress of bending thin-walled rod with an open profile	119

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.011.1:674.028.9

И.В. РУДНЕВ, В.И. ЖАДАНОВ, С.В. ЛИСОВ

СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВКЛЕЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН

Отмечена актуальность и перспективность использования в соединениях деревянных конструкций клеенных стальных пластин. Предложены варианты узловых соединений деревянных конструкций с применением отмеченных клеенных элементов. Приведены и проанализированы результаты численных исследований напряженно-деформированного состояния клеенных в древесину стальных пластин при их работе на выдерживание.

Ключевые слова: древесина, клеенные стальные пластины, конструкции стыков, численные методы, экспериментальные исследования, деформативность соединения.

Применение металлических элементов, как правило стальных, в узловых соединениях деревянных конструкций широко распространено в практике отечественного и зарубежного строительства как один из наиболее эффективных способов повышения прочности и надежности стыков. Особенности проектирования и расчета наиболее распространенных и многократно апробированных типовых соединений с применением стальных изделий, таких как цилиндрические нагели, клеенные стержни, металлические зубчатые пластины, достаточно хорошо изучены и приведены в нормативной литературе [1].

Наиболее перспективными видами соединений элементов цельнодеревянных и клееных деревянных конструкций, работающих на растяжение, сжатие, изгиб и различные сочетания этих видов нагрузжений, являются соединения на стальных стержнях, клеиваемых вдоль волокон древесины в комбинации с поперечно или наклонно клеенными стержнями. Соединения такого типа характеризуются достаточно высокой прочностью, жесткостью и защищенностью клеенных стержней от внешних воздействий среды, в том числе от огневого. В качестве основного соединительного и армирующего элемента используют клеенные в древесину стальные стержни из арматуры периодического профиля. В России наиболее распространены различные типы соединений с наклонно клеенными связями [2]. В основу конструкции таких узлов положена универсальная схема жесткого стыка, включающая в различной комплектации клеиваемые связи из арматуры периодического профиля, поперечное армирование, стальные закладные детали и ребра жесткости. Указанные элементы позволяют надежно проектировать и эксплуатировать соединения, воспринимающие различные комбинации усилий, в том числе наиболее опасные для древесины растяжение и сдвиг.

Несмотря на эксплуатационную надежность таких соединений (при условии достаточно точного соблюдения параметров соединения при изготовлении), они имеют ряд конструктивных особенностей, существенно усложняющих технологию изготовления узлов. Также следует отметить многообразие стальных изделий, применяемых для обеспечения требуемой степени прочности и жесткости указанных соединений, повышающих металло- и трудоемкость процесса изготовления и монтажа конструкций. При этом оптимизация геометрических размеров путем изменения формы вклеенных стержней с целью снижения их металлоемкости практически не осуществима.

По мнению авторов, более эффективным способом соединения элементов деревянных конструкций представляется применение вклеенных металлических пластин, используемых в качестве как соединительных элементов, так и элементов, обеспечивающих прочность и жесткость стыка в целом. Такая идея была впервые высказана и конструктивно реализована доктором технических наук, профессором П.А. Дмитриевым. Применение пластин вместо вклеиваемых стержней из арматуры периодического профиля позволит добиться следующих практических результатов:

- снизить металлоемкость стыка, расход клеевой композиции и количество отходов древесины при его изготовлении за счет использования прямоугольной формы сечения пластины (полосы);
- оптимизировать форму пластин при расчетах различных типов соединений;
- унифицировать типы соединительных элементов;
- повысить технологичность изготовления стыка;
- снизить трудоемкость и повысить качество сборки и монтажа элементов деревянных конструкций.

Особенно актуальна проблема использования возможности оптимизации геометрической формы пластин, что позволит значительно уменьшить металлоемкость стыка в целом.

На рис. 1 показан вариант неразъемного стыка растянутых элементов круглого поперечного сечения (поз. 1), соединенных вклеенными в

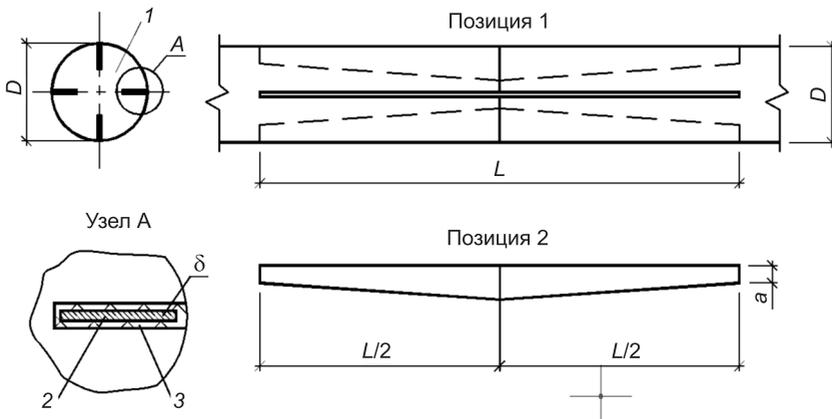


Рис. 1. Конструктивное решение стыка растянутого элемента на стальных вклеенных пластинах:

1 — бревенчатый элемент; 2 — металлическая пластина; 3 — клеевая композиция

предварительно пропиленные пазы цельными стальными пластинами симметрично трапециевидной формы (поз. 2). Геометрические размеры пластины определяются из условий прочности и жесткости растянутого элемента конструкции и корректируются с учетом характера напряженно-деформированного состояния составляющих соединения «металл — клей — древесина».

Аналогичное конструктивное решение может быть использовано для фиксации деталей узлового соединения на концах стержневых деревянных элементов (рис. 2) в структурных покрытиях [3]. Детали узлового соединения структурного покрытия 4 прикрепляются при помощи сварки к трапециевидным стальным пластинам 2, которые клеиваются в деревянный брус 1. Длина бруса может быть увеличена стыковкой двух элементов с помощью аналогичных клеенных стальных пластин 3.

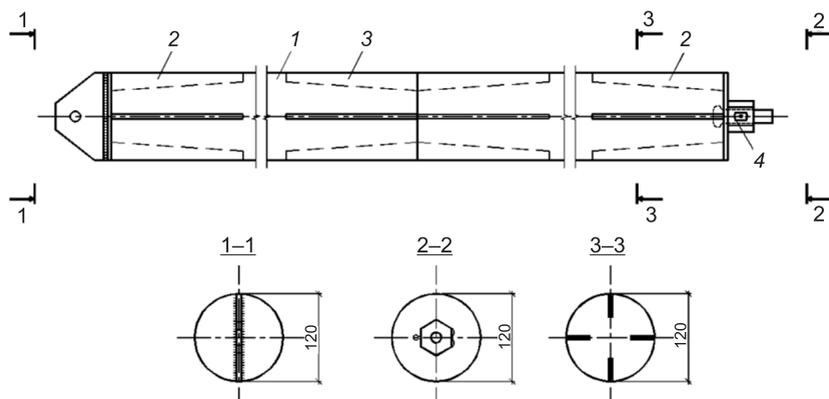


Рис. 2. Конструктивное решение элемента структурного покрытия на клеенных стальных пластинах:

1 — бревенчатый элемент; 2 — пластина крепления узлового соединения; 3 — стальная пластина стыка; 4 — узловое соединение структурного покрытия

В предложенных типах соединений клеенные пластины обеспечивают как сопряжение деревянных элементов, так и восприятие всех усилий, действующих в стыке.

Одна из наиболее значимых характеристик соединений элементов деревянных конструкций, в том числе на клеенных стержнях, — его надежная работа на выдергивание, связанная с возникающим напряженно-деформированным состоянием во всех компонентах соединения.

Согласно указаниям норм [1, п. 7.36], расчетная несущая способность на выдергивание и продавливание клеиваемого стержня из арматуры периодического профиля является функцией периметра окружности отверстия и длины заделываемой части стержня. При этом коэффициент, учитывающий неравномерность распределения напряжений сдвига в зависимости от длины заделываемой части, входящий в состав формулы, определяется по эмпирической зависимости с учетом диаметра стержня.

Более подробно распределение нормальных и касательных напряжений по длине заделанной части стержня из арматуры периодического

профиля исследовано и приведено в различных источниках. В частности, на основании теоретических и экспериментальных исследований [4] доказано, что значения нормальных напряжений в стальном стержне круглого поперечного сечения уменьшаются в направлении от начала вклеенной части вглубь по нисходящей вогнутой кривой, а значения касательных напряжений на порядок меньше значений нормальных напряжений. Отметим, что все известные данные касаются вклеенных в древесину круглых стержней, как правило, из арматуры периодического профиля.

В связи с отсутствием в литературе теоретически обоснованных и подтвержденных экспериментами сведений о распределении напряжений при выдергивании по длине вклеенных в древесину плоских элементов, авторами были проведены «пилотные» натурные испытания. Кроме того, в системе автоматизированного проектирования APMWinMachine (г. Королев), алгоритм расчетного ядра которой базируется на методе конечных элементов, была создана твердотельная модель соединения «стальная пластина — клеевая композиция — массив древесины». Узлы конечно-элементной сетки в зоне контакта компонентов соединения приняты абсолютно жесткими, с целью получить качественную картину распределения нормальных напряжений по длине пластины при идеальном клеевом соединении. Такой подход позволяет определить величину максимально возможных напряжений, возникающих при выдергивании пластины.

Пространственная твердотельная модель соединения состоит из деревянного бруса сечением 100×150 мм длиной 300 мм, в который соосно и симметрично вклеена стальная пластина (полоса) сечением 5×50 мм с длиной заделанной части 250 мм. Толщина клеевой прослойки между поверхностями пластины и паза в брусе составляет 2,5 мм. В качестве конечных элементов приняты параллелепипеды с квадратным основанием. Сгущение конечно-элементной сетки произведено в зоне контакта металла с древесиной и в теле металлической пластины. Упругие характеристики материалов, введенные в расчет, соответствовали характеристикам древесины сосны 2-го сорта, стали С235 и клеевой композиции ЭПЦ-1. Узлы конечно-элементной сетки на торцевой поверхности бруса жестко закреплены (лишены шести степеней свободы). С другой стороны соединения к узлам конечно-элементной сетки торца пластины симметрично приложены сосредоточенные силы.

На рис. 3 приведены твердотельная модель соединения, разбитая на конечные элементы (рис. 3, *а*), и карта напряжений по длине вклеенной части пластины (рис. 3, *б*). На рис. 3, *в* показана эпюра распределения эквивалентных напряжений по длине кромки пластины, очертания которой качественно соответствуют ранее полученным теоретическим данным для стержней с круглым сечением. Переходя к геометрической форме вклеенной части пластины с учетом линейной аппроксимации кривой распределения напряжений по длине, получим равнобедренный треугольник с основанием у свободного торца пластины. Отсекая острый угол полученного равнобедренного треугольника в связи с нулевым уровнем напряжений в этой части пластины, получим оптимизированную в первой итерации геометрическую форму пластины в виде равнобедренной трапе-

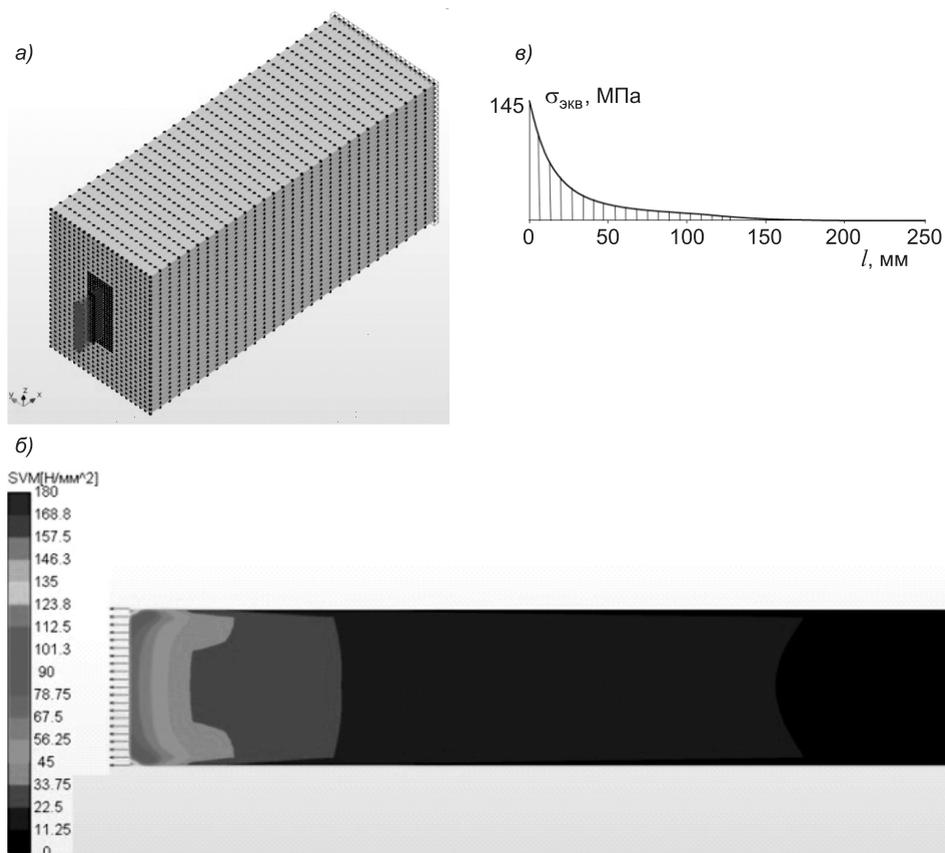


Рис. 3. Результаты расчета на выдергивание клеенной стальной пластины из деревянного бруса:

а — конечно-элементная модель соединения; *б* — карта распределения эквивалентных напряжений в пластине; *в* — эпюра распределения эквивалентных напряжений по длине пластины

ции. На рис. 4 показана карта распределения эквивалентных напряжений в оптимизированной трапециевидной пластине, определенная с учетом ее фактической геометрии.

Результаты «пилотных» натурных экспериментов на выдергивание из массива сосны 2-го сорта стальных пластин из стали С235, клеенных на композиции ЭПЦ-1, позволяют констатировать качественную сходимость результатов эксперимента и расчетов численными методами. Характер распределения фактических нормальных напряжений в пластине, определенных с применением средств тензометрии, в целом совпадает с результатами численных исследований при расхождении в 19–28 %. Достаточно высокая погрешность между результатами теоретических и экспериментальных исследований объясняется, прежде всего, повышенной деформативностью натурального клеевого соединения в зоне контакта клеевой композиции с металлом, что необходимо будет учитывать при проведении дальнейших детальных численных и экспериментальных исследований.

Следует отметить, что оптимизация в первом приближении формы пластины позволила уменьшить расход стали на нее в 1,4 раза с сохранением расчетной несущей способности. Кроме того, при одинаковом уров-

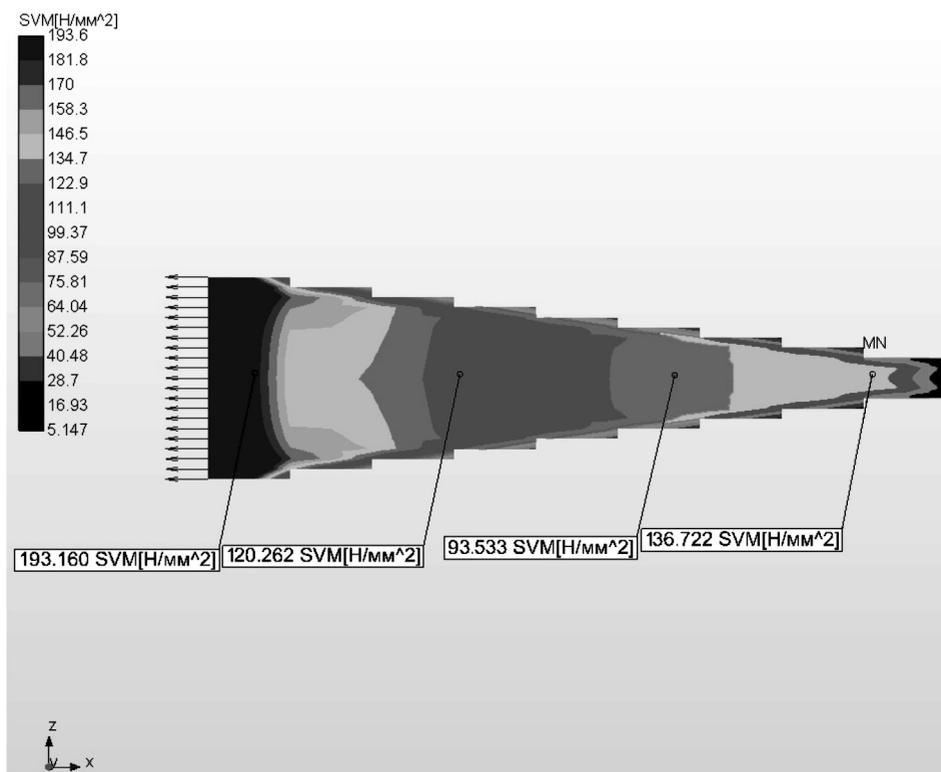


Рис. 4. Карта распределения напряжений в трапециевидной пластине

не максимальных значений нормальных напряжений в прямоугольной и трапециевидной пластинах было достигнуто их более равномерное распределение по длине оптимизированной пластины.

Выводы. 1. Получена качественная и удовлетворительная количественная сходимость результатов численного расчета предложенной конечно-элементной модели соединений деревянных элементов на стальных пластинах с известными теоретическими и экспериментальными исследованиями, в том числе с результатами «пилотных» экспериментов, проведенных авторами.

2. Результаты исследований дают основания считать, что усовершенствование конечно-элементной модели соединений деревянных элементов на стальных пластинах даст возможность разработать параметрическую математическую модель клеевого соединения стальных пластин с деревянным брусом, позволяющую выполнять многофакторный анализ оценки напряженно-деформированного состояния соединения.

3. Результаты численных исследований подтверждают возможность оптимизации геометрической формы вклеиваемых в древесину пластин с целью снижения металлоемкости узлового сопряжения на основании анализа напряженно-деформированного состояния соединения.

4. Одним из направлений дальнейшего исследования соединений элементов деревянных конструкций с применением стальных пластин следует считать поиск путей снижения деформативности клеевого соединения в зоне контакта клеевой композиции с поверхностью пластины.

Представляя затронутую проблему применения в соединениях деревянных элементов клеенных стальных пластин актуальной, авторы надеются привлечь внимание специалистов и исследователей в области строительных конструкций к описанным выше техническим решениям. Принципы проектирования такого рода узлов деревянных конструкций и получаемые в результате реализации конструктивные, технологические и экономические достоинства могут быть использованы в соединениях крупноразмерных клеенных элементов, при разработке новых типов сплошных, сквозных и разнообразных пластинчато-стержневых конструкций, в том числе сборно-разборных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная версия СНиП II-25-80 [Текст] / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко — институт ОАО «НИЦ «Строительство». — М., 2011. — 87 с.
2. Турковский, С.Б. Клеенные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК) / под общ. ред. С.Б. Турковского и И.П. Преображенской [Текст] / С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев, И.П. Преображенская. — М. : РИФ «Стройматериалы», 2013. — 308 с.
3. Дмитриев, П.А. Индустриальные пространственные деревянные конструкции [Текст] / П.А. Дмитриев, В.И. Жаданов, А.Г. Кондаков, Ю.Д. Стрижаков // Drgewo v stavebných Konstrukciách. — Bratislava; Kocovce, 1984. — С. 352-368.
4. Бондин, В.Ф. О прочности на сдвиг клеевых соединений стальных стержней с древесинной [Текст] / В.Ф. Бондин, Ю.Б. Вылегжанин // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1976. — № 11. — С. 20-25.

РУДНЕВ Игорь Владимирович, инж.; E-mail: ru403@mail.ru

Оренбургский государственный университет

ЖАДАНОВ Виктор Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: organ-2003@bk.ru

Оренбургский государственный университет

ЛИСОВ Сергей Вячеславович, препод.; E-mail: lisoff@bk.ru

Оренбургский государственный университет

Получено 24.02.14

Rudnev Igor Vladimirovich, engineer; E-mail: ru403@mail.ru, Orenburg State University, Russia

Zhadanov Victor Ivanovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: organ-2003@bk.ru, Orenburg State University, Russia

Lisov Sergei Vyacheslavovich, lecturer; E-mail: lisoff@bk.ru, Orenburg State University, Russia

CONNECTIONS OF WOODEN CONSTRUCTIONS ELEMENTS WITH THE USE OF THE PASTED STEEL PLATES

Relevance and prospects of pasted steel beams application in wooden constructions connections is marked. Variants of nodal connections of wooden constructions using the offered pasted elements are suggested. Results of numerical researches of intense the deformed condition of the steel plates pasted in wood in time of their work on wrest are analyzed and given.

Key words: the wood, the pasted steel plates, designs of joints, the numerical methods, experimental researchers, deformability of connection.

REFERENCES

1. SR 64.13330.2011. Wooden constructions. The refreshed version SN&R II-25-80 [Text] / Construction Norms and Regulations. TsNIISK V.A. Kucherenko — Construction institute. — Moscow, 2011. — 87 p.
2. Turkovsky, S.B. Glued wooden constructions with nodes on the pasted rods in the modern construction (TsNIISK system) / Under general edition of S.B. Turkovsky's and I.P. Preobrazhenskaya [Text] / S.B. Turkovsky, A.A. Pogoreltsev, I.P. Preobrazhenskaya. — Moscow : RIF «Building Materials», 2013. — 308 p.
3. Dmitriev, P.A. Industrial spatial wooden constructions [Text] / P.A. Dmitriev, V.I. Zhadanov, A.G. Kondakov, Yu.D. Strizhakov // *Drewo v stavebnyeh Konstrukciach*. — Bratislava; Kocovce, 1984. — P. 352-368.
4. Bondin, V.F. About strength on shift of glue joints of steel rods with the wood [Text] / V.F. Bondin, Yu.B. Vylegzhanin // *News of Higher Education Institutions. Construction and Architecture*. — 1976. — N 11. — P. 20-25.

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.042:534.014.2

А.В. ДУКАРТ, А.И. ОЛЕЙНИК

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ГАСИТЕЛЕЙ ПРИ ПУСКОВОМ РЕЖИМЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВИБРОИЗОЛИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ЧЕРЕЗ РЕЗОНАНС

Рассматриваются нестационарные колебания виброизолированной конструкции, оборудованной трехмассовым динамическим гасителем с последовательным соединением звеньев, при пусковом режиме прохождения через резонанс. Виброизолированная конструкция моделируется системой с одной степенью свободы. Рассеяние энергии во всех звеньях системы «виброизолированная конструкция — гаситель» учитывается по гипотезе частотно-независимого трения Е.С. Сорокина. Для определения уравнений движения системы используется аналитический способ, основанный на разложении по формам свободных колебаний системы с демпфированием и применении специальных функций. Анализируется поведение виброизолированной конструкции с одно-, двух- и трехмассовым гасителями при различных скоростях прохождения через резонанс.

Ключевые слова: виброизолированная конструкция, прохождение через резонанс, динамический гаситель колебаний, частотно-независимое трение, коэффициент динамичности.

Разработка эффективных систем виброзащиты в строительстве и машиностроении тесно связана с характером внешнего воздействия и режимами эксплуатации конструкций. Так, при гармонических воздействиях применение виброизоляции позволяет значительно уменьшить амплитуды колебаний изолируемой системы и снизить динамические нагрузки, передаваемые на поддерживающие конструкции. При частотно узкополосных гармонических воздействиях в дорезонансных и зарезонансных эксплуатационных режимах качество виброизоляции может быть значительно улучшено за счет применения динамических гасителей колебаний (ДГК) без затухания [1]. В случае, если режим эксплуатации конструкции близок к резонансному, высокую эффективность демпфирования колебаний обеспечивают гасители с оптимальным трением. Дополнительному повышению эффективности виброзащиты способствует применение частотно широкополосных многомассовых ДГК [2].

Большую опасность для виброизолированной конструкции представляют нестационарные пуско-остановочные режимы колебаний, в которых имеет место прохождение системы через резонанс. Для исключения неограниченного роста амплитуд резонансных колебаний виброизоляцию дополняют специальными демпферами, которые, вместе с тем, серьезно

ухудшают качество виброизоляции в эксплуатационном режиме изолируемой конструкции. Применение с этой целью существенно нелинейных упругодемпфирующих связей (упругие элементы с билинейными характеристиками, преднапряженные упругие связи, ограничители колебаний, пневматические упругодемпфирующие элементы и др.) является эффективным, но может привести к возникновению неустойчивых колебаний и биений защищаемой конструкции [3].

Отмеченных недостатков лишены ДГК, которые уменьшают резонансные колебания, не ухудшая при этом характеристики виброизоляции. В специальной литературе, посвященной гасителям колебаний, вопросы эффективности гасителей при прохождении через резонанс отражены недостаточно. В большинстве случаев рекомендуется принимать оптимальные настроечные параметры, полученные для стационарных колебаний [1], что корректно только при медленном прохождении системы через резонанс. Вместе с тем современные тенденции развития техники связаны с созданием мощных быстроходных машин и использованием ускоренных режимов разгона двигателей до номинальной скорости. Отметим, что при большой скорости прохождения системы через резонанс внешнее воздействие на защищаемую конструкцию становится подобным кратковременному импульсу, т. е. в этом случае задача сводится к гашению колебаний виброизолированной конструкции, вызванных импульсивными нагрузками. Известно [4], что при таких воздействиях гасители колебаний имеют высокую эффективность. Большой интерес представляет комплексное исследование влияния на амплитуды колебаний защищаемой конструкции скорости прохождения системы через резонанс, рассеяния энергии в виброизолированной системе и многомассовости гасителя. Детальное рассмотрение обозначенных проблем актуально как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Задача прохождения через резонанс системы с одной степенью свободы изучалась различными методами [1, 5, 6]. Наиболее полно эта задача рассмотрена в монографии [6], в которой ее решение выражено через интеграл вероятностей в комплексной области. Погрешность решения задачи по этой методике существенно ниже, чем при использовании численного интегрирования дифференциальных уравнений движения. Поскольку погрешность в этом случае в каждый момент времени одна и та же и связана только с точностью вычисления специальных функций [7], входящих в решение, в то время как при использовании численного интегрирования (например, методом Рунге-Кутты) погрешность зависит от числа шагов интегрирования и накапливается во времени. Данные по эффективности одномассовых динамических гасителей при прохождении через резонанс, приведенные в монографии [1], получены методом численного интегрирования дифференциальных уравнений первого порядка. С помощью такой же методики в [2] исследуется эффективность многомассовых ДГК в переходных режимах с учетом нелинейности параметров гасителей. Полученные в этих работах результаты свидетельствуют о высокой эффективности гасителей колебаний, однако они не являются исчерпывающими и нуждаются в дополнениях.

Остановимся на возможностях применения линейных ДГК с последовательным соединением масс (рис. 1) в пусковом режиме с линейным

изменением частоты. Функция внешней нагрузки может быть представлена в виде [6]

$$P(t) = P_0 \exp(i\varepsilon_0 t^2 / 2 + \delta_0). \quad (1)$$

Здесь $\varepsilon_0, \delta_0, P_0$ — некоторые постоянные, которые будем считать известными. Как частные случаи изображенной на рис. 1 модели могут быть исследованы колебания виброизолированной конструкции, оборудованной одно-, двух- и трехмассовым гасителями, а также конструкции без гасителя. Демпфирование в звеньях системы учтем в соответствии с ранней гипотезой частотно-независимого трения Е.С. Сорокина [8].

Обозначим через m_j, c_j, γ_j, y_j соответственно массу, квазиупругий коэффициент, коэффициент неупругого сопротивления и абсолютную координату виброизолированной конструкции ($j = 1$) и звеньев гасителя ($j = 2, 3, 4$). С учетом (1) вынужденные колебания рассматриваемой системы описываются дифференциальными уравнениями

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1(t) + \bar{c}_1 y_1(t) - \bar{c}_2 [y_2(t) - y_1(t)] &= P_0 \exp(i\varepsilon_0 t^2 / 2 + \delta_0); \\ m_2 \ddot{y}_2(t) + \bar{c}_2 [y_2(t) - y_1(t)] - \bar{c}_3 [y_3(t) - y_2(t)] &= 0; \\ m_3 \ddot{y}_3(t) + \bar{c}_3 [y_3(t) - y_2(t)] - \bar{c}_4 [y_4(t) - y_3(t)] &= 0; \\ m_4 \ddot{y}_4(t) + \bar{c}_4 [y_4(t) - y_3(t)] &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\bar{c}_j = c_j(1 + i\gamma_j)$; $j = \overline{1,4}$. В (2) точками обозначена операция дифференцирования по времени t . Вводя безразмерные параметры

$$\begin{aligned} \mu_j &= m_j / m_{j-1}; \quad \bar{f}_j = c_j / (m_j \omega_0^2); \quad \theta = \theta / \omega_0; \\ \tau &= \omega_0 t; \quad \varepsilon = \varepsilon_0 / \omega_0^2; \quad \bar{f}_j = f_j (1 + i\gamma_j), \end{aligned} \quad (3)$$

перепишем систему уравнений (2) в виде

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1(\tau) + (\bar{f}_1 + \mu_2 \bar{f}_2) y_1(\tau) - \mu_2 \bar{f}_2 y_2(\tau) &= y_{1,ст} \exp(i\varepsilon \tau^2 / 2 + \delta_0); \\ \ddot{y}_2(\tau) + \bar{f}_2 [y_2(\tau) - y_1(\tau)] - \mu_3 \bar{f}_3 [y_3(\tau) - y_2(\tau)] &= 0; \\ \ddot{y}_3(\tau) + \bar{f}_3 [y_3(\tau) - y_2(\tau)] - \mu_4 \bar{f}_4 [y_4(\tau) - y_3(\tau)] &= 0; \\ \ddot{y}_4(\tau) + \bar{f}_4 [y_4(\tau) - y_3(\tau)] &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

В (3), (4) $y_{1,ст} = P_0 / (m_1 \omega_0^2)$ — статическое перемещение массы m_1 ; $\omega_0 = \sqrt{c_1 / m_1}$ — частота собственных колебаний виброизолированной конструкции без гасителя.

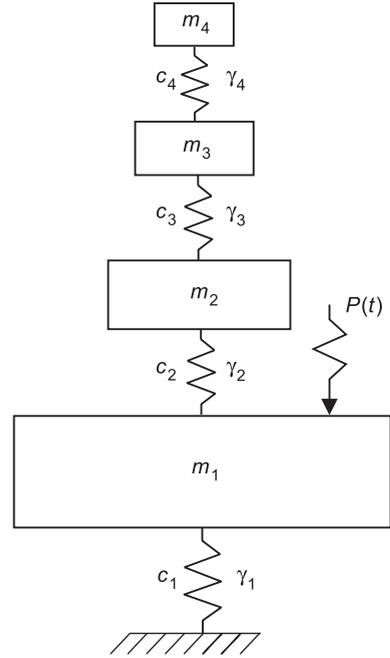


Рис. 1. Расчетная схема виброизолированной конструкции с трехмассовым ДГК каскадного типа

В соответствии с методом главных координат [9] дифференциальное уравнение движения, соответствующее s -й обобщенной координате системы, имеет вид

$$\ddot{\bar{y}}_s + \bar{\omega}_s^2 \bar{y}_s + \bar{h}_s \dot{\bar{y}}_s = a_{s1} y_{1,ct} \exp(i\epsilon\tau^2 / 2 + \delta_0). \quad (5)$$

Здесь $\bar{\omega}_s = \omega_s / \omega_0$, $\bar{h}_s = h_s / \omega_0$, a_{s1} — соответственно безразмерные частоты собственных колебаний, коэффициенты демпфирования и нормированные компоненты собственных векторов, полученные из решения проблемы собственных значений, причем:

$$\sum_{i=1}^N a_{si} a_{ki} = \begin{cases} 0 & \text{при } s \neq k; \\ 1 & \text{при } s = k, \end{cases} \quad (6)$$

где N — число степеней свободы системы с гасителем. В (4), (5), в отличие от (2), точками обозначена операция дифференцирования по безразмерному параметру τ .

Как показано в [6], амплитуда колебаний системы с одной степенью свободы при прохождении через резонанс в пусковом режиме определяется выражением

$$\bar{y}_s = \frac{(1+i)y_{1,ct} a_{s1}}{4\bar{\omega}_s} \sqrt{\frac{\pi}{\epsilon}} \{W(u_s) + W(v_s) - W(u_{s_0}) \exp(u_{s_0}^2 - u_s^2) - W(v_{s_0}) \exp(v_{s_0}^2 - v_s^2)\} \exp(i\theta(t)). \quad (7)$$

Здесь

$$\begin{aligned} u_s &= x_{1s} + iy_{1s}; \quad x_{1s} = \lambda_s b_s (\xi_s - 1) + \bar{h}_s / 2; \quad y_{1s} = \bar{h}_s - x_{1s}; \\ \xi_s &= \frac{\epsilon\tau}{\bar{\omega}_s}; \quad \lambda_s = \frac{\bar{h}_s}{2\sqrt{\epsilon}}; \quad b_s = \frac{\bar{\omega}_s}{\bar{h}_s}; \quad v_s = x_{2s} + iy_{2s}; \quad x_{2s} = -(2\lambda_s b_s + x_{1s}); \\ y_{2s} &= -(x_{2s} + \bar{h}_s); \quad v_{s_0} = v_s|_{\xi_s=0}; \quad u_{s_0} = u_s|_{\xi_s=0}, \end{aligned}$$

причем интеграл вероятностей комплексного аргумента определяется выражением

$$W(z) = \exp(-z^2) \left(1 + \frac{2i}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(t^2) dt \right).$$

Представим функции $W(u_s), W(v_s), W(u_{s_0}), W(v_{s_0})$ в виде комбинации действительной и комплексной частей

$$\begin{aligned} W(u_s) &= u_1^s + iu_2^s; \quad W(v_s) = v_1^s + iv_2^s; \\ W(u_{s_0}) &= u_{10}^s + iu_{20}^s; \quad W(v_{s_0}) = v_{10}^s + iv_{20}^s, \end{aligned} \quad (8)$$

где u, v — функции, определяемые по таблицам или с помощью разложения в ряды [6]. Подставляя (8) в (7) и группируя действительные и комплексные части, получим

$$\bar{y}_s = \frac{(1+i)a_{s1}y_{1,ct}}{4\bar{\omega}_s} \sqrt{\frac{\pi}{\epsilon}} (P_1^s + iP_2^s), \quad (9)$$

где P_1^s, P_2^s — действительная и мнимая части выражения, полученного в результате преобразования уравнения движения (7).

Амплитуда колебаний главной массы m_1 определяется выражением

$$y_1 = \frac{y_{1,ст}}{4} \sqrt{\frac{\pi}{\varepsilon}} \sqrt{\left(\sum_{s=1}^3 \frac{a_{s1}^2 P_1^s}{\bar{\omega}_s} \right)^2 + \left(\sum_{s=1}^3 \frac{a_{s1}^2 P_1^s}{\bar{\omega}_s} \right)^2}. \quad (10)$$

Исследуем сначала влияние скорости прохождения системы через резонанс на уровень максимальных амплитуд колебаний виброизолированной конструкции без гасителя. С этой целью в выражении (7) примем $s=1$, $a_{s1}=1$. Кроме того, будем пренебрегать также влиянием начальных условий, учитываемых слагаемыми, содержащими функции $W(u_{s_0})$, $W(v_{s_0})$.

При малых значениях параметра ε и приближении частоты воздействия к частоте собственных колебаний $\xi_s = \varepsilon\tau / \omega_s \rightarrow 1$, величины x_{1s} , y_{1s} , x_{2s} , y_{2s} становятся малыми. Таким образом, аргументы функций $W(u_s)$, $W(v_s)$ будут стремиться к нулю. Поэтому при $z \rightarrow 0$ интеграл вероятностей $W(z) \rightarrow 1$.

Некоторые численные результаты, полученные в соответствии с изложенной методикой, приведены в таблице и на рис. 2, 3, где обозначено: $v = \varepsilon\tau$; $A_1 = \max |y_1| / y_{1,ст}$.

Максимальные амплитуды колебаний A_1 одномассовой системы без гасителя

Блок	ε	γ_1							
		0,01	0,025	0,05	0,075	0,10	0,15	0,20	0,25
I	0,0005	45,72	30,22	17,79	13,18	9,89	6,64	4,99	3,99
	0,001	35,47	25,76	16,40	12,73	9,65	6,57	4,96	3,98
	0,002	26,93	21,12	14,53	11,63	9,17	6,42	4,90	3,95
	0,004	20,03	16,98	12,35	10,39	8,44	6,16	4,76	3,88
	0,006	17,03	14,47	11,02	9,53	7,89	5,87	4,63	3,81
	0,008	14,65	12,87	10,07	8,88	7,45	5,66	4,52	3,77
II	0,01	12,28	11,72	9,38	8,36	7,09	5,47	4,41	3,67
	0,02	9,64	8,81	7,21	6,77	5,94	4,79	3,98	3,39
	0,03	8,16	7,56	6,37	5,93	5,23	4,35	3,69	3,19
	0,05	6,63	6,22	5,35	5,08	4,53	3,77	3,28	2,89
III	0,10	4,42	4,24	3,77	3,68	3,37	2,93	2,62	2,39
	0,15	4,26	4,07	3,59	3,49	3,17	2,80	2,53	2,31
	0,20	3,95	3,82	3,44	3,40	3,15	2,78	2,48	2,23
	0,25	3,46	3,33	2,98	2,92	2,69	2,47	2,28	2,11
	0,30	3,06	3,00	2,76	2,78	2,63	2,41	2,22	2,05

Данные таблицы иллюстрируют совместное влияние демпфирования и скорости прохождения системы через резонанс на уровень максимальных амплитуд колебаний. В таблице выделены три блока, каждый из которых условно определяет режим прохождения системы через резонанс: I — медленное прохождение через резонанс ($\varepsilon \leq 0,01$); II — средний уровень возрастания частоты ($0,01 \leq \varepsilon \leq 0,1$); III — быстрое прохождение системы через резонанс ($0,1 \leq \varepsilon \leq 0,3$). Как следует из таблицы, увеличение параметра ε , характеризующего скорость прохождения через резонанс, сопоставимо по своему влиянию с увеличением демпфирования в виброизолированной конструкции γ_1 .

Графики $A_1(v)$ на рис. 2, а получены для виброизолированной конструкции без гасителя колебаний в режиме медленного прохождения сис-

темы через резонанс при $\varepsilon = 0,002: 1 - \gamma_1 = 0,0; 2 - \gamma_1 = 0,01$. Кривая 1 соответствует системе без затухания и в зарезонансной области по очертанию близка к амплитудной кривой системы с одной степенью свободы при мгновенном приложении некоторой силы. Анализ кривой 2 показывает, что даже при незначительном демпфировании в связях амплитуды колебаний в зарезонансной области быстро затухают.

На рис. 2, б для той же расчетной ситуации приведены амплитудные кривые колебаний виброизолированной конструкции (главной массы m_1) при использовании одномассового (кривая 1), двухмассового (кривая 2) и трехмассового (кривая 3) гасителей ($\gamma_1 = 0,01; \varepsilon = 0,002$): $1 - \mu = 0,05$;

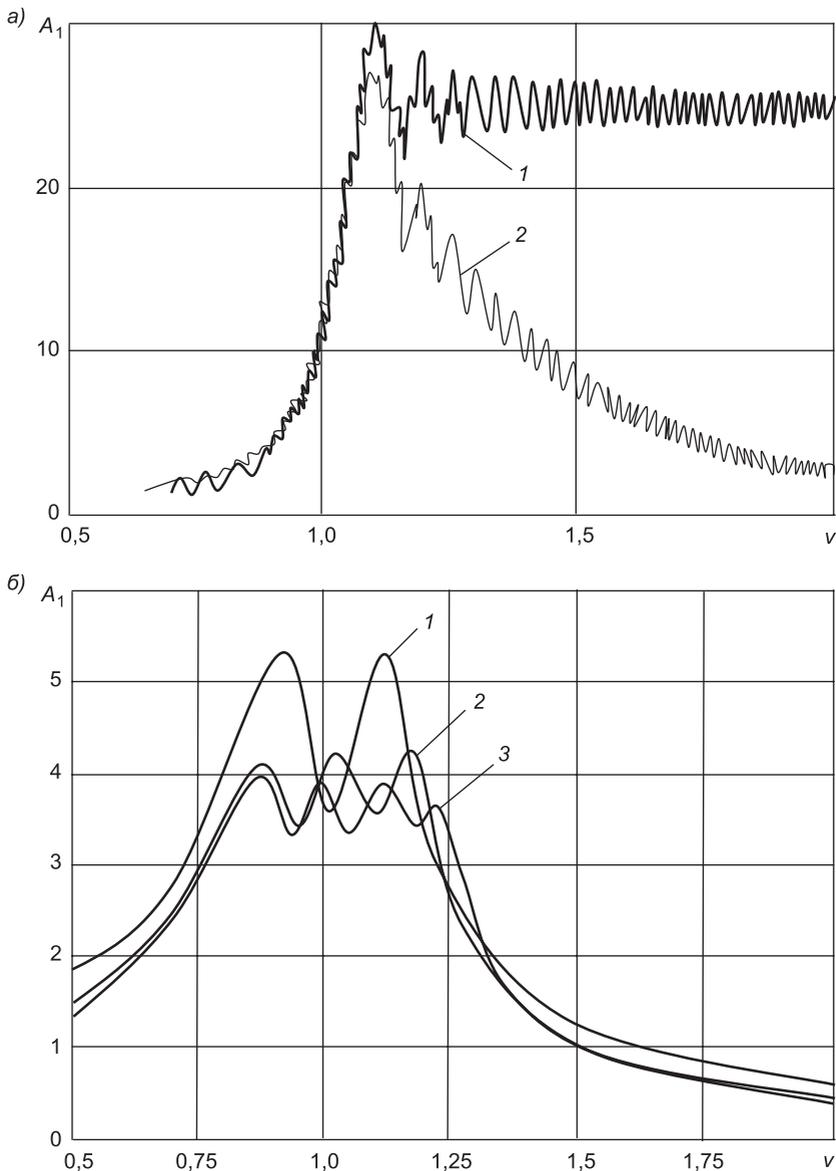


Рис. 2. Амплитудные кривые колебаний виброизолированной конструкции при медленном прохождении через резонанс ($\varepsilon = 0,002$): а — при отсутствии гасителей; б — при наличии оптимально настроенных гасителей

$f_2 = 0,9033$; $\gamma_2 = 0,287$; 2 — $\mu_2 = \mu_3 = 0,05$; $f_2 = 0,963$; $f_3 = 0,870$; $\gamma_2 = 0,12$; $\gamma_3 = 0,305$; 3 — $\mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0,05$; $f_2 = 0,98$; $f_3 = 0,97$; $f_4 = 0,884$; $\gamma_2 = 0,066$; $\gamma_3 = 0,12$; $\gamma_4 = 0,30$. При оптимизации параметров гасителей в качестве начального приближения принимались настроечные параметры, оптимальные для гармонической нагрузки [1] с их корректировкой путем выравнивания и минимизации резонансных максимумов в окрестности резонансной частоты ($\nu = 1$). Графики на рис. 2, б иллюстрируют высо-

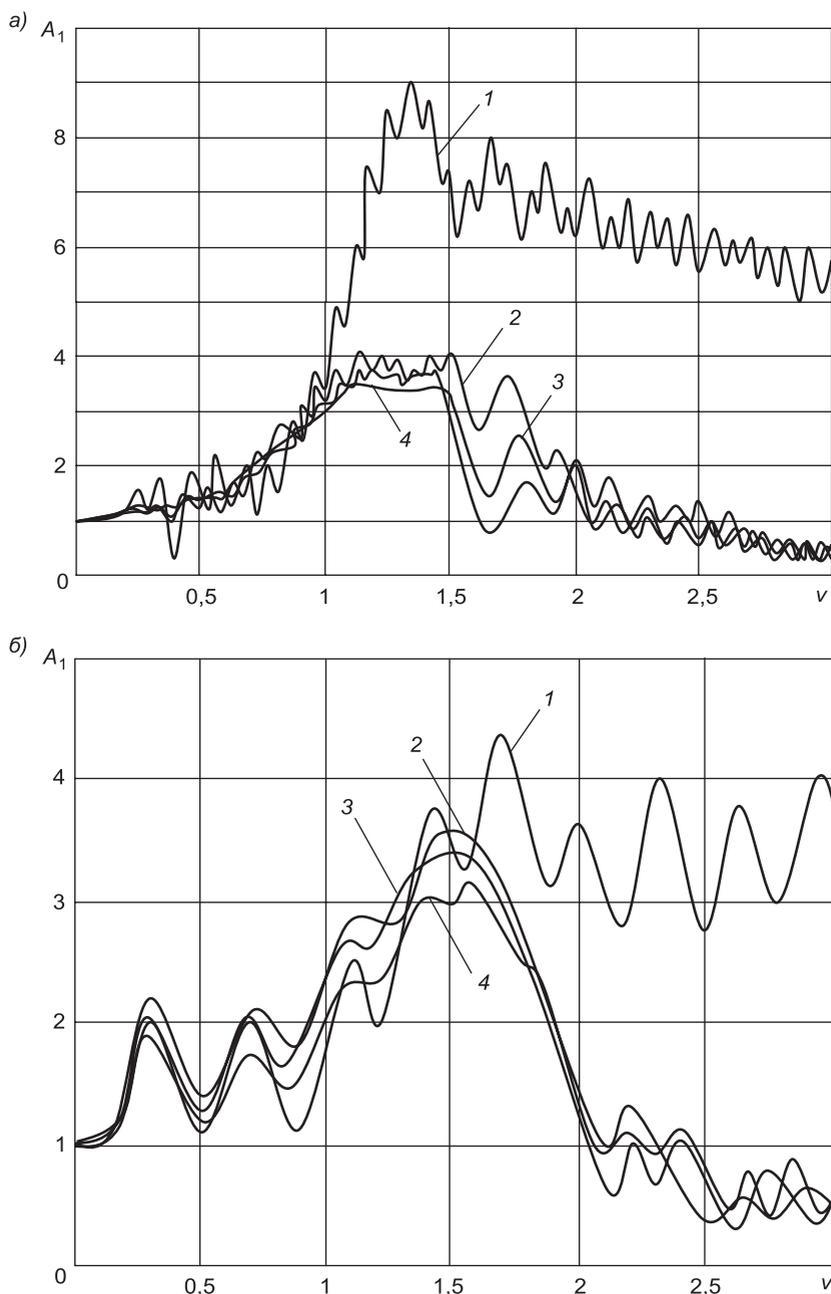


Рис. 3. Амплитудные кривые колебаний главной массы m_1 при средней (а — $\varepsilon = 0,025$) и быстрой (б — $\varepsilon = 0,1$) скоростях прохождения через резонанс

кую эффективность динамических гасителей при медленном прохождении системы через резонанс, причем при одной и той же относительной массе звеньев гасителей максимальную эффективность обеспечивает трехмассовый гаситель колебаний (кривая 3), что доказывает положительное влияние многомассовости на эффективность виброзащиты конструкции при пуско-остановочных режимах.

Амплитудные кривые $A_1(v)$ на рис. 3, а соответствуют среднему уровню частотного ускорения при $\gamma_1 = 0,01$ в системе ($\epsilon = 0,025$): 1 — без гасителя; 2 — с одномассовым гасителем: $\mu_2 = 0,05$; $f_2 = 0,85$; $\gamma_2 = 0,15$; 3 — с двухмассовым ДГК: $\mu_2 = \mu_3 = 0,05$; $f_2 = 0,89$; $f_3 = 0,83$; $\gamma_3 = 0,05$; $\gamma_3 = 0,21$; 4 — с трехмассовым гасителем: $\mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0,05$; $f_2 = 0,89$; $f_3 = 0,83$; $f_4 = 0,87$; $\gamma_2 = 0,05$; $\gamma_3 = 0,21$; $\gamma_4 = 0,31$.

Графики на рис. 3, б получены при быстром прохождении ($\epsilon = 0,1$) через резонанс системы при $\gamma_1 = 0,01$: 1 — без гасителя; 2 — с одномассовым гасителем: $\mu_2 = 0,05$; $f_2 = 0,95$; $\gamma_2 = 0,287$; 3 — с двухмассовым гасителем: $\mu_2 = \mu_3 = 0,05$; $f_2 = 0,95$; $f_3 = 0,983$; $\gamma_2 = 0,057$; $\gamma_3 = 0,25$; 4 — с трехмассовым гасителем: $\mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0,05$; $f_2 = 0,91$; $f_3 = 0,80$; $f_4 = 0,87$; $\gamma_2 = 0,03$; $\gamma_3 = 0,13$; $\gamma_4 = 0,31$.

В режимах среднего и быстрого прохождения виброизолированной конструкции, оборудованной ДГК, через резонанс (рис. 3, а, б) значения коэффициента гашения в резонансной области существенно ниже, чем при медленных пуско-остановочных режимах. В зарезонансной области эффективность применения ДГК очень высока и сопоставима с эффективностью применения специальных демпферов. Кроме того, гасители позволяют исключить появление нежелательных биений, связанных с явлениями срыва резонанса. Таким образом, при быстрых пуско-остановочных процессах ДГК могут быть рекомендованы как оптимально настроенные демпферы, не ухудшающие качество виброизоляции в эксплуатационном режиме.

С теоретической точки зрения быстрое прохождение одномассовой виброизолированной системы через резонанс близко к ситуации, возникающей при кратковременном действии внешней силы в ограниченном интервале времени; в этом случае, как известно [10], коэффициент динамичности $K_d \leq 2$. Максимальному значению $K_d = 2$ соответствует момент времени $t_1 = 0,5T$ (где T — период собственных колебаний виброизолированной конструкции). В случае быстрого пуско-остановочного режима действие внешней нагрузки является «размытым» по времени и узкополосным по частоте (проявляется только в окрестности резонанса), что приводит к изменению границ изменения коэффициента динамичности: $2 \leq K_d \leq 5$. Указанная аналогия подсказывает дополнительные пути решения задач подавления повышенных уровней колебаний при пуско-остановочных режимах: а) применение ударных гасителей, реализующих механизм приложения кратковременных импульсов; б) использование ограничителей, также реализующих импульсивное воздействие; в) приложение в момент прохождения системы через резонанс кратковременного импульса внешней силы, синхронизированного в противофазе с колебания-

ми виброизолированной конструкции, что может быть реализовано только в активных системах виброзащиты. В сочетании с применением ДГК указанные устройства могут быть использованы при разработке комплексных виброзащитных систем повышенной эффективности, используемых при нестационарных воздействиях.

Следует отметить, что максимальную эффективность во всех расчетных ситуациях обеспечивают трехмассовые динамические гасители. Вместе с тем увеличение числа звеньев в каскадном ДГК свыше трех нерационально, так как ведет к большим амплитудам колебаний в звеньях гасителя с малыми массами. Дополнительным фактором повышения эффективности динамических гасителей при быстром прохождении системы через резонанс является увеличение относительной массы звеньев гасителей и демпфирования в виброизолированной конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коренев, Б.Г. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения [Текст] / Б.Г. Коренев, Л.М. Резников. — М. : Наука, 1988. — 304 с.
2. Дукарт, А.В. Об эффективности некоторых типов нелинейных многомассовых динамических гасителей колебаний при прохождении через резонанс [Текст] / А.В. Дукарт, А.И. Олейник // Изв. вузов. Строительство. — 2001. — № 11. — С. 28–36.
3. Коренев, Б.Г. О мерах уменьшения вибраций при прохождении через резонанс во время пуска и остановки оборудования [Текст] / Б.Г. Коренев, Н.А. Пикулев, И.С. Шейнин // Колебания зданий и сооружений. — М. : Госстройиздат, 1963. — С. 74–97.
4. Дукарт, А.В. Оптимальные параметры и эффективность динамического гасителя с частотно-независимым трением в режиме основного импульсного резонанса [Текст] / А.В. Дукарт, Вьет Нгок Фам // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 7. — С. 89–97.
5. Ван-Дао, Н. Нестационарные колебания динамической системы с гасителем [Текст] / Н. Ван-Дао // Известия АН СССР. Механика. — 1965. — № 4. — С. 92–96.
6. Голоскоков, Е.Г. Нестационарные колебания деформируемых систем [Текст] / Е.Г. Голоскоков, А.П. Филиппов. — Киев: Наук. думка, 1977. — 340 с.
7. Люк, Ю. Специальные математические функции и их аппроксимации [Текст] / Ю. Люк. — М. : Мир, 1980. — 608 с.
8. Сорокин, Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем [Текст] / Е.С. Сорокин. — М. : Стройиздат, 1960. — 131 с.
9. Бабаков, И.М. Теория колебаний [Текст] / И.М. Бабаков. — М. : Дрофа, 2004. — 592 с.
10. Пановко, Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара [Текст] / Я.Г. Пановко. — Л. : Политехника, 1990. — 272 с.

ДУКАРТ Адам Вилебальдович, д-р техн. наук, проф.

Московский государственный строительный университет

ОЛЕЙНИК Александр Иванович, д-р техн. наук, доц.

Рудненский индустриальный институт, Казахстан

Получено 11.02.14

Dukart Adam Vilebaldovich, doctor of technical sciences, professor, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Oleinik Alexandr Ivanovich, doctor of technical sciences, assistant professor, Rudnii Industrial Institute, Kazakhstan

ON EFFICIENCY OF DYNAMIC ABSORBERS AT STARTING MODE OF PASSING VIBROISOLATED STRUCTURE THROUGH RESONANCE

The starting mode of passing through resonance of a vibroisolated structure equipped a three-mass dynamic absorber with successive connection of the links, are examined. The vibroisolated structure is simulated with one degree of freedom system. Energy dissipation in all links of the system, consisting of the vibroisolated structure and absorber, is taken into account on the hypothesis of frequency-independent friction by E.S. Sorokin. The motion of the system is determined using an analytical method, based on decomposition on the free vibrations modes of the damped system and utilization of the special functions. The motion of the vibroisolated structure with one-, two- and three-mass absorbers at various speed of passing through resonance is analysed.

Key words: vibroisolated structure, passing through resonance, dynamic absorbers, frequency-independent friction, dynamic quality coefficient.

REFERENCES

1. Korenev, B.G. Dynamic vibration dampers: Theory and engineering applications [Text] / B.G. Korenev, L.M. Reznikov. — Moscow : Science, 1988. — 304 p.
2. Dukart, A.V. On the effectiveness of certain types of nonlinear multimass dynamic vibrations suppressor on resonance passing [Text] / A.V. Dukart, A.I. Oleinik // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2001. — N 11. — P. 28–36.
3. Korenev, B.G. On methods to reduce vibration when passing through resonance at starting and stopping equipment [Text] / B.G. Korenev, N.A. Pikulev, I.S. Sheynin // Vibrations of buildings and structures. — Moscow: Gosstroyizdat, 1963. — P. 74–97.
4. Dukart, A.V. Optimum parameters and efficiency of dynamic damper with frequency-independent friction at main impulse resonance [Text] / A.V. Dukart, Viet Ngoc Pham // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 7. — P. 89–97.
5. Wang Dao, N. Unsteady oscillations of a dynamical system with absorber [Text] / N. Wang Dao // Proceedings of the AN USSR. Mechanics. — 1965. — N 4. — P. 92–96.
6. Goloskokov, E.G. Unsteady oscillations of elastic systems [Text] / E.G. Goloskokov, A.P. Filippov. — Kiev : Naukova Dumka, 1977. — 340 p.
7. Luke, Yu. Mathematical functions and their approximations [Text] / Yu. Luke. — Moscow: World, 1980. — 608 p.
8. Sorokin, E.S. On theory of internal friction under vibrations of elastic system [Text] / E.S. Sorokin. — Moscow : Stroyizdat, 1960. — 131 p.
9. Babakov, I.M. Theory of vibrations [Text] / I.M. Babakov. — Moscow : Drofa, 2004. — 592 p.
10. Panovko, Ya.G. Basics of applied theory of vibrations and impact [Text] / Ya.G. Panovko. — Leningrad : Politekhnik, 1990. — 272 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.001

А.Н. ХАРХАРДИН

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЛОЖЕНИЯ И РАЗБИЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЙ НА ЭЛЕМЕНТЫ ДИСКРЕТНОСТИ ВЕЩЕСТВА

Часть 3^{1, 2}

Приводится вывод уравнений для математических моделей вложения элементов дискретности (атомов) простого вещества типа «кластеры в кластере» в кластеры, нано- и микро-частицы и разбиение (разъединение) образований до критических их размеров.

Ключевые слова: дисперсные материалы, кластеры, нано- и микрочастицы, критический размер.

В данной работе приводится топологическое решение основного вопроса нанотехнологий о критических размерах кластеров, нано- и микро-частиц, практической и физической значимости их свойств в изучении структуры вещества [1]. Последние разработки дискретной топологии [2] в этом направлении раскрывают перспективы дальнейших исследований дискретных систем. Использование их для получения защитных электромагнитных, электропроводящих и гидрофобных покрытий, в разработке неорганических, полимерных и металлических композитов, катализаторов и адсорбентов, вяжущих веществ негидратационного твердения поликонденсационного типа [3], а также в композитах строительного назначения [4] весьма результативно.

Необычные свойства таких материалов обусловлены ненасыщенностью поверхностных атомов в связи с некомпенсированностью их заряда, высокой поверхностной энергией и ее активностью в результате малых размеров частиц. При определении критических размеров частиц, при которых проявляются их необычные свойства, можно исходить из ряда наблюдаемых факторов по критическому состоянию вещества и по изменению топологического состояния дисперсного слоя измельчаемых материалов. В первую очередь это состояние разрыхления слоя микро- и наночастиц при измельчении в результате кулоновского отталкивания и неполное его уплотнение при смачивании, агрегирование, изменение цвета со смещением отраженного света в область ультрафиолета и ряд других визуальных и физических свойств. Критическое состояние вещества характеризуется аналогичными изменениями, а также непрерывной сме-

¹ См.: Хархардин А.Н., Строкова В.В., Кожухова Н.И. Принципы атомной упаковки кластеров и топологические состояния поверхностных слоев безлигандных нано- и микро-частиц. Ч. 1 // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 2. С. 5–10.

² См.: Хархардин А.Н., Строкова В.В., Кожухова Н.И. Вывод уравнений для критических размеров кластеров, нано- и микрочастиц. Ч. 2 // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 3. С. 14–21.

ной областей упорядоченного свободного состояния атомов (квазичастиц) на плотный топологический беспорядок атомов вблизи критической точки до установления однородной свободной упорядоченности.

Из закономерности распределения частиц по размерам при плотной их упаковке вытекают два критических состояния дисперсного слоя и вещества. Математическое выражение этой закономерности имеет вид [2]:

$$d_n / d_1 = \left[\frac{1}{10\eta_1(\sqrt{3}-1)^p} \right]^{mn/3}.$$

Из этой закономерности при $m = 3$, $n = 1$ и $d_n / d_1 = 1$ получим:

$$\eta_1 = \frac{1}{10(\sqrt{3}-1)^p}.$$

Отсюда при $p = 3$ и $p = 0$ средние значения первой и второй критической плотности упаковки элементов дискретности вещества составят: $\eta_{c1} \leq 0,2549$ и $\eta_{c2} \leq 0,1$. Так, инертные и легкие газы при критическом состоянии имеют значения $\eta_{c1} = 0,2201..0,2549(Ne)$ и $\eta_{c2} = 0,1..0,08(He)$. При сухом и мокром способах измельчения минерального сырья соответственно первую (начало агрегирования микрочастиц) и вторую (предельное измельчение в области «золь-гель» перехода) критические плотности упаковки определяют по плотности упаковки монодисперсного сырья с размером частиц в пределах 0,5...1,0 мм:

$\eta_{c1} = \eta_1^{(9..10..10..5)/3}$ — для случайных упаковок при $0,6038 \leq \eta_1 \leq 0,6403..0,6498$;

$\eta_{c1} = \eta_1^{(11,5..12..12,4..15)/3}$ — для регулярных упаковок атомов простых веществ при $\eta_1 \leq 0,6802$; $\eta_1 \leq 0,68834$; $\eta_1 \leq 0,6981$; $\eta_1 \leq 0,7405$.

Так как первая и вторая критические плотности упаковки элементов дискретности вещества определяют основные уровни его дискретности, то для размеров растущих образований можно записать уравнения с учетом размерного (пристеночного) фактора, при котором учитывается влияние плотности упаковки элементов дискретности в их поверхностном слое либо в поверхностных слоях объема дисперсного слоя (в аппарате):

$$D = (60,38\eta_{c1})^m d / \eta_1^{1/9} = (60,38\eta_1^{n'})^m d / \eta_1^{1/9}; \quad (1)$$

$$D = (60,38\eta_{c2})^m d / \eta_1^{1/9} = (60,38\eta_1^{n''})^m d / \eta_1^{1/9}, \quad (2)$$

где $m = 1, 2, (3)$ — кратность ступенчатых вложений элементов дискретности;

d, η_1 — размер и плотность упаковки первичных элементов дискретности вещества (атомов, молекул, нано- или микрочастиц, частиц дисперсных материалов и пр.);

$\eta_s \approx \eta_1^{1/9}$ — поправка, учитывающая увеличение плотности упаковки атомов в поверхности поперечного сечения межатомных слоев;

$m \leq 3$.

Для произвольной (случайной) упаковки элементов дискретности вещества — $\eta_{c1} = \eta_i^{(9..10..10..5)/3}$, $\eta_{c2} = \eta_i^{(13,5..15..16)/3}$, где показатель степени

$9/3 = 3$ указывает на отсутствие пристеночного влияния, а показатель $(9...10...10,5)/3$ определяет первую критическую плотность упаковки частиц при $\eta_1 = 0,6038...0,64029...0,64976$ соответственно.

Для систематических (регулярных) упаковок элементов дискретности вещества $\eta_{c1} = \eta_i^{n'}$, $\eta_{c2} = \eta_i^{n''}$, где показатели степени $n = (11...12...15)/3$ указывают также на первую критическую плотность их упаковки, а показатель степени $n = (18...18,4...19...23)/3$ при $\eta_1 = 0,6802...0,6883...0,6981...0,7405$ — на вторую критическую плотность, отсутствие размерного (пристеночного) влияния определяется показателем степени $n = (9...10)/3$. Из уравнений (1, 2) при $m = 0,1,2,3$, $\eta_1 = 0,7405$ и $d = 0,3$ нм (здесь и далее в отдельных случаях $\eta_s = 1$) получим:

$$D = d, 13,44d, 180d, 2428d = 0,3 \text{ нм}, 4 \text{ нм}, 54 \text{ нм}, 728 \text{ нм};$$

$$D = d, 6d, 36d, 219,5d = 0,3 \text{ нм}, 1,8 \text{ нм}, 10,8 \text{ нм}, 66 \text{ нм}.$$

Элементы дискретности вещества — это объемные образования, которые можно расположить по возрастающему размеру в следующей последовательности: *атом, кластер, наночастица, микрочастица, макрочастица, гигочастица, кристаллический блок, массивное тело*.

Критические размеры элементов дискретности вещества определим при разбиении (разъединении) объемных образований, полученных последовательным многоступенчатым вложением атомов в кластеры, кластеров в наночастицы, наночастиц в микрочастицы и последних в кристаллические образования, т.е. с использованием математической модели типа «кластеры в кластере». Выражения (1), (2) при $m \leq 3$ являются исходными уравнениями для построения моделей данного типа. Из уравнения (1) при $m = 3$, $\eta_1 = 0,7405$, $\eta_s = \eta_1^{1/9} = 1$ и $d = 0,3$ нм получим размер объемного образования в виде трехкратной «свертки»:

$$D = (60,38\eta_{c1})^m d = (60,38 \cdot 0,7405^5)^3 \cdot 0,3 \text{ нм} = 2428 \cdot 0,3 \text{ нм} = 728 \text{ нм}. \quad (3)$$

Для получения критических размеров ($m \leq 3$) растущих новообразований следует определить первую производную из уравнения (1) и разделить на число составляющих ее элементов:

$$D = \frac{3(60,38\eta_i^{n'})^2 \eta_i^k \cdot n'60,38\eta_i^{n'-1} \eta_i^k d / \eta_i^{1/9}}{3n'} = (60,38\eta_i^{n'})^2 \eta_i^k \cdot 60,38\eta_i^{n'-1} \eta_i^k d / \eta_i^{1/9},$$

где $k = 0$ — рост и слияние кластеров, наночастиц в кристаллическую фазу без границы раздела между ними;

$k = 1$ — разъединение кластеров с границей раздела между ними с систематической (регулярной) их укладкой — $\eta_i^k = \eta_i = 0,7405...0,6802$;

$\eta_i^k = \eta_i = 0,64976, 0,6403...0,6038$ — с произвольной по принципу случайной упаковки;

при $k = 0$ $\eta_i^k = 1$, при $k = 1$ $\eta_i^k = \eta_i$; $\eta_{c1} = \eta_i^{n'}$, $\eta_{c2} = \eta_i^{n''}$.

Из этого и последующих выражений при $\eta_i = \eta_1 = 0,7405$, $d = 0,3$ нм, $n' = 5$ и $k = 0 - 1$ для двухступенчатого вложения получим: $D = 984/1020 - 728/753 - 539/557$ нм, тогда как из выражения (1) имеем $D = 728/753$ нм.

Вторая производная из уравнения (1) дает следующие размеры при трехступенчатом вложении элементов дискретности в атомные образования и разбиении (разъединении) образований на наночастицы критических размеров:

$$D = 60,38\eta_1^5 \eta_1^k \cdot 60,38\eta_1^4 \eta_1^k \cdot 60,38\eta_1^3 \eta_1^k d = \quad (4)$$

$$= 13,44 \cdot 18,15 \cdot 24,5\eta_1^k \eta_1^k \eta_1^k \cdot 0,3 \text{ нм} = 1794; 1328; 984; 728 \text{ нм}.$$

Следовательно, при одноразовом разъединении наночастиц до плотности их упаковки $\eta_1 = 0,7405$ в выражении для первой производной и трехкратном их разъединении в выражении для второй производной получаем средний их размер, который определяется исходным выражением (1). При этом критический размер наночастиц ограничен показателем степени $n = 3$ при η_1 в последнем сомножителе, что характерно для отсутствия размерного влияния или поверхностного слоя в них атомов.

Запишем выражение (1) для D в следующем виде:

$$D = \frac{3(60,38\eta_1^{n'})^2 \eta_1^k \cdot n'60,38\eta_i^{n'-1} \eta_i^k d / \eta_1^{1/9}}{3n'60,38\eta_i^{n'-1} \eta_i^k} = (60,38\eta_1^{n'})^2 \eta_1^k d / \eta_1^{1/9}.$$

$$D = \frac{3(60,38\eta_1^{n'})^2 \eta_1^k \cdot n'60,38\eta_i^{n'-1} \eta_i^k d / \eta_1^{1/9}}{3n'60,38\eta_i^k} = (60,38\eta_1^{n'})^2 \eta_1^k \eta_i^{n'-1} d / \eta_1^{1/9}.$$

В этих выражениях имеем одноступенчатое вложение, где из первого из них получают $D = 54,2 - 40$ нм, а из второго $D = 16,3 - 12$ нм. Одноступенчатое вложение может иметь следующий вид:

$$D = \frac{3(60,38\eta_1^{n'})^2 \eta_1^k \cdot n'60,38\eta_i^{n'-1} \eta_i \eta_i^k d / \eta_1^{1/9}}{3n'60,38\eta_i \eta_i^k} = (60,38\eta_1^{n'})^2 \eta_1^k \eta_i^n d / \eta_1^{1/9}.$$

Из этого выражения получим: $D = 12 - 8,9$ нм.

Выражение для непосредственного двухступенчатого вложения как первая производная из основного выражения — двукратной «свертки» для двухступенчатого вложения имеет вид:

$$D = \frac{2(60,38\eta_1^{n'}) \eta_1^k \cdot n'60,38\eta_i^{n'-1} \eta_i^k d / \eta_1^{1/9}}{2n'} =$$

$$= 60,38\eta_1^{n'} \eta_1^k \cdot 60,38\eta_i^{n'-1} \eta_i^k d / \eta_1^{1/9}.$$

Из этого выражения получим: $D = 73,2 - 54,2 - 40,2$ нм, тогда как из основного выражения — двукратной «свертки» для двухступенчатого вложения имеем:

$$D = (60,38\eta_1^{n'})^2 d / \eta_1^{1/9} = 54,2 / 56 \text{ нм}. \quad (5)$$

Вторая производная из основного выражения для двухступенчатого вложения, с ограничением показателя степени при $\eta_1^{n'}$ до величины отсутствия пристеночного влияния $n'-n=3$, т. е. — η_1^3 , имеет вид:

$$\begin{aligned} D &= 60,38\eta_1^{n'-1}\eta_1^k \cdot 60,38\eta_i^{n'-2}\eta_i^k d / \eta_1^{1/9} = \\ &= 60,38 \cdot 07405^4 \eta_1^k \cdot 60,38 \cdot 07405^3 \eta_i^k d / \eta_1^{1/9}. \end{aligned}$$

Из этого выражения получим: $D = 133 - 99 - 73$ нм.

Выражение для одноступенчатого вложения можно получить в виде первой производной из основного выражения для двухступенчатого вложения:

$$D = \frac{2(60,38\eta_1^{n'})\eta_1^k \cdot n'60,38\eta_i^{n'-1}\eta_i^k d / \eta_1^{1/9}}{2n'60,38\eta_i^{n'-1}\eta_i^k} = 60,38\eta_1^{n'}\eta_i^k d / \eta_1^{1/9}.$$

Из этого выражения получим $D = (13,4...10) d = 4 - 3$ нм — критический размер наночастиц, при котором в явном виде проявляются их необычные свойства в связи с большим преимуществом поверхностных атомов в кластерах.

Выражение для размерного фактора, при котором отсутствует влияние поверхностных элементов дискретности вещества на размер их образований и линейный размер объема дисперсного слоя в аппарате, имеет вид одноступенчатого вложения:

$$D \geq 60,38\eta_1^3\eta_i^k d / \eta_1^{1/9}. \quad (6)$$

Из этого выражения при $\eta_1 = 0,7405$ и $d = 0,3$ нм получим критический размер наночастиц для возможной перестройки их структуры $D = 7,35/7,6$ нм, а при $\eta_1 = 0,60$, $\eta_i^k = 1$ и $d = 40 - 1$ мм минимальный линейный размер аппарата с дисперсным материалом для определения его насыпной плотности будет равен $D = 52/55 - 1,3/1,4$ см — без учета коэффициента формы аппарата и зерен зернистого материала. Заменяя показатель степени при η_1 в этом выражении на $n = 0$ при $\eta_1 = 0,7405$, получим наибольший размер наночастиц, при котором проявляются необычные изменения их свойств: $D \leq 18/18,7$ нм.

Одно из выражений для одноступенчатого вложения можно получить в виде первой производной из основного выражения — двукратной «свертки» для двухступенчатого вложения:

$$D = \frac{2(60,38\eta_1^{n'})\eta_1^k \cdot n'60,38\eta_i^{n'-1}\eta_i^k d / \eta_1^{1/9}}{2n'60,38\eta_i^k} = 60,38\eta_1^{n'}\eta_i^{n'-1}\eta_i^k d / \eta_1^{1/9}.$$

Из этого выражения для одноступенчатого вложения имеем двух- и однослойный кластер, так как $D = 1,2/1,25 - 0,9/0,96$ нм.

Выражение для одноступенчатого вложения можно записать также в виде:

$$D = \frac{2(60,38\eta_1^{n'})\eta_1^k \cdot n'60,38\eta_i^{n'-1}\eta_i^k d / \eta_1^{1/9}}{2n'60,38\eta_i^k} = 60,38\eta_1^{n'}\eta_i^{n'-1}\eta_i^k d / \eta_1^{1/9}.$$

Это выражение дает размер однослойного кластера с центральным атомом $D = 0,9/0,96 - 0,66/0,69$ нм. Тогда как из первой производной из основного выражения для одноступенчатого вложения имеем:

$$D = 60,38\eta_1^{n'-1}\eta_1^k d / \eta_1^{1/9}.$$

Отсюда при $\eta_1 = 0,7405$, $\eta_1^k = 1$ и $d = 0,3$ нм получим промежуточный размер ($D = 5,4$ нм) кластера между критическим его размером $D = 4$ нм и размером наночастиц для возможной перестройки их структуры $D = 7,35$ нм.

Аналогичную систему уравнений получают при использовании второй критической плотности упаковки элементов дискретности вещества — $\eta_{c2}^{n''}$.

Полученные выше уравнения можно записать в общем виде:

$$D = (60,38\eta_1^{n'})^{m-1}\eta_1^k \cdot 60,38^k \eta_2^{n'-1}\eta_2^k d / \eta_1^{1/9}; \quad (7)$$

$$D = (60,38\eta_1^{n''})^{m-1}\eta_1^k \cdot 60,38^k \eta_2^{n''-1}\eta_2^k d / \eta_1^{1/9}. \quad (8)$$

Таким образом, с увеличением кратности m ступенчатого вложения атомов в кластеры, кластеров в наночастицы, а наночастиц в микрочастицы и разбиении (разъединении) атомных или кристаллических образований на элементы дискретности критические их размеры возрастают. При этом критический размер, получаемый из уравнения «свертки», входит в ряд критических размеров, получаемых из уравнения ее первой производной при разбиении образований на элементы дискретности вещества. С увеличением кратности разбиения (разъединения) кристаллических образований на элементы дискретности вещества критические их размеры уменьшаются. Так, при $m = 2$ из уравнений (1), (5) при многократном разбиении (разъединении) кристаллических образований ($\eta_1 = 0,7405; \eta_s = 1$) на элементы дискретности вещества можно выделить ряд характерных их критических размеров: 54,2; 40; 29,7; 22; 16,3; 12; 8,9; 6,6; 4,9; 3,6; 2,7; 2; 1,47; 1,1 нм. При $m = 1$ из уравнений (1), (6) можно выделить многократным разбиением образований ряд характерных критических размеров кластеров и наименьший из них при отсутствии размерного фактора: **18(20)**; 13,4(13,9); 9,9(10,3); **7,4(7,6)**; 5,4; 4; 3; 2,2; 1,6; 1,2; 0,9 нм.

Полученные уравнения позволяют определить критические размеры различных по структуре и топологическому состоянию атомных, молекулярных и надмолекулярных образований для соответствующих их свойств по размеру первичных элементов дискретности вещества (атомов, молекул, элементарной кристаллической ячейки, частиц и пр.) и по плотности их упаковки в этих образованиях. По уравнениям (1), (6) определяют при $m = 1$, $n = 0...3$, $\eta_1^k = 1$ наименьший размер образований при отсутствии влияния поверхностных элементов дискретности на изменение свойств вещества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суздаев, И.П. Нанотехнология: физикохимия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст] / И.П. Суздаев. — М. : КомКнига, 2006. — 592 с.

2. Хархардин, А.Н. Структурная топология дисперсных материалов: учеб. пособие [Текст] / А.Н. Хархардин. — Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2011. — 288 с.
3. Череватова, А.В. Минеральные наноструктурированные вяжущие [Текст] / А.В. Череватова, И.В. Жерновский, В.В. Строкова. — Lap Lambert Academic Publishing, 2011. — 170 с.
4. Строкова, В.В. О влиянии размерных параметров полиморфных модификаций кварца на его активность в композиционных вяжущих [Текст] / В.В. Строкова, И.В. Жерновский, Ю.В. Фоменко // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2007. — № 4. — С. 48–49.

ХАРХАРДИН Анатолий Николаевич, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 20.02.14

Kharkhardin Anatoly Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

MATHEMATICAL MODELS OF INTEGRATION AND DESINTEGRATION FOR DISCRETENESS ELEMENTS OF SUBSTANCE

Part 3

The calculation of mathematical models of one-step integration of discreteness elements of substance in crystal and others formations, as well as models of reiterated desintegration of discreteness elements of substance into particles, micro-, nanoparticles and clusters with critical size.

Key words: dispersed materials, clusters, nano- and microparticles, critical size.

REFERENCES

1. Suzdalev, I.P. Nanotechnology: physical chemistry of nanostructures and nanomaterials [Text] / I.P. Suzdalev. — Moscow : KomKniga, 2006. — 592 p.
2. Kharkhardin, A.N. Structural topology of dispersed materials: textbook [Text] / A.N. Kharkhardin. — Belgorod : BSTU, 2011. — 288 p.
3. Cherevatova, A.V. Mineral nanostructured binders [Text] / A.V. Cherevatova, I.V. Zhernovsky, V.V. Strokov. — Lap Lambert Academic Publishing, 2011. — 170 p.
4. Strokov, V.V. About influence of parameters of quartz polymorphous modifications on its reactivity of composite binders [Text] / V.V. Strokov, I.V. Zhernovsky, Yu.V. Fomenko // Bull. BSTU, 2007. — N 4. — P. 48–49.

УДК 691.225:536.21

**В.П. СЕЛЯЕВ, В.А. НЕВЕРОВ, Л.И. КУПРИЯШКИНА, П.В. СЕЛЯЕВ,
М.А. ОКИН****ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
НАПОЛНИТЕЛЕЙ ВАКУУМНЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ
ПАНЕЛЕЙ***

С помощью метода и топологического моделирования предложен комбинированный способ прогнозирования теплопроводности наполнителей вакуумных изоляционных панелей на основе тонкодисперсных минеральных порошков. Установлена зависимость теплопроводности дисперсных микрокремнеземов от уровня наноразмерных неоднородностей частиц.

Ключевые слова: вакуумная изоляционная панель, моделирование, метод лазерной вспышки, структурные неоднородности.

Уникальные свойства зернистых систем послужили причиной исследований теплопроводности различных порошков-теплоизоляторов, применяемых в авиа- и кораблестроении, криогенной технике, строительстве и других областях. Их экологичность, биостойкость, огнестойкость заметно превосходят аналогичные параметры изделий на основе традиционных теплоизоляционных материалов. Теоретические исследования показали [1], что перенос тепла в зернистых системах зависит от структуры и свойств составляющих компонентов, гранулометрического состава, размеров пор и их объемного содержания, структурной организации перколяционных кластеров, пористости дисперсных частиц и наличия неоднородностей наноразмерного уровня, давления газа в поровом пространстве.

Весьма продуктивной оказалась полиструктурная теория композиционных материалов [1], в которой сформулирован принцип формирования «структуры в структуре» в процессе самоорганизации сложной системы. Так, структура первого уровня может ассоциироваться с внутренней структурой дисперсных частиц, пористость которых имеет осредненное значений m_1 и определяется в основном условиями их получения. Взаимодействие между частицами приводит к образованию кластеров, пористость которых m_2 определяется способом упаковки частиц в кластере — образуется структура второго уровня. Структуру третьего уровня формируют кластеры, образующие твердый каркас с пористостью m_3 . Сам каркас и крупные пустоты, пронизывающие его, образуют структуру четвертого уровня с пористостью m_4 . При этом многокомпонентную систему можно последовательно свести к двухкомпонентной, а каждую двухкомпонентную систему одного уровня можно считать подобной системе дру-

* Работа выполнена в рамках НИР № 53/10-12 «Исследование процессов формирования наноструктуры теплоизоляционных материалов на основе минеральных частиц и порошков» и проекта РФФИ 13-08-97178.

© Селяев В.П., Неверов В.А., Куприяшкина Л.И., Селяев П.В., Окин М.А., 2014

того структурного уровня, если выполняется принцип подобия Кирпичева — Гухмана.

Для прогнозирования теплопроводности зернистых систем усовершенствована топологическая модель теплоизоляционного материала, в которой учитывается влияние пористости частиц [1], разработаны программы расчета эффективной теплопроводности с учетом различных факторов, согласно модели, предложенной Г.Н. Дульневым, в том числе влияния давления газа в поровом пространстве дисперсного материала. Для моделирования процесса передачи тепла в гетерогенных системах, поиска материалов, наиболее пригодных для конкретных теплоизоляционных изделий, прогнозирования эксплуатационных характеристик, например, вакуумных изоляционных панелей, можно использовать положения теорий подобия.

Под моделированием обычно понимают замену изучения данного процесса (явления) изучением аналогичного процесса (явления) на модели меньшего (большого) масштаба в лабораторных условиях. Системы могут считаться подобными, если они имеют одинаковые критерии подобия и подобные условия однозначности. В качестве критериев подобия для такого типа систем подходят: объемные концентрации твердых частиц и пор — $m_1/m = \text{idem}$, $m_2/m = \text{idem}$; отношение теплопроводности фаз $\lambda_1/\lambda_2 = \text{idem}$ и некоторые другие.

Дифференциальное уравнение теплопроводности для одномерного потока тепла имеет вид:

$$\partial T / \partial t = a \partial^2 T / \partial x^2,$$

где a — коэффициент температуропроводности исследуемой системы. Он пропорционален скорости распространения изотермической поверхности, а величина, обратная температуропроводности, характеризует инерционные свойства тела в отношении распространения температурного поля.

Температуропроводность определяется соотношением:

$$a = \lambda / cr,$$

где λ — эффективная теплопроводность дисперсной системы;

c — ее удельная теплоемкость;

ρ — плотность.

Таким образом, определяющий параметр зернистой системы — эффективная теплопроводность λ — может быть представлен как функция температуропроводности

$$\lambda = car$$

и иметь одно и то же значение в случае различных c и ρ , но при постоянном произведении ($c \cdot \rho$). Если эти два параметра известны — измерены или рассчитаны, то для моделирования теплопередачи через зернистую систему и определения ее теплопроводности достаточно измерить температуропроводность.

Обычно лабораторные измерения теплопроводности проводят на приборах, в основе работы которых лежит метод стационарного теплового

потока согласно ГОСТ 7076–99. Недостатками этого метода и его разновидностей можно считать длительность процесса измерения, трудозатратную процедуру подготовки образцов, большой объем испытуемого материала, сложность измерений малых значений теплопроводности.

Одним из современных методов измерения температуропроводности является метод «лазерной вспышки», реализованный в приборе LFA-427 фирмы HETZSCH. Этот метод не требует длительного времени для установления теплового равновесия, измерение длится несколько секунд, образцы имеют малые размеры и массу ($\sim 10^{-3}$ г), при этом достигается высокая точность измерения температуропроводности. Поэтому дисперсный материал, находящийся в штатном держателе прибора LFA-427 (в виде засыпки необходимой плотности либо твердой «таблетки»), может служить прототипом (моделью), например, сердцевины вакуумной изоляционной панели, согласно принципам теории подобия. Благодаря изменению дисперсности порошка, его плотности, введению специальных добавок и модификаторов возможен целенаправленный поиск оптимальных составов, позволяющих получить заданные параметры теплоизоляционных материалов.

Плотность зернистой системы ρ рассчитывается по массе образца и объему стандартной кюветы прибора для исследования порошков. Объемная доля пор при этом определяется по формуле

$$m = 1 - \rho / \rho_{\text{ч}},$$

где $\rho_{\text{ч}}$ — истинная плотность частиц; объемная доля частиц найдется как $(1 - m)$, т.е. должно выполняться соотношение

$$\rho = \rho_{\text{ч}}(1 - m) + \rho_{\text{п}}m,$$

где $\rho_{\text{п}}$ — плотность вещества порового пространства. Если оно заполнено газом ($\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{г}}$), то

$$\rho_{\text{г}} = pM_{\text{г}} / RT,$$

где p — давление газа в порах;

$M_{\text{г}}$ — молярная масса газа;

R — универсальная газовая постоянная;

T — термодинамическая температура.

Удельная теплоемкость дисперсной системы рассчитывается по формуле

$$c = [c_{\text{ч}}\rho_{\text{ч}}(1 - m) + c_{\text{г}}\rho_{\text{г}}m] / [\rho_{\text{ч}}(1 - m) + \rho_{\text{г}}m].$$

Здесь $c_{\text{ч}}$ — удельная теплоемкость материала частиц, $c_{\text{г}}$ — удельная теплоемкость газа — берутся из таблиц.

Известно, что эффективная теплопроводность дисперсных систем определяется тремя аддитивными составляющими

$$\lambda = \lambda_{\text{к}} + \lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{л}},$$

где $\lambda_{\text{к}}$ — кондукционная (фононная) составляющая;

$\lambda_{\text{м}}$ — молекулярная составляющая;

$\lambda_{\text{л}}$ — лучистая (фотонная) составляющая.

Экспериментально установлено [1], что эффективная теплопроводность материала с сообщающимися порами, заполненными газом, падает с уменьшением давления газа заметно быстрее, чем теплопроводность самого газа:

$$\lambda_m = \lambda_r / (1 + B/H\delta),$$

где λ_r — теплопроводность газа в порах;

$$B = (4\gamma/(\gamma+1))((2-a)/a)\Lambda_0 H_0 [Pr]^{-1},$$

γ — показатель адиабаты;

a — коэффициент аккомодации;

Λ_0 — длина свободного пробега молекул газа при нормальном давлении H_0 ;

$[Pr]$ — критерий подобия Прандтля, равный отношению кинематической вязкости газа к его температуропроводности;

H — давление газа в порах;

δ — характерный размер пор.

Кроме того, расчеты эффективной теплопроводности зернистых систем показали, что при относительно невысоком вакууме ($p \sim 1$ мм рт. ст.) дальнейшее снижение давления оказывает слабое влияние на величину λ и целиком определяется ее кондуктивной и лучистой составляющими. В работе Ю.П. Заричняка установлено, что в мелкозернистых образцах перенос тепла излучением в диапазоне температур 20–300 °С составляет ~1 % по отношению к их эффективной теплопроводности.

В настоящее время в качестве наполнителей сердцевин вакуумных теплоизоляционных панелей широко применяются дисперсные минеральные порошки, в том числе искусственные и природные кремнеземы. Исследования последних лет [1–3] позволяют сформулировать ряд требований, которым должны соответствовать зернистые системы в случае их использования в качестве наполнителя сердцевин вакуумных изоляционных панелей: частицы зернистой системы должны иметь линейные размеры менее 10^{-4} м; пористость дисперсного порошка должна быть ~90 % и поровая структура должна формироваться на разных масштабных уровнях; зернистый материал не должен содержать конденсированную и химически связанную воду, органические примеси; частицы зернистой системы должны быть аморфными и иметь структурные неоднородности нанометрового уровня; частицы должны быть шероховатыми, иметь значительную удельную поверхность, рыхлую структуру, пронизанную системой пор и поровых каналов. Всем этим требованиям в полной мере соответствуют: конденсированный микрокремнезем производства ОАО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк; микрокремнезем белая сажа, производимый ОАО «Сода», г. Стерлитамак; дисперсный микрокремнезем, полученный из природного диатомита Атемарского месторождения (Республика Мордовия) [3]. Порошки имеют близкий гранулометрический и фазовый состав, содержание аморфного диоксида кремния составляет ~90–97 %, идентичные ИК-спектры [4].

В качестве модели сердцевин вакуумной изоляционной панели (ВИП) можно рассматривать дисперсный материал, помещенный в стандартный контейнер держателя образцов прибора LFA-427. Диаметр

испытуемого образца 10 мм, толщина — 0,5 мм. Плотность засыпки — $\rho = 320 \text{ кг/м}^3$. При этом $m = 0,85$, $(1 - m) = 0,15$, $c_{\text{ч}} = 733 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, $\rho_{\text{ч}} = 2200 \text{ кг/м}^3$. Так как измерения температуропроводности проводятся в среде инертного газа (аргон), в качестве параметров взяты $c_{\text{г}} = 520 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ и $\rho_{\text{г}} = 1,78 \text{ кг/м}^3$ при нормальном атмосферном давлении и $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Удельная теплоемкость модельных дисперсных систем при указанных параметрах $c = 732 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$. В табл. 1 приведены измеренные значения температуропроводности a модельных порошков, а также рассчитанные величины их теплопроводности λ при разных значениях давления газа (в мм рт. ст.) в поровом пространстве дисперсных систем.

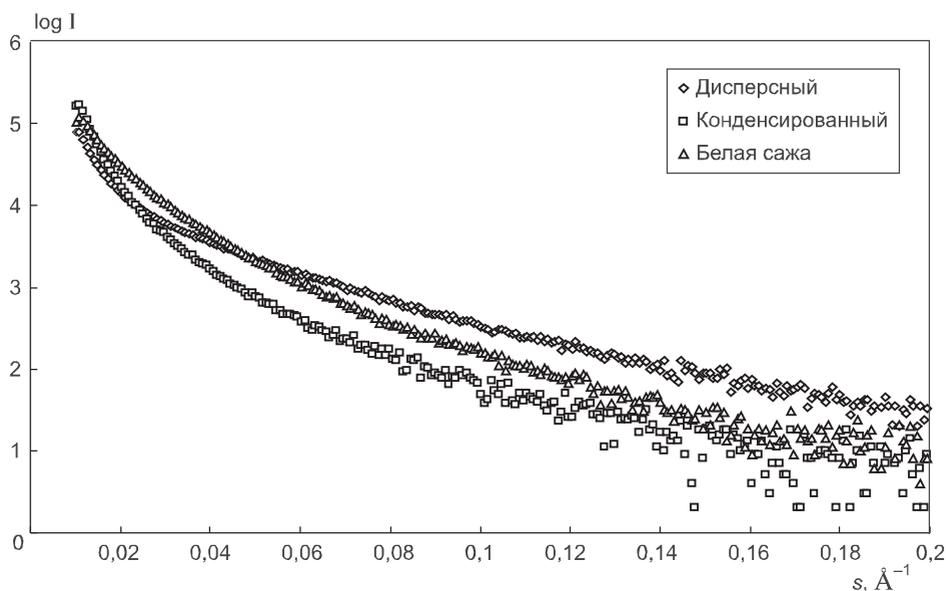
Таблица 1

Микрокремнезем	Теплофизические характеристики						
	$a \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ В/м} \cdot \text{К}$ при Р, мм рт. ст.					
		760	100	10	1	0,5	0,1
Дисперсный	2,24	0,052	0,043	0,033	0,019	0,016	0,013
Конденсированный	2,42	0,057	0,047	0,037	0,023	0,020	0,017
Белая сажа	1,45	0,034	0,027	0,019	0,008	0,005	0,002

Измерения и расчеты дают возможность сравнить теплофизические характеристики, оценить динамику изменений теплопроводности при понижении давления газа в поровом пространстве исследуемых дисперсных материалов. Анализ данных табл. 1 указывает на близость свойств микрокремнеземов дисперсный и конденсированный. Микрокремнезем белая сажа наиболее пригоден для использования в качестве наполнителя вакуумных теплоизоляционных панелей. Его теплопроводность при давлении ~ 1 мм рт. ст. в 2,4–2,9 раза ниже, чем у двух других микрокремнеземов, что, возможно, связано с особенностями структурных характеристик отдельных дисперсных частиц. Для исследования неоднородностей нанометровых масштабов микрокремнеземов, поверхностей их раздела, был использован метод малоуглового рентгеновского рассеяния, который позволяет получить структурную информацию о системах с хаотическим распределением рассеивающих частиц. Кривые рассеяния, полученные на CuK_α -излучении в интервале значений волновых векторов $s = 0,010 - 0,200 \text{ \AA}^{-1}$, представлены на рисунке.

Характер уменьшения интенсивности рассеяния с увеличением s свидетельствует о полидисперсном характере структурных неоднородностей с линейными размерами $\sim 3-90$ нм, что подтверждается отсутствием выраженных максимумов на зависимости $I s^2 - s$.

Анализ экспериментальных кривых малоуглового рентгеновского рассеяния в двойных логарифмических координатах позволил сделать вывод о фрактальном характере неоднородностей частиц аморфного диоксида кремния во всех трех микрокремнеземах. Параметры фракталь-



Индикатрисы малоуглового рентгеновского рассеяния микрокремнеземов

ных образований (массовых фракталов, фрактальных поверхностей раздела частиц, пор, кластеров) приведены в табл. 2.

Неоднородности частиц дисперсного микрокремнезема масштаба $\sim 45\text{--}38$ нм представляют собой массовые фракталы, рыхлые, с фрактальной размерностью $D = 2,86$. Следует отметить, что в интервале значений векторов рассеяния $\Delta s \sim 0,022\text{--}0,052 \text{ \AA}^{-1}$ для неоднородностей размеров $L \sim 29\text{--}12$ нм параметр $\alpha = 2,00$ ($D = 2,00$), что позволяет предположить наличие фрактальных агрегатов в виде плоских, сплюснутых частиц. Структурные неоднородности (первичные частицы диоксида кремния, поры, кластеры) размеров $L \sim 8\text{--}4$ нм обладают изрезанной поверхностью с $D_S = 2,61$.

Таблица 2

Микрокремнезем	$\Delta s, \text{ \AA}^{-1}$	$L, \text{ нм}$	α	D	D_S
Дисперсный	0,014–0,017	45–38	2,86	2,86	—
	0,022–0,052	29–12	2,00	2,00	—
	0,078–0,156	8–4	3,39	—	2,61
Конденсированный	0,011–0,016	54–40	4,00	—	2,00
	0,017–0,126	38–5	3,52	—	2,48
Белая сажа	0,012–0,021	50–30	2,32	2,32	—
	0,021–0,031	30–20	2,70	2,70	—
	0,031–0,042	20–15	3,00	3,00	—
	0,042–0,063	15–10	3,48	—	2,52
	0,063–0,126	10–5	4,00	—	—

Примечания: Δs — диапазон изменений вектора рассеяния; $L = 2\pi/s$ — масштаб рассеивающих неоднородностей; параметр α — определяется углом наклона участка прямой зависимости $\log I(s) - \log s$; $D = \alpha$ — фрактальная размерность массового фрактала; $D_S = 6 - \alpha$ — фрактальная размерность рассеивающей поверхности (границы раздела неоднородностей).

Рассеивающие рентгеновские лучи неоднородности зарегистрированы и в материале конденсированного микрокремнезема: образования с линейными масштабами $\sim 54\text{--}40$ нм характеризуются практически гладкой поверхностью, а неоднородности размеров $\sim 38\text{--}5$ нм имеют фрактальную размерность $D_S = 2,48$. Характер наноразмерных неоднородностей частиц конденсированного микрокремнезема свидетельствует о специфических условиях формирования этого вида аморфного диоксида кремния, происходящего в процессе очистки дымов плавильных печей.

Структурные неоднородности частиц микрокремнезема белая сажа достаточно разнообразны. Кластеры масштаба $\sim 50\text{--}20$ нм представляют собой массовые фракталы, причем фрактальная размерность (для $L \sim 50\text{--}30$ нм) $D = 2,32$ указывает на достаточно плотные агрегаты, а $D = 2,70$ (для линейных размеров $\sim 30\text{--}20$ нм) — на менее плотные объекты. Частицы с размерами $\sim 20\text{--}15$ нм могут считаться массовыми фракталами с предельной фрактальной размерностью. Более мелкие неоднородности с $L \sim 15\text{--}10$ нм имеют фрактальную поверхность ($D_S = 2,52$), а наиболее малоразмерные ($L \sim 10\text{--}5$ нм) — гладкую поверхность (параметр $\alpha = 4$), т.е. для них, вероятно, выполняется закон Порода.

Таким образом, микрокремнезем белая сажа характеризуется наиболее развитой системой неоднородностей нанометровых размеров, способствующих дополнительному рассеянию фононов и уменьшению теплопроводности дисперсного материала. Частицы конденсированного микрокремнезема достаточно однородны, с относительно гладкими поверхностями, вероятно поэтому теплопроводность данного порошка выше, чем у дисперсного микрокремнезема, неоднородности частиц которого — рыхлые массовые фракталы. Данные малоуглового рентгеновского рассеяния коррелируются с измерениями температуропроводности и расчетами эффективной теплопроводности (см. табл. 1).

Выводы. Результаты исследований и расчетов могут оказаться полезными при разработке новых и усовершенствовании известных методик моделирования и прогнозирования процессов теплопередачи в дисперсных зернистых системах, в вакуумных изоляционных панелях, в частности. Подбор подходящего материала — наполнителя сердцевинных таких панелей значительно упрощается при использовании современных методов исследования вещества — метода лазерной вспышки и метода малоуглового рентгеновского рассеяния, которые позволяют при незначительных временных затратах получать информацию о структурных неоднородностях и температуропроводности моделируемых теплоизоляционных изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селяев, В.П. Полиструктурная модель теплоизоляционного материала на основе дисперсного микрокремнезема [Текст] / В.П. Селяев, А.К. Осипов, В.А. Неверов, О.Г. Маштаев, В.В. Сидоров // Региональная архитектура и строительство. — 2012. — № 2. — С. 5–11.
2. Селяев, В.П. Теплоизоляционные свойства материалов на основе тонкодисперсных минеральных порошков [Текст] / В.П. Селяев, А.К. Осипов, В.А. Неверов, Л.И. Куприяшкина, О.Г. Маштаев, В.В. Сидоров // Строит. материалы. — 2013. — № 1. — С. 61–63.

3. Селяев, В.П. Возможность создания теплоизоляционных материалов на основе наноструктурированного микрокремнезема из диатомита [Текст] / В.П. Селяев, А.К. Осипов, Л.И. Куприяшкина, А.А. Седова, Е.Л. Кечуткина, Л.А. Супонина // Наука : 21 век. — 2011. — № 3(15). — С. 76–86.
4. Селяев, В.П. ИК-спектры перспективных теплоизоляционных материалов на основе микрокремнеземов [Текст] / В.П. Селяев, А.К. Осипов, В.А. Неверов, О.Г. Маштаев, В.В. Лошманов // Приволж. науч. журн. — 2012. — № 4. — С. 75–79.

*СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск*
*НЕВЕРОВ Вячеслав Александрович, канд. физ.-мат. наук, доц.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск*
*КУПРИЯШКИНА Людмила Ивановна, канд. техн. наук, проф.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск*
*СЕЛЯЕВ Павел Владимирович, канд. техн. наук, доц.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск*
*ОКИН Максим Александрович, канд. техн. наук, доц.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск*

Получено 11.02.14

Selyaev Vladimir Pavlovich, RAACS academician, doctor of technical sciences, professor, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia
Neverov Vyacheslav Alexandrovich, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia
Kupriyashkina Lyudmila Ivanovna, candidate of technical sciences, professor, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia
Selyaev Pavel Vladimirovich, candidate of technical sciences, assistant professor, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia
Okin Maxim Alexandrovich, candidate of technical sciences, assistant professor, N.P. Ogarev's Mordovian State University, Saransk, Russia

PREDICTION OF HEAT CONDUCTION FILLERS VACUUM INSULATION PANELS

Proposed on the basis of the combined modeling and topological method for predicting thermal conductivity fillers vacuum insulation panels on the basis of fine mineral powders. The dependence of the thermal conductivity of dispersed silica fume on the level of nanoscale inhomogeneities particles.

Key words: vacuum insulation panel, modeling, laser flash method, the structural heterogeneity.

REFERENCES

1. Selyaev, V.P. Polystructural model insulating material based on particulate fume [Text] / V.P. Selyaev, A.K. Osipov, V.A. Neverov, O.G. Mashtaev, V.V. Sidorov // Regional architecture and engineering. — 2012. — N 2. — P. 5–11.
2. Selyaev, V.P. Insulating properties of materials on the basis of fine mineral powders [Text] / V.P. Selyaev, A.K. Osipov, V.A. Neverov, L.I. Kupriyashkina, O.G. Mashtaev, V.V. Sidorov // Building Materials. — 2013. — N 1. — P. 61–63.
3. Selyaev, V.P. Ability to create a heat-insulating materials based on nanostructured silica fume diatomite [Text] / V.P. Selyaev, A.K. Osipov, L.I. Kupriyashkina, A.A. Sedova, E.L. Kechutkina, L.A. Suponina // Science : 21. — 2011. — N 3 (15). — P. 76–86.
4. Selyaev, V.P. IK- spectra promising thermal insulation materials based on silica fume [Text] / V.P. Selyaev, A.K. Osipov, V.A. Neverov, O.G. Mashtaev, V.V. Loshmanov // Privolzhskii scientific journal. — 2012. — N 4. — P. 75–79.

УДК 691.542:539.4

Л.В. ИЛЬИНА, Г.И. БЕРДОВ, Н.О. ГИЧКО, А.Н. ТЕПЛОВ

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И СТРУКТУРЫ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИ ВВЕДЕНИИ КОМПЛЕКСНЫХ ДИСПЕРСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

Исследовано изменение механической прочности цементного камня при введении комплексных минеральных добавок, содержащих дисперсные диопсид и известняк, вводимых в количестве 1–11 % от массы цемента. Установлено значительное повышение прочности цементного камня при введении оптимального количества минеральной добавки.

Ключевые слова: портландцемент, механическая прочность, минеральные добавки, диопсид, известняк, дифференциальный термический анализ.

Дисперсные минеральные наполнители (добавки) широко используются для модификации строительных материалов, изменения в требуемом направлении их технологических и эксплуатационных свойств. Применение таких добавок позволяет в большей мере реализовывать потенциальные возможности цемента. Эффективное использование дисперсных минеральных наполнителей зависит от химического состава и дисперсности как вяжущего, так и вводимой минеральной добавки [1].

Прочность цементного камня определяется свойствами составляющих его компонентов, их количеством и распределением в материале:

- объемной концентрацией и свойствами продуктов гидратации цемента;
- количеством и свойствами непрореагировавших частиц;
- наличием, конфигурацией и размерами пор;
- особенностями и концентрацией наполнителя;
- свойствами контактной зоны «цементный камень — наполнитель».

Действие минеральных добавок обусловлено тем, что они:

- микроармируют образующийся цементный камень;
- вызывают перераспределение механических напряжений между частицами добавки и искусственным камнем; при этом существенно, чтобы модуль упругости материала добавки был выше, чем у искусственного камня;
- воздействуют на процесс гидратационного твердения неорганического цемента [2].

С точки зрения микроармирования цементного камня и перераспределения в нем напряжений при действии внешней нагрузки значительный интерес проявляет такой минерал, как диопсид, имеющий твердость по шкале Мооса, равную 7 [3]. В то же время неоднократно отмечалось, что в тяжелых бетонах прочность сцепления цементного камня с известняком выше, чем с гранитом как наполнителем. Это обуславливает высокую прочность бетона на известняковом щебне [4–6], хотя твердость известняка (3 по шкале Мооса) и его прочность ниже, чем у гранита.

© Ильина Л.В., Бердов Г.И., Гичко Н.О., Теплов А.Н., 2014

В данной работе исследовано влияние дисперсных минеральных добавок (диопсида и известняка), введенных в цемент как отдельно, так и комплексно в различных соотношениях. Использован портландцемент производства ООО «Искитимцемент» (Новосибирская область) марки ПЦ 400 Д-20. Минеральный состав, мас. %: C_3S — 50–55, C_2S — 18–22, C_3A — 7–11, C_4AF — 12–15. Удельная поверхность его составила $320 \text{ м}^2/\text{кг}$. Химический состав цемента, мас. %: SiO_2 — 20,7; Al_2O_3 — 6,9; Fe_2O_3 — 4,6; CaO — 65,4; MgO — 1,3; SO_3 — 0,4; п.п.п. — 0,5.

В качестве минеральных добавок вводились тонкоизмельченные горные породы: диопсид (Буготакское месторождение, Иркутская область) и известняк (г. Искитим, Новосибирская область), являющиеся отходами производства. Их химический состав приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав комплексной добавки

Добавка	Содержание оксидов, мас. %								
	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	п.п.п.
Диопсид	56,1	25,4	15,8	1,0	0,7	0,1	0,1	0,1	0,6
Известняк	0,5	54,7	0,5	0,2	0,1	—	—	—	40,4

Анализ дисперсности добавок проведен методом лазерного гранулометра на приборе PRO-7000 фирмы Seishin Enterprice Co., LTD, Tokyo (рис. 1, табл. 2).

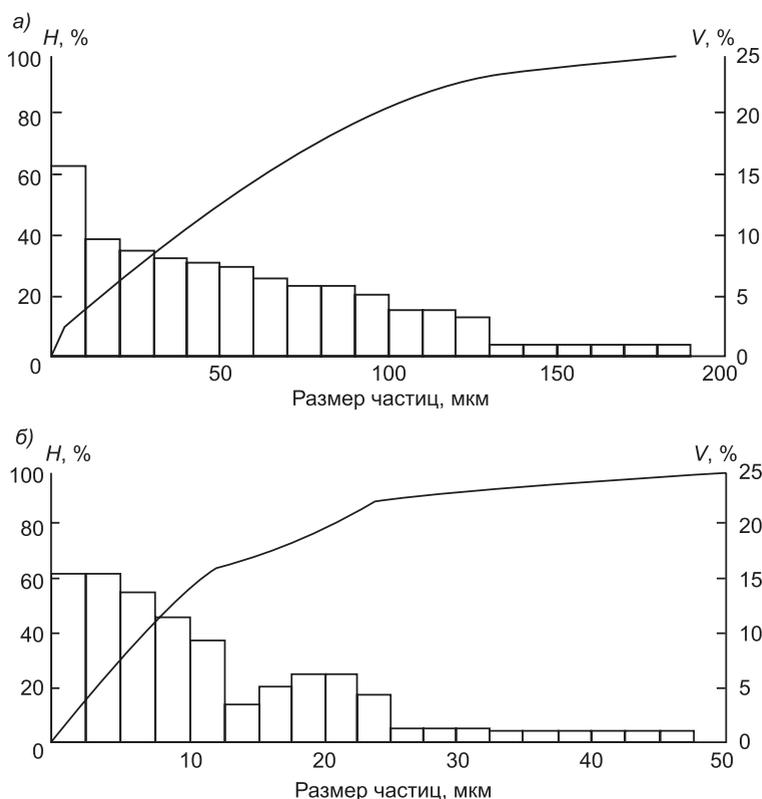


Рис. 1. Распределение размеров частиц: диопсида (а) и известняка (б) по результатам лазерного гранулометрического анализа

Таблица 2. Показатели дисперсности минеральных добавок по результатам лазерного гранулометрического анализа

Показатель	Минеральная добавка	
	диопсид	известняк
Среднеобъемный размер частиц, мкм	49,6	8,7
Удельная поверхность, см ² /см ³	7014	17360
Объемная доля частиц, %, с размерами:		
менее 4 мкм	9,9	25,2
менее 16 мкм	22,0	69,9
менее 32 мкм	35,9	94,3

На рис. 1 отображено: H — объемная доля частиц с размерами менее верхней границы интервала, % (интервальная кривая); V — объемная доля частиц данной фракции, % (гистограмма распределения частиц по размерам).

Таким образом, диопсид, имеющий удельную поверхность 213 м²/кг, был менее дисперсным, чем цемент, а известняк с удельной поверхностью 641 м²/кг обладал значительно большей дисперсностью.

Образцы для определения предела прочности цементного камня имели размеры 20×20×20 мм. Определена прочность образцов после тепловлажностной обработки, а также после 3, 7, 14 и 28 сут твердения при нормальных условиях. При этом изготавливалось несколько серий образцов. Образцы первой серии твердели 1 сут, второй — 3 сут, третьей — 7 сут, четвертой — 28 сут. Образцы после изготовления хранились в течение 24 ± 1 ч в формах в ванне с гидравлическим затвором и далее до испытания в воде при температуре (20 ± 2) °С. Отдельная серия образцов подвергалась тепловлажностной обработке (ТВО) по режиму: 3 ч — подъем температуры до 90 °С, 8 ч — изотермическая выдержка при данной температуре и 3 ч — снижение температуры до 20 °С.

Для определения предела прочности образцов при сжатии использовался пресс с предельной нагрузкой до 500 кН. Средняя скорость нарастания нагрузки при испытании составляла $(2,0 \pm 0,5)$ МПа/с. Для компенсации пространственного отклонения от непараллельности опорных граней образца пресс имел подвижную шаровую опору и был снабжен приспособлением для центрированной установки нажимных пластинок, передающих нагрузку на образец.

Количество вводимых добавок составляло: 1, 3, 5, 7, 9 и 11 % от массы цемента. Наряду с отдельно вводимыми известняком и диопсидом использовались комплексные добавки, содержащие эти компоненты в соотношениях 2:1; 1:1; 1:2 (табл. 3). Прочность образцов цементного камня без добавок составляла: после ТВО — 56,2 МПа, после 28 сут твердения в нормальных условиях — 62,7 МПа.

Анализ результатов показал, что при введении минеральных добавок существенно повышается прочность цементного камня во все сроки его твердения. Наибольшее увеличение прочности достигнуто при введении диопсида в количестве 7 % от массы цемента. Прочность цементного камня, твердевшего 28 сут в нормальных условиях, при этом увеличивается на 38,4 %. При добавлении известняка в количестве 1 % прочность цементного камня увеличивается на 19,3 %. Введение комплексных до-

Таблица 3. Прочность цементного камня (МПа) при различных сочетаниях минеральных добавок

Состав добавки, %		Прочность, МПа					
известняк	диопсид	Содержание добавки, % от массы цемента					
		1	3	5	7	9	11
<i>Твердение в нормальных условиях</i>							
100	0	74,8	73,4	70,9	68,5	64,9	60,2
66,6	33,4	70,8	75,7	74,3	70,8	68,5	63,4
50	50	70,6	77,1	75,0	75,0	75,2	63,7
33,4	66,6	70,8	74,7	79,09	83,8	80,2	72,8
0	100	71,4	75,8	80,1	86,8	81,7	74,6
<i>Твердение при тепловлажностной обработке</i>							
100	0	64,7	64,0	62,2	53,1	52,6	51,5
66,6	33,4	64,8	64,8	63,0	52,7	52,6	52,0
50	50	62,0	65,3	65,5	65,5	60,4	58,3
33,4	66,6	62,5	65,1	67,4	75,3	71,2	67,0
0	100	64,0	67,7	70,8	77,1	71,8	67,5

бавок, состоящих из известняка и диопсида, позволило увеличить прочность цементного камня до 33,7 %.

Во всех случаях четко проявляется оптимальное количество добавки, обеспечивающее максимальное значение прочности цементного камня. При введении комплексной добавки это оптимальное значение смещается в сторону меньшего ее содержания, по сравнению с добавкой диопсида.

Повышение прочности цементного камня, содержащего минеральные добавки, может определяться упрочнением структуры цементного камня, что подтверждается результатами дифференциально-термического анализа (табл. 4).

Дифференциально-термические и термогравиметрические исследования выполнялись на дериватографе DTG60H фирмы «Shimadzu» Япония при скорости нагрева образцов 10 °С/мин.

Исследования проводились на образцах, показавших наибольшее повышение прочности цементного камня. Исследовались образцы, твердевшие в течение 28 сут в нормальных условиях. Некоторые из термограмм представлены на рис. 2.

Таблица 4. Результаты комплексного термического анализа цементного камня, содержащего минеральные добавки

Количество минеральной добавки, мас. %	Содержание компонентов в минеральной добавке, мас. %		1-й эндоэффект		2-й эндоэффект		3-й эндоэффект		Общая потеря массы, %
	известняк	диопсид	T, °C	потеря массы	T, °C	потеря массы	T, °C	потеря массы	
1	1	0	103,82	6,363	473,88	3,347	734,66	3,027	18,60
3	2	1	103,32	6,240	474,57	3,860	741,79	3,217	18,37
3	1,5	1,5	105,15	6,267	481,46	3,010	756,06	2,873	18,44
7	2,3	4,7	106,15	5,920	475,46	3,183	743,07	3,297	18,58
7	0	7,0	107,35	5,337	477,12	3,217	745,49	1,910	18,02

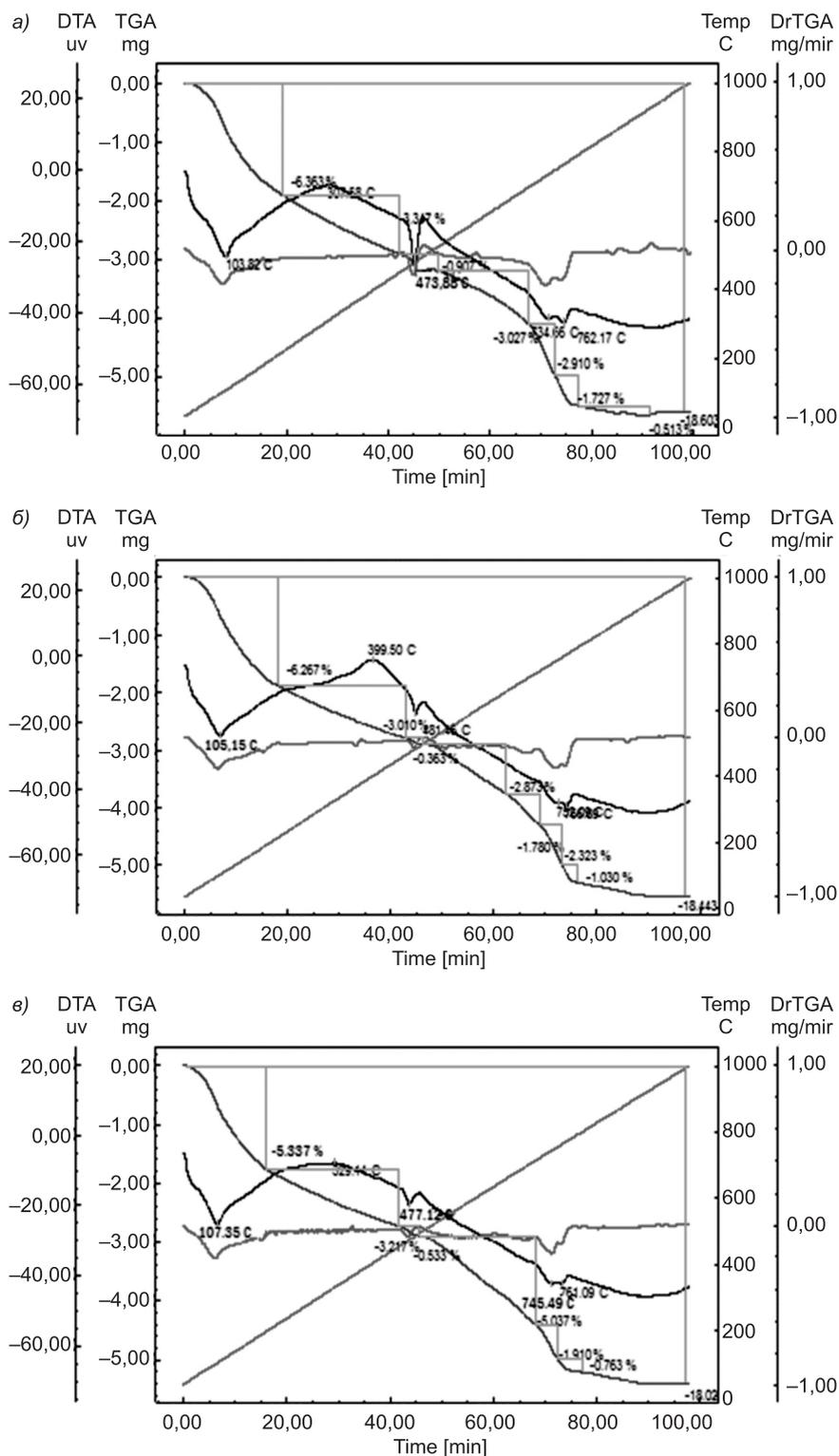


Рис. 2. Кривые комплексного термического анализа цементного камня с добавкой 1 мас. % известняка (а); с 3 мас. % комплексной минеральной добавки, состоящей из диопсида — 1 часть (50,0 мас. %) и известняка — 1 часть (50,0 мас. %) (б); с добавкой 7 мас. % диопсида (в)

Эндоэффекты (рис. 2, табл. 4), по-видимому, соответствуют следующим процессам: при температуре 102–107 °С — разложению гидратных новообразований, при температуре 470–482 °С — разложению портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$, возникшего в процессе гидратации цемента. При температуре около 730–760 °С и выше — разложению карбоната кальция CaCO_3 , как первичного (в составе известняковой муки), так и вторичного, возникшего, возможно, при взаимодействии CaO , выделившегося из $\text{Ca}(\text{OH})_2$, с CO_2 в ходе измерений.

Полученные результаты показывают, что наибольшее упрочнение структуры проявляется при введении диопсида, более глубокая гидратация цемента — при введении известняковой муки. Этому соответствует наибольшая потеря массы в области первого эндоэффекта, соответствующая разложению гидратных новообразований.

В области второго эндоэффекта температура и потеря массы во всех случаях близки между собой. Наибольший третий эндоэффект получен при введении 3 мас. % комплексной добавки, состоящей из 1 части диопсида и 1 части известняка.

Таким образом, при введении комплексных минеральных добавок на дериватограммах с увеличением содержания в них диопсида фиксируется смещение температур эндоэффектов в область более высоких температур. Это соответствует повышению прочности цементного камня. Более глубокая гидратация цемента, оцениваемая по потерям массы в области первого эндоэффекта и общим потерям при нагреве, наблюдается при введении добавки известняка.

Замена в составе добавки трудно измельчаемого диопсида на 33,4 % известняка обеспечивает то же повышение прочности цементного камня, что и при введении твердого диопсида.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев, Б.В. Бетонведение — фундаментное и прикладное направление [Текст] / Б.В. Гусев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2005. — № 10. — С. 20–21.
2. Кузнецова, Т.В. Бетоны — пути развития [Текст] / Т.В. Кузнецова, Б.Э. Юдович // Цемент и его применение. — 2005. — № 5. — С. 68–69.
3. Бердов, Г.И. Пути совершенствования технологии и свойств строительных материалов [Текст] / Г.И. Бердов, В.Н. Зырянова // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 4. — С. 51–62.
4. Михайлов, Б.В. Влияние качества заполнителей на эффективность использования высокомарочных цемента [Текст] / Б.В. Михайлов, В.Н. Лемехов, В.И. Галактионов // Докл. совещ. по проблемам производства и применения в строительстве высокопрочных цементов. — М., 1968. — С. 108–114.
5. Боженков, П.И. Влияние природы заполнителей на прочность раствора [Текст] / П.И. Боженков, В.И. Ковалерова // Бетон и железобетон. — 1961. — № 3. — С. 20–22.
6. Hou, T.T.C. Tensile Bond Strength between Aggregate and Cement Paste or Mortar [Текст] / T.T.C. Hou, F.O. Slate // J. Amer. Concrete Inst. — 1963. — N 4. — P. 465–485.

*ИЛЬИНА Лилия Владимировна, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

*БЕРДОВ Геннадий Ильич, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

*ГИЧКО Николай Олегович, асп.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

*ТЕПЛОВ Александр Николаевич, студ.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 14.02.14

Iliina Liliya Vladimirovna, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Berdov Gennadiy Ilich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Gichko Nikolay Olegovich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Teplov Alexandr Nikolaevich, student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

CHANGING STRUCTURE AND MECHANICAL STRENGTH PORTLAND CEMENT STONES WHEN INTRODUCING COMPLEX DISPERSIVE MINERAL FILLERS

The change in the mechanical strength of cement when administered complex mineral additives containing particulate limestone and diopside administered in an amount between 1–11% by weight of cement. A significant increase in strength of cement introduction of an optimum amount of mineral supplements.

Key words: portland cement, mechanical strength, mineral supplements itation, diopside, limestone, differential thermal analysis.

REFERENCES

1. Gusev, B.V. Study of concrete — foundation and applied direction [Text] / B.V. Gusev // Building materials, equipment, technologies of XXI century. — 2005. — N 10. — P. 20–21.
2. Kuznetsova, T.V. Concrete — the development [Text] / T.V. Kuznetsova, B.E. Yudovich // Cement and its Applications. — 2005. — N 5. — P. 68–69.
3. Berdov, G.I. Way of perfectum technology and property of building materials [Text] / G.I. Berdov, V.N. Zyryanova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 4. — P. 51–62.
4. Mikhailov, B.V. Impact of Quality for fillers on the effectiveness of high-quality cement-ing [Text] / B.V. Mikhailov, V.N. Lemehov, V.I. Galaktionov // Report of the meeting on the problems of production and use in the construction of high-strength cements. — Moscow, 1968. — P. 108–114.
5. Bozhenov, P.I. Influence of the nature of aggregates on the strength of the solution [Text] / P.I. Bozhenov, V.I. Kovalerova // Concrete and reinforced concrete. — 1961. — N 3. — P. 20–22.
6. Hou, T.T.C. Tensile Bond Strength between Aggregate and Cement Paste or Mortar [Text] / T.T.C. Hou, F.O. Slate // J. Amer. Concrete Inst. — 1963. — N 4. — P. 465–485.

УДК 691-492

А.И. ТРАУТВАИН, В.В. ЯДЫКИНА, А.М. ГРИДЧИН, В.И. ВЕРБКИН

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
В СИСТЕМЕ «ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЯЖУЩЕЕ —
МИНЕРАЛЬНЫЙ НАПОЛНИТЕЛЬ»**

Изложена информация о возможности управления процессами взаимодействия в системе «органическое вяжущее — минеральный наполнитель» за счет механохимической гидрофобизации последнего с целью расширения сырьевой базы при производстве дорожно-строительных композитов из техногенных материалов.

Ключевые слова: минеральный порошок, техногенное сырье, гидрофобизация, асфальтобетон.

Создание новых прочных строительных материалов тесно связано с действием сил когезии и адгезии. Если понятие «когезия» обусловлена химической связью между составляющими тело частицами (атомами, ионами) и межмолекулярным взаимодействием, то «адгезия» (прилипание) — это молекулярное притяжение между поверхностями двух соприкасающихся разнородных твердых или жидких фаз. Адгезия является причиной склеивания двух разных веществ за счет действия физических или химических межмолекулярных сил. Поэтому при разработке прочных композиционных материалов инженеры акцентируют большое внимание на адгезионном взаимодействии в системе различных материалов [1–2].

Принципиальное различие между поверхностными явлениями адгезии и смачивания состоит в том, что смачивание имеет место при наличии трех сопряженных фаз. Большое практическое значение имеет информация о том, что для увеличения смачивания надо увеличить работу адгезии или уменьшить работу когезии (поверхностное натяжение) жидкости, например, введением поверхностно-активных веществ (ПАВ), изменением температуры. Лучше смачивает та жидкость, которая имеет меньшее поверхностное натяжение или работу когезии. Органические жидкости характеризуются низкими поверхностными натяжениями и поэтому смачивают большинство поверхностей разной природы, а вода смачивает только полярные вещества [1].

При производстве большинства дорожно-строительных материалов используется органическое вяжущее (битум) и каменные материалы. При этом вода по отношению к полученной системе является агрессивной средой, в которой пребывают органоминеральные композиты большую часть времени и с которой борются инженеры дорожной отрасли, пытаясь защитить дорожное покрытие.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ № 1950, а также проекта стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова № 2011-ПР-146.

Адгезия в значительной степени определяется природой функциональных групп молекул контактирующих веществ. Например, близкие значения работы адгезии к воде имеют соединения с одинаковыми функциональными группами (в двухфазных системах жидкость — жидкость). Это свидетельствует об ориентировании молекул в поверхностном слое при адгезии. На границе раздела фаз в сторону воды обращены гидрофильные группы, и они почти полностью обеспечивают адгезию к воде. Разность между работой адгезии к воде и работой когезии контактирующей с ней жидкости может служить мерой полярности и гидрофильности последней [3].

Смачивание имеет большое значение для успешного проведения ряда важнейших технологических процессов. Обычно молекулы смачивателей дифильны, что характерно для всякого поверхностно-активного вещества, и адсорбируются на поверхности воды, ориентируясь углеводородными цепями наружу в воздух, благодаря чему на поверхности воды создается как бы пленка углеводорода. Этим и объясняется понижение поверхностного натяжения раствора и повышение смачивающей способности до значений, соответствующих поверхностным натяжениям органических неполярных жидкостей [4].

Однако увеличение долговечности строительных материалов прежде всего связано с защитой от проникновения в строительные материалы воды. Для этой цели, в частности для дорожно-строительных материалов, применяются органические связующие вещества — битумы, дегти, мастики и другие высокомолекулярные углеводороды (смолы), образующие на поверхности материала толстую водонепроницаемую гидроизоляционную пленку, закупоривающую поры. Вышеуказанные высокомолекулярные органические соединения довольно быстро деградируют в атмосферных условиях благодаря малой силе сцепления с минеральными веществами, способности к медленному испарению и недостаточной устойчивости к резким температурным изменениям и воздействию солнечных лучей, кислорода воздуха, воды, химических агрессивных веществ и микроорганизмов [5–7]. Это приводит к разрушению строительного материала, вследствие происходящих при температурных перепадах сильных колебаний давления находящихся в порах водяных паров, воздуха и конденсированной воды, в особенности при ее замерзании.

Тем не менее, строительные материалы можно защищать от вредоносного действия воды при помощи так называемых водоотталкивающих (гидрофобных) покрытий ПАВ. Важно отметить, что гидрофобность — это понятие, отличное от водонепроницаемости и водостойкости, и гидрофобизация не делает строительный материал ни водонепроницаемым, ни водостойким. Однако она обычно повышает водонепроницаемость и водостойкость строительных материалов настолько, что подобная защита от разрушительного и вредоносного действия воды приобретает огромное практическое значение [8].

Поверхностно-активные вещества — вещества, адсорбция которых из жидкости на поверхности раздела с другой фазой (жидкой, твердой или газообразной) приводит к значительному понижению поверхностного натяжения. В наиболее общем и важном с практической точки зрения случае адсорбирующиеся молекулы (ионы) ПАВ имеют дифильное строе-

ние, т. е. состоят из полярной группы и неполярного углеводородного радикала (дифильные молекулы) [8].

Строительная индустрия является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей хозяйства России и зарубежных стран, широко использующей нерудные строительные материалы и, в первую очередь, тонкодисперсные минеральные порошки [9–11].

Один из способов улучшения эксплуатационных характеристик асфальтобетона — применение качественных минеральных порошков. В традиционной технологии используются карбонатные минеральные порошки, получаемые помолом в шаровых трубных мельницах и являющиеся дефицитными во многих регионах страны. Расширить номенклатуру сырья, применяемого в качестве наполнителя для асфальтобетона, позволит использование нетрадиционного минерального материала, в том числе кремнеземсодержащего, например, отходов мокрой магнитной сепарации. Однако сырье зачастую не отвечает нормативным требованиям, что вынуждает использовать различные технологии его модифицирования, которые могли бы повысить показатели готовой продукции.

Отходы мокрой магнитной сепарации (ММС) железистых кварцитов по химико-минералогическому составу близки к слабобудным кварцитам. Породообразующий минерал — кварц (более 60 %), магнетит (до 8 %), роговая обманка, оксиды железа, пирит. Химический состав отходов ММС также отличается повышенным содержанием оксидов железа. Отходы ММС мелкодисперсные. Их нельзя рассматривать как щебень, а лишь как сильножелезистые искусственные пески (модуль крупности значительно меньше), до 25 млн т которых ежегодно складываются в хвостохранилищах.

Модифицирование минеральных порошков влияет на факторы структурообразования асфальтобетона. Существенное усилие структурообразующей роли минерального порошка в асфальтобетоне, а следовательно, и улучшение структурно-механических свойств этого материала могут быть достигнуты в результате физико-химической активации порошка. При этом наибольший эффект может быть получен путем совмещения физико-химической обработки с механическими воздействиями. Такие условия создаются при обработке минерального порошка в процессе разлома. Для получения наибольшего эффекта необходимо использовать для модификации поверхности зерен вещества, позволяющие сблизить молекулярные свойства адсорбционного слоя и среды, которую должен наполнять порошок.

Согласно ГОСТ Р 52129–2003 активированный минеральный порошок представляет собой материал, полученный при помоле горных пород или твердых отходов промышленного производства с добавлением активирующих веществ, при помоле битуминозных пород, в том числе горючих сланцев, причем в качестве активирующих веществ используют рационально подобранную смесь ПАВ или продуктов, содержащих ПАВ, с битумом.

В качестве активирующего вещества возможно использование стеариновой кислоты. По химическим свойствам стеариновая кислота — типичный представитель алифатических карбоновых кислот. Стеариновая кислота входит в состав глицеридов всех животных жиров и расти-

тельных масел, встречается в некоторых видах нефти. Ее присутствие существенно улучшает условия смачивания поверхности частиц битумом и способствует образованию хемоадсорбционных связей на границе раздела фаз.

При получении активированного минерального порошка активирующую смесь необходимо вводить в мельницу одновременно с материалом, подлежащим измельчению. В процессе размолла частицы минерального порошка будут покрываться слоем битума, толщина которого составит лишь десятые, а иногда и сотые доли микрона. Поэтому активированные минеральные порошки должны резко отличаться по своим свойствам и влиянию на качество асфальтобетона от минеральных порошков, не подвергаемых обработке активирующей смесью в процессе размолла [12–13].

Из производителей активированного минерального порошка в РФ остался, в основном, Кикеринский завод в Ленинградской области, который с активатора — второго жирового гудрона — перешел на кубовые остатки СЖК, поставляемые с центральных регионов страны за 1500–2000 км. Доставка химических реагентов, пригодных для активирования минерального сырья, приводит к значительному удорожанию конечной продукции.

Производство активированных минеральных порошков в европейской части практически не представлено. Сложилась практика использования взамен минерального порошка отсевов известняков, отличающихся высокоразвитой системой пор. При этом помимо фильтрации низкомолекулярных компонентов битума имеет место уменьшение толщины битумных пленок вокруг минеральных материалов (как результат увеличения удельной поверхности). В результате взаимодействия битума с пористыми каменными материалами происходит избирательная фильтрация компонентов битума в поры. В связи с этим изменяется компонентный состав битума в адсорбционных слоях и соответственно его свойства в составе асфальтобетона. В результате этих процессов повышается жесткость и хрупкость (в том числе и при действии отрицательных температур) асфальтобетона непосредственно в покрытии. Все это вместе взятое может быть рассмотрено как одна из ряда причин наблюдающегося на автомобильных дорогах Белгородской области преждевременного появления трещин (ненормально частые трещины, появляющиеся в покрытии через 1–2 года после устройства асфальтобетонных слоев), недостаточной коррозионной стойкости и интенсивного старения асфальтобетона в покрытии.

Вышеизложенное доказывает необходимость производства и массового применения в дорожном строительстве минеральных порошков.

Развитие дорожного строительства может быть обеспечено за счет широкого использования в технологии производства минеральных порошков местных дорожно-строительных материалов, вторичного сырья, техногенных продуктов и отходов промышленного производства. Такого рода минеральные материалы зачастую не отвечают требованиям действующих стандартов на традиционно применяемые материалы и в естественном виде представляют собой некондиционное сырье, требующее модификации.

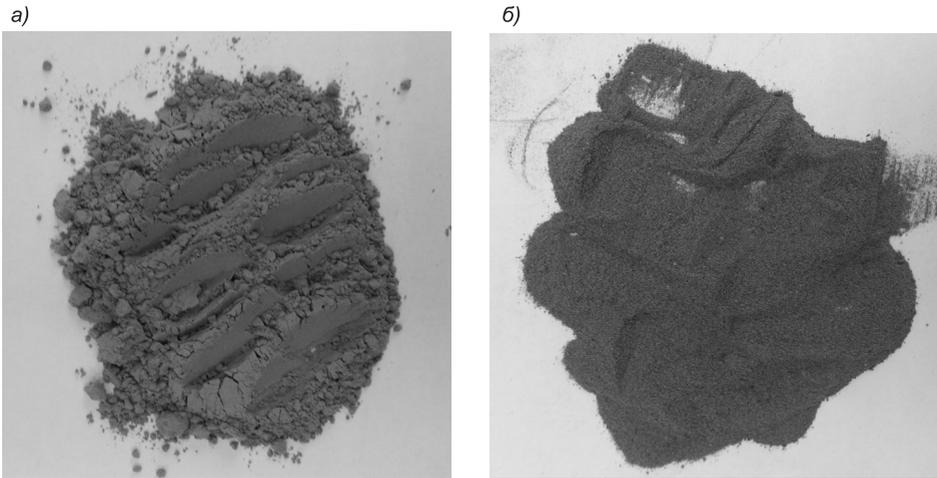


Рис. 1. Состояние поверхности минеральных порошков в неактивированном (а) и активированном (б) состоянии

Состояние поверхности активированного и неактивированного минеральных порошков, полученных путем помола в шаровой планетарной мельнице, показано на рис. 1. Частицы неактивированного порошка агрегируют между собой, образуя комки, в то время как порошок, модифицированный стеариновой кислотой, представляет собой рыхлый наполнитель. При этом стеариновая кислота, являясь ПАВ, адсорбируется на свежей поверхности частиц порошка, образующейся в результате их разрушения с разрывом электрвалентных связей, обволакивает его частицы, тем самым уменьшает силы притяжения (поверхностную энергию) между ними и снижает степень агломерации, или вообще устраняет ее. Это облегчает его транспортирование, хранение и применение. Особое значение указанное свойство приобретает в условиях современной технологии приготовления асфальтобетонных смесей, предусматривающей подачу минерального порошка в мешалки асфальтобетонных машин в холодном виде.

Полученный активированный минеральный порошок обладает свойствами гидрофобного материала и практически не смачивается водой. При этом наблюдается существенное увеличение адгезионной активности битума по отношению к смеси каменных материалов, содержащих в своем составе активированный минеральный порошок (рис. 2).

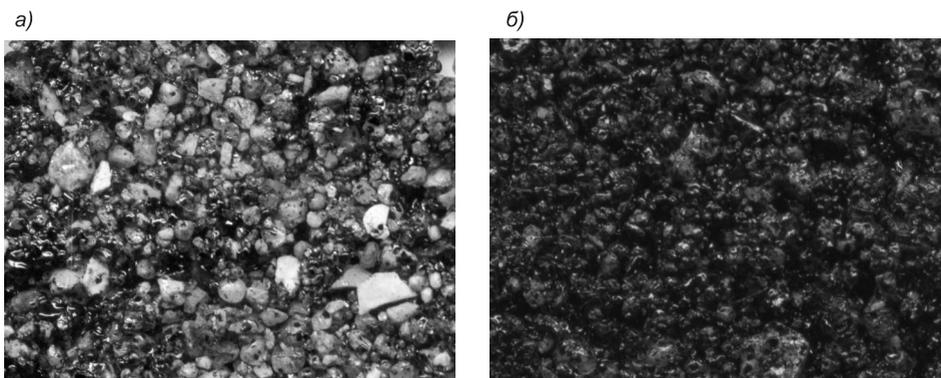


Рис. 2. Изменение сцепления битума марки БНД 60/90 с каменным материалом на неактивированном (а) и активированном (б) наполнителе

Важно отметить, что комплексное использование отходов таких крупномасштабных отраслей промышленности, как горнометаллургический комплекс, в условиях производства является задачей дальнейшего развития человечества, так как после вывоза техногенных материалов в отвалы, на поля фильтрации они становятся источниками пыления и загазованности в рабочей зоне производственных помещений и в атмосфере; проникают в литосферу и гидросферу, вследствие миграции через воздушную и водную среду переносятся на большие расстояния и, таким образом, приводят к ухудшению условий жизнедеятельности и здоровья населения, проживающего на данных территориях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белов, П.А. Теория идеальных адгезионных взаимодействий [Текст] / П.А. Белов, С.А. Лурье // Тезисы докладов Всероссийской конференции, приуроченной к 90-летию со дня рождения академика И.Ф. Образцова «Механика композиционных материалов и конструкций». — М., 2007. — Т. 13, № 4. — С. 519.
2. Фахльман, Б. Химия новых материалов и нанотехнологии [Текст] / Б. Фахльман. — М. : Интеллект, 2011. — 464 с.
3. Артеменко, А.И. Органическая химия [Текст] / А.И. Артеменко. — М. : Высш. шк., 2007. — 560 с.
4. Кругляков, П.М. Физическая и коллоидная химия: практикум [Текст] / П.М. Кругляков, А.В. Нуштаева, Н.Г. Вилкова, Н.В. Кошева. — М. : Лань, 2013. — 208 с.
5. Рыбьев, И.А. Строительное материаловедение: учеб. пособие [Текст] / И.А. Рыбьев. — М. : Высш. шк., 2003. — 700 с.
6. Печеный, Б.Г. Битумы и битумные композиты [Текст] / Б.Г. Печеный. — М. : Химия, 1990. — 256 с.
7. Горелышев, Н.В. Асфальтобетон и другие битумо-минеральные материалы [Текст] / Н.В. Горелышев. — М. : Можайск-Терра, 1995. — 176 с.
8. Ребиндер, П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика [Текст] / П.А. Ребиндер. — М. : Наука, 1979. — 381 с.
9. Ядыкина, В.В. Механоактивация наполнителей для производства дорожного цементобетона [Текст] / В.В. Ядыкина, В.А. Гричаников, Е.А. Лукаш, Р.В. Лесовик // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2005. — № 9. — С. 438–441.
10. Наполнители для полимерных композиционных материалов [Текст] : справ. пособие : пер. с англ. / под ред. П.Г. Бабаевского. — М. : Химия, 1981. — 736 с.
11. Лесовик, Р.В. Структурные возможности повышения качества бетонов для монолитного строительства [Текст] / Р.В. Лесовик, Е.С. Глаголев, А.В. Савин // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2009. — № 4. — С. 39–42.
12. Космин, А.В. Влияние вида и количества активатора в составе активированного минерального порошка на степень его гидрофобности [Текст] / А.В. Космин, Ахмед Синан Садан // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2003. — № 5. — С. 64–68.
13. Рапопорт, П.Б. Технология получения активированных минеральных порошков [Текст] / П.Б. Рапопорт, О.Г. Таскаев, Н.А. Хухрянская, Е.В. Гизатова // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2010. — № 4. — С. 27–31.

*ТРАУТВАЙН Анна Ивановна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: trautvain@bk.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
ЯДЫКИНА Валентина Васильевна, д-р техн. наук, проф.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
ГРИДЧИН Анатолий Митрофанович, д-р техн. наук, проф.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
ВЕРБКИН Валерий Игоревич, асп.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

Получено 28.02.14

Trautvain Anna Ivanovna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: trautvain @bk.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Yadykina Valentina Vasilievna, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Gridchin Anatoly Mitrofanovich, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Verbkin Valery Igorevich, post-graduate student, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

THE MANAGEMENT OF THE PROCESS OF INTERACTION IN THE SYSTEM «ORGANIC BINDER — MINERAL FILLER»

The present work contains information on control processes of interaction in the system «organic binder — mineral filler» by mechano-chemical hydrophobization of the latter with the purpose of expansion of a raw-material base in the production of road-building composites from man-made materials.

Key words: mineral powder, technogenic raw materials, water-repellency, asphalt.

REFERENCES

1. Belov, P.A. Theory of ideal adhesion interactions [Text] / P.A. Belov, S.A. Lourie // Abstracts reports national conference dedicated to the 90-th anniversary of academician I.F. Obraztsova «Mechanics of Composite Materials and Structures». — Moscow, 2007. — Vol. 13, N 4. — P. 519.
2. Fahlman, B. Chemistry of new materials and nanotechnology [Text] / B. Fahlman. — Moscow: Intelligence, 2011. — 464 p.
3. Artyomenko, A.I. Organic chemistry [Text] / A.I. Artyomenko. — Moscow: High School, 2007. — 560 p.
4. Kruglyakov, P.M. Physical and colloid chemistry: Workshop [Text] / P. Kruglyakov, A.V. Nushtaeva, N.G. Vilkova, N.V. Kosheva. — Moscow : Publishing house «Doe», 2013. — 208 p.
5. Rybev, I.A. Construction materials: uch. allowance [Text] / I.A. Rybev. — Moscow : High. School, 2003. — 700 p.
6. Pecheny, B.G. Bitumen and bituminous composites [Text] / B.G. Pecheny. — Moscow : Chemistry, 1990. — 256 p.
7. Gorelyshev, N.V. Asphaltic concrete and other bituminous materials [Text] / N.V. Gorelyshev. — Moscow : Mozhaisk Terra, 1995. — 176 p.
8. Rebinder, P.A. Selected Works. Surface phenomena in disperse systems. Physicochemical Mechanics [Text] / P.A. Rebinder. — Moscow : Science, 1979. — 381 p.
9. Yadykina, V.V. Mehanoativatsiya fillers for manufacturing cement concrete road [Text] / V.V. Yadykina, V.A. Grichanikov, E.A. Lucas, R.V. Lesovik // Bull. of the Belgorod State Technological University. — 2005. — N 9. — P. 438–441.
10. Fillers for polymer composites [Text]: a handbook [In. from English] / ed. P.G. Babaevskii. — Moscow : Chemistry, 1981. — 736 p.
11. Lesovik, R.V. Structural opportunities to improve the quality of concrete for monolithic construction [Text] / R.V. Lesovik, E.S. Glagolev, A.V. Savin // Bull. of the Belgorod State Technological University. — 2009. — N 4. — P. 39–42.
12. Cosmin, A.V. Influence of type and amount of activator in the composition of the activated mineral powder on its degree of hydrophobicity [Text] / A.V. Cosmin, Sinan Sadenov Ahmed // Bull. of the Belgorod State Technological University. — 2003. — N 5. — P. 64–68.
13. Rapoport, P.B. Technology for preparing activated mineral powders [Text] / P.B. Rapoport, O.G. Taskaev, N.A. Khukhrianskii, E.V. Gizatova // Science and technology in the road sector. — 2010. — N 4. — P. 27–31.

УДК 691.3

**Н.А. МАШКИН, Ю.А. ШАРАВИН, Т.Ф. КАТКОВА, Б.П. ВЕЛИЧКО,
В.П. СТУПИН****ТЕХНОЛОГИЯ И СВОЙСТВА ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО
КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА ИЗ ПЫЛЕВАТЫХ СУГЛИНКОВ**

Рассмотрены технология и физико-механические свойства лицевого керамического кирпича из пылеватых суглинков с добавлением в состав керамической массы металлических опилок и стеклобой, а также варианты автоматизации производственного процесса.

Ключевые слова: лицевой кирпич, пылеватые суглинки, металлонаполнитель, стеклобой, технология, физико-механические свойства, автоматизация производства.

Производство и применение керамического кирпича в строительной практике остается важным сегментом архитектурно-строительного комплекса. Сырье для керамического кирпича должно обеспечивать хорошую формуемость, отсутствие деформаций и трещин в процессе сушки, а также достаточную прочность и другие свойства изделий после обжига.

Однако нередко используемые в качестве сырья глины не удовлетворяют необходимым требованиям. Широко распространены глины, представляющие собой пылеватые суглинки, содержащие различные примеси, ухудшающие формующие свойства сырья и качество готовых изделий. Пылеватые суглинки обладают высокой чувствительностью к сушке, что приводит к образованию трещин, увеличению количества брака на предприятиях и снижению качества кирпича. Для получения комплекса заданных свойств керамического кирпича (прочности, морозостойкости, водопоглощения), создания оптимальной структуры кирпича было предложено вводить в состав шихты плавень (стеклобой) и структурирующую добавку (металлические опилки) [1].

В экспериментах в качестве основного использовалось глинистое сырье Клещихинского месторождения, представленное пылеватыми суглинками с низким содержанием крупнозернистых включений. По химическому составу (табл. 1) сырье кислое, с высоким содержанием красящих оксидов и низким содержанием водорастворимых солей.

Для улучшения качества керамического черепка в пылеватые суглинки вводились плавни (стеклобой) 3–6 %, регулирующие спекание глинистого сырья при обжиге, и структурирующие добавки (металлонаполнитель длиной менее 2,5 мм и диаметром 1 мм) 2,5–15 %, изменяющие структуру черепка и повышающие его прочность (табл. 2) [2, 3].

Таблица 1. Химический состав суглинистого сырья, мас. %

Месторождение	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	П.п.п.
Клещихинское	60,58	12,26	4,64	5,93	2,08	3,54	7,74
Болотнинское	61,00	12,54	4,69	5,67	1,84	4,74	7,42

Таблица 2. Свойства керамического кирпича дисперсного армирования

Металло-наполнитель, мас. %	Средняя плотность ρ , кг/м ³	Прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа	Прочность при изгибе $R_{из}$, МПа	Водопоглощение W_m , %	Теплопроводность λ , Вт/м·°С
0,0	1680	11,0	1,6	18,0	0,768
2,5	1720	16,1	2,4	16,4	0,790
5,0	1770	20,5	3,2	15,1	0,817
10,0	1850	24,6	4,9	13,6	0,860
15,0	1930	30,3	6,5	12,4	0,903

По результатам лабораторных исследований разработан технологический процесс производства дисперсно-армированного кирпича полусухого прессования, начиная от добычи глинистого сырья и заканчивая процессом обжига изделий (рис. 1). Выполнена схема автоматизации процесса переработки стеклобоя (рис. 2–5).

Технологический процесс производства кирпича (см. рис. 1). Технологический процесс производства дисперсно-армированного керамического кирпича методом полусухого прессования включает следующие операции: добычу, переработку и хранение глинистого сырья и добавок; доставку и обработку глинистого сырья и добавок; приготовление пресс-порошка; его хранение; полусухое прессование пресс-порошка под давлением 15–20 МПа; сушку и обжиг кирпича-сырца (возможно совмещение сушки и обжига в одном агрегате); приемку, упаковку, складирование и отправку потребителю готового кирпича.

Подготовку пресс-порошков из глин с повышенной влажностью 18–25 % рекомендуется производить с одно- или двухстадийной сушкой и с последующим его измельчением. Глинистое сырье подвергается измельчению (дроблению, помолу, сушке, сортировке, смешиванию с увлажнением и без увлажнения, вылеживанию в бункерах, дозированию и транспортированию). Влажность измельчаемой глины не должна превышать 9–11 %.

В связи с тем, что используемое глинистое сырье — суглинок с низким содержанием глинистых частиц и с высоким содержанием пылеватых, в данной работе выбран измельчительно-сушильный способ подготовки пресс-порошка. Он позволяет улучшить технологические свойства сырья, устранить вредное влияние карбонатов, а вместе с грануляцией пресс-порошка — повысить качество не только сырца, но и обожженного кирпича.

Технологический процесс производства керамического кирпича предусматривает подготовку глинистого сырья с последующим смешением его со стальными опилками и молотым стеклом, прессование изделий, сушку и обжиг. Глинистая порода разрабатывается в карьере и доставляется в глинозапасник. Из глинорыхлителя сырье непрерывно подается ящичным питателем на пластинчатый конвейер.

Ленточный конвейер, над которым установлен железоотделитель, для удаления крупных металлических включений, подает отдозированную глину на первичное дробление и выделение из нее круп-

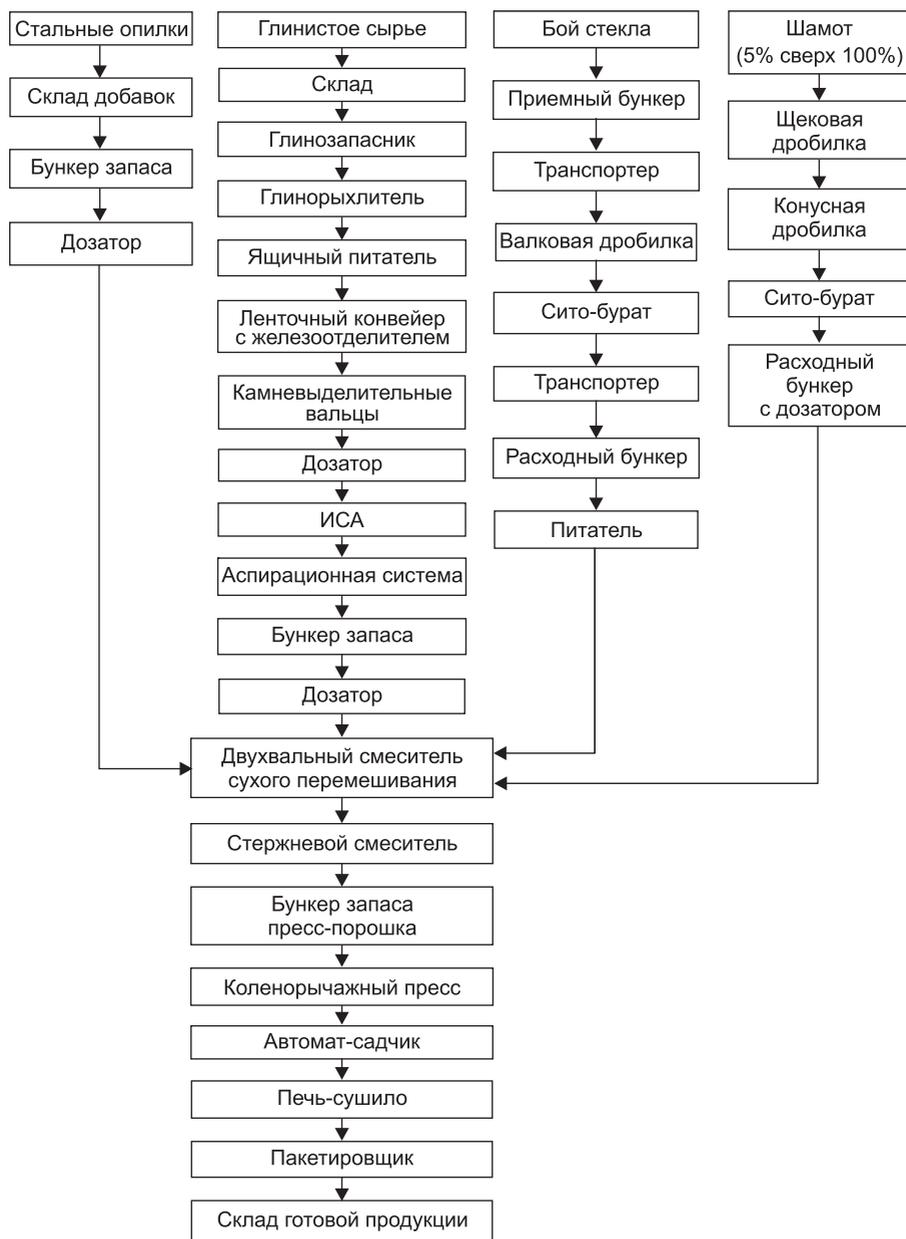


Рис. 1. Технологическая схема производства дисперсно-армированного кирпича по способу полусухого прессования

ных твердых включений на камневыделительные вальцы. При этом способе подготовки глинистого сырья повышается его связность и однородность, что в свою очередь улучшает прочность изделий. Затем сырье, не крупнее 15–20 мм, при помощи шнекового питателя поступает в измельчительно-сушильный агрегат (ИСА), где происходит одновременно тонкий помол до фракции менее 0,3 мм и сушка до влажности 3–7 %. Из ИСА сырье подается на расфракционирование, которое осуществляется на двух ступенях пылеочистки газопылевой смеси.

Предусмотрена возможность введения в шихту шамота. Отбракованный кирпич поступает в бункер, откуда транспортером подается в щековую дробилку для грубого измельчения, шамот поступает в конусную дробилку для тонкого измельчения. Шамот измельчается до крупности зерен 1,5 мм. Дробленый шамот направляется на сито-бурат элеватором для отделения частиц менее 0,3 и крупнее 1,5 мм. Шамот транспортером подается в расходный бункер.

Одновременно с процессом подготовки глинистого сырья и шамота идет подготовка боя стекла. Стекланный бой поступает из бункера запаса в валковую дробилку, где предварительно измельчается до крупности зерен 5 мм. Дробленый отсев поступает на сито-бурат для отделения частиц менее 1,75 мм и более 5 мм (1,25–60 %; 2,5–5–40 %). Отсев подается в приемный бункер, а затем с помощью винтового питателя в количестве 10 % поступает в двухвальный смеситель. Стальные опилки доставляются к бункеру запаса. Из бункера запаса стальные опилки дозируются в двухвальный смеситель.

Подготовленная шихта дозируется в стержневой смеситель, где происходит частичная грануляция. После увлажнения порошок с $W = 7-10\%$ подается ковшовым элеватором в бункер запаса пресс-порошка, а затем в бункер пресса. Прессование происходит на коленорычажных прессах. Садка кирпича-сырца производится автоматом-садчиком на печные вагонетки. Вагонетка подается на электропередаточную тележку. Транспортировка вагонеток обеспечивается гидравлическим толкателем.

Сушка и обжиг сырца производится в туннельной печи-сушиле. Процесс сушки происходит в удлиненной подготовительной зоне и длится 14 ч при температуре 100–150 °С с отходящими из печи газами. Продолжительность обжига 36 ч, максимальная температура обжига 980–1000 °С. Выдержка при максимальной температуре 6 ч. В качестве топлива используется газ.

Процесс охлаждения длится в течение 10 ч с замедлением остывания до 25 °С в час при температуре 1000–550 °С, что связано с полиморфными превращениями кварца. Затем процесс охлаждения возможно ускорить до 125 °С в час. С помощью толкателя вагонетка поступает на передаточную тележку, которая доставляет ее на пост пакетирования, где продукция разбраковывается, кирпич пакетируется и подается на склад готовой продукции автокарой или мостовым краном.

Автоматизация процесса переработки стеклобоя (рис. 2–5). Технологическая линия по переработке стеклобоя (см. рис. 2) состоит из трех, независимых друг от друга, участков.

Первый участок — подача стеклобоя из склада в приемный бункер 2 при помощи винтового конвейера 5, включающегося в работу в зависимости от степени заполнения этого бункера.

Второй участок — дробление, измельчение, просеивание (разделение на фракции 0,3–1,0 мм, 1,0–1,5 мм, 1,5 мм и более) полученного продукта и подача его в расходные бункера 7. Для этого используются стержневая мельница 4, сито-бурат 6 и загрузочный транспортер 8.

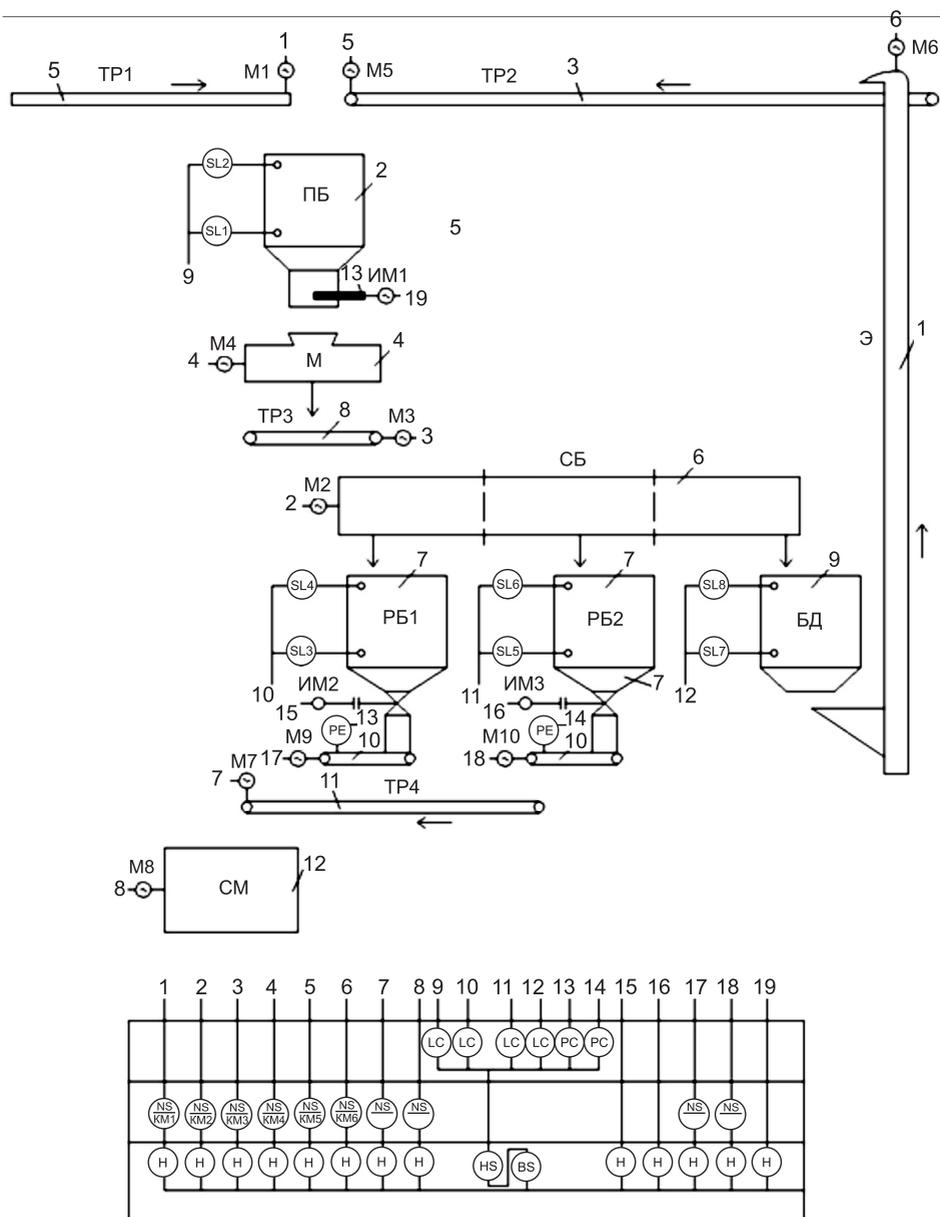


Рис. 2. Функциональная схема автоматизации процесса переработки стеклосбоя
 1 — ковшевой элеватор; 2 — приемный бункер; 3 — транспортер возврата; 4 — стержневая мельница; 5 — винтовой конвейер; 6 — сито-бурат; 7 — расходный бункер; 8, 11 — загрузочный транспортер; 9 — бункер домола; 10 — дозатор непрерывного действия; 12 — глиносмеситель; 13 — выпускной затвор бункера

Третий участок — подача непросяевшегося стекла (крупностью более 1,5 мм) из бункера 9 в приемный бункер для повторного измельчения (домола). Эта операция выполняется при помощи ковшевого элеватора 1 и транспортера возврата 3.

Для последующих технологических операций (дозирования измельченного стекла и подачи его в смеситель 12) используются два весовых дозатора непрерывного действия 10 и загрузочный ленточный транспортер 11.

Процесс переработки боя стекла автоматизирован. Разработана функциональная схема, предусматривающая автоматизацию:

а) управления винтовым и ленточными загрузочными транспортерами, стержневой мельницей, ситом-бурат, элеватором, а также задвижкой приемного бункера и впускными затворами дозаторов;

б) контроля наличия стеклобоя и готового продукта во всех технологических емкостях (приемном бункере, расходных бункерах и бункере домола);

в) дозирования измельченного стекла двух различных фракций и подачи его в глиносмеситель;

г) технологической и аварийной сигнализации работы всех механизмов.

Для реализации данной задачи все технологические емкости оснащены электронными сигнализаторами уровня ЭСУ-4, имеющими два датчика, установленными на верхнем и нижнем уровнях в каждом бункере. Разработанная электрическая схема предусматривает использование этих датчиков для управления механизмами, обеспечивающими необходимую производительность и выполнение данного автоматизированного процесса. Схема работает следующим образом. При опорожнении приемного бункера срабатывает датчик нижнего уровня SL1 (см. рис. 3). Управляющее реле K1, замкнув контакт K1.2, включает катушку магнитного пускателя KM1 электродвигателя загрузочного винтового конвейера (см. рис. 4). Начинается загрузка приемного бункера. При заполнении бункера датчик верхнего уровня SL2, сработав, отключает реле K1, что приводит к остановке конвейера и прекращению загрузки.

Последующие операции по перемалыванию стекла и подаче его в расходные бункера выполняются несколькими механизмами, запуск в работу которых должен осуществляться в определенной последовательности (сито-бурат, загрузочный транспортер, стержневая мельница, выпускной затвор приемного бункера). Включение этих механизмов происходит при нажатии на кнопку SB1 (в начале рабочей смены), а также при замыкании контактов датчиков нижнего уровня SL3 и SL5, установленных в расходных бункерах (во время рабочей смены). При этом промежуточное реле K3 контактом K3.2 запускает шестипрограммное реле времени KT1 (в данной работе используются только четыре программы), которое, замыкая последовательно через 3–5 с контакты KT1.1, KT1.2, KT1.3, KT1.4 (см. рис. 4), включает магнитные пускатели электродвигателей соответственно сита-бурат, загрузочного транспортера, стержневой мельницы, а также открывает выпускной затвор приемного бункера. Начинается процесс измельчения стекла и разделения его на фракции. Прекращается этот процесс, когда заполнится какой-либо расходный бункер. В этом случае сработает датчик верхнего уровня SL4 (или SL6), что приводит к включению другого программного реле времени KT2, которое размыкающими контактами KT2.1, KT2.2, KT2.3 отключит работающие механизмы. Предварительно контактом K4.3 закроется выпускной затвор приемного бункера.

Так как одновременно с заполнением расходных бункеров происходит их опорожнение (подача измельченного стекла в дозаторы непрерывного действия), то заполниться расходные бункера могут лишь при пре-

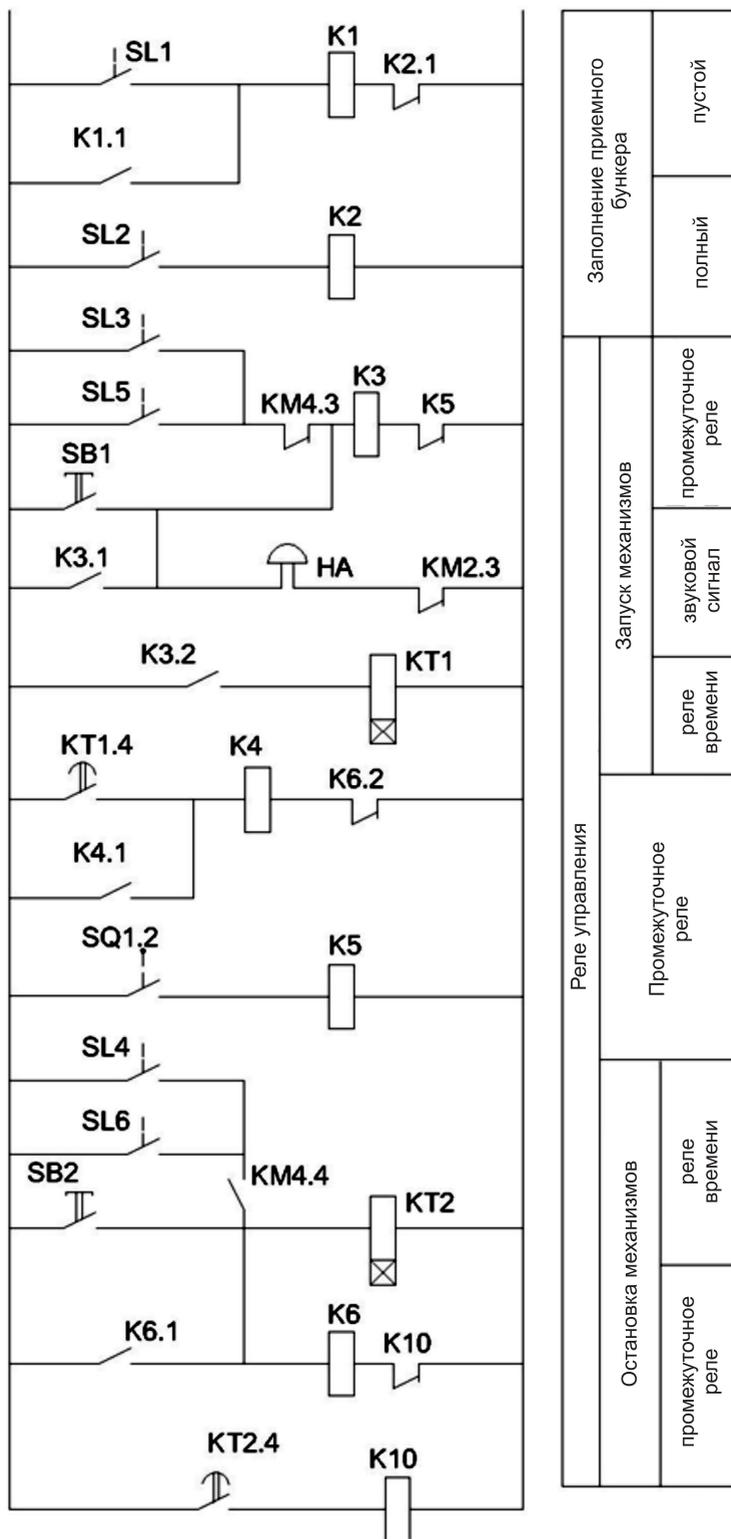


Рис. 3. Электрическая схема релейного блока

SL1–SL6 — датчики уровня в бункерах; K1–K6, K10 — реле управления; SB1–SB2 — кнопки управления; KT1–KT2 — реле времени; SQ1 — конечный выключатель; HA — электрический звонок; KM4.3, KM2.3, KM4.4 — магнитные пускатели; SQ1.2 — конечный выключатель

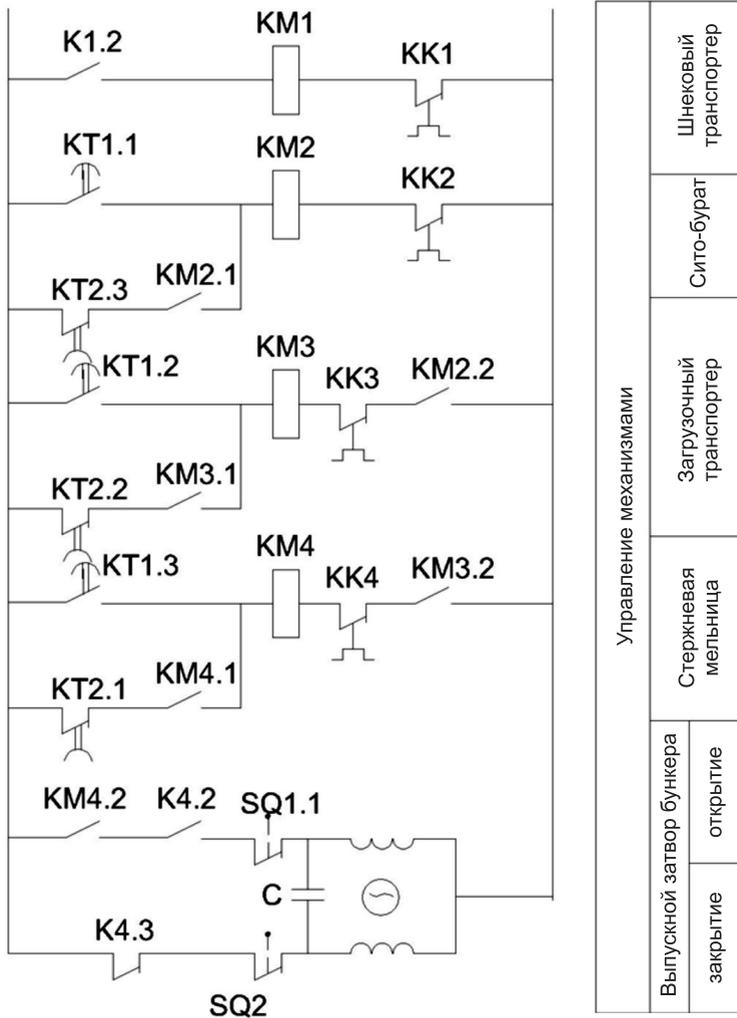


Рис. 4. Электрическая схема управления механизмами переработки стекла

KM1–KM4 — магнитные пускатели; KK1–KK4 — тепловые реле;
SQ1–SQ2 — конечные выключатели

крашении дозирования, т.е. при полной остановке процесса перемешивания глины.

Выгрузка стекла фракции 1,5 мм и более из бункера домола происходит при срабатывании датчика верхнего уровня SL8 (см. рис. 5). Это приводит к включению транспортера возврата и элеватора, которые перемещают некондиционное стекло в приемный бункер для повторной переработки. При опорожнении бункера датчик нижнего уровня SL7, сработав, отключает магнитные пускатели двигателей элеватора и транспортера. Процесс перегрузки прекращается. Для исключения одновременного запуска и остановки элеватора и транспортера (и соответственно для предотвращения завала) в схеме предусмотрены реле времени KT3 и KT4, контакты которых срабатывают с некоторым замедлением (примерно 3 с). Если бункер домола окажется заполненным и его нужно выгружать, а приемный бункер уже полный, то включения элеватора и транспортера возврата не произойдет, так как сработает реле блокировки K9.

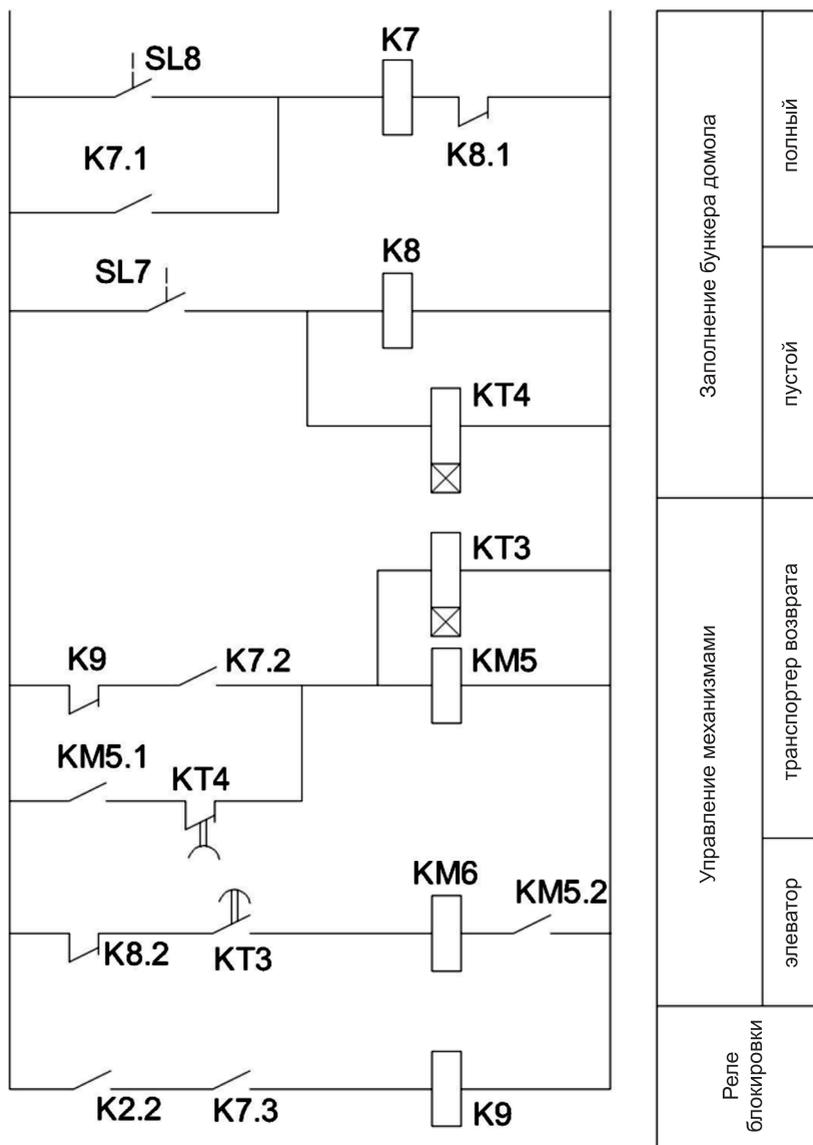


Рис. 5. Электрическая схема управления механизмами возврата стекла на повторную переработку
 K7–K9 — реле управления; KM5–KM6 — магнитные пускатели; KT3–KT4 — реле времени; SL7 — датчик нижнего уровня; SL8 — датчик верхнего уровня

Для контроля за работой механизмов, а также для получения информации о наличии материала в бункерах предусмотрена технологическая световая и звуковая сигнализация. Безаварийная работа механизмов обеспечивается многочисленными блокировками, представленными в электрических схемах, но не оговоренными в тексте. Используемая аппаратура выпускается отечественной промышленностью и может быть рекомендована для реализации данной схемы.

Исследование свойств металлоармированного кирпича. Физико-механические испытания показали, что наиболее прочным и трещиностойким получился кирпич, изготовленный полусухим способом (пре-

дел прочности при сжатии до 30 МПа, водопоглощение 11,7 %). Высокая его прочность после водонасыщения (26,7 МПа) свидетельствует о высокой эксплуатационной долговечности.

Трещиностойкость и механическую прочность керамического кирпича можно связать с различными значениями модулей упругости керамики и стальных опилок в материале. Сталь с высоким модулем упругости ($E > 200$ ГПа) воспринимает на себя основную часть напряжений, возникающих в кирпиче при сушке и обжиге.

Так как ранее было показано [3], что волокна металлонаполнителя прочно врастают в керамическую матрицу, можно рассчитать эквивалентный модуль упругости композиционного материала — керамического кирпича с металлонаполнителем. При надежном сцеплении (без проскальзывания) армирующих волокон металлонаполнителя с керамической матрицей композит представляет собой материал, равномерно армированный по всему объему. При содержании металлонаполнителя 5 мас. % его объемное содержание, с учетом плотности стали 7900 кг/м^3 и плотности керамического черепка 1600 кг/м^3 , будет составлять около 1 % (рис. 6).

Если считать деформации композита линейно-упругими, то эквивалентный модуль упругости рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{экв}} = E_{\text{арм}}v_{\text{арм}} + E_{\text{кер}}v_{\text{кер}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{экв}}$ — эквивалентный модуль упругости композита;

$E_{\text{арм}}$ — модуль упругости арматуры (металлонаполнитель);

$E_{\text{кер}}$ — модуль упругости керамической матрицы;

$v_{\text{арм}} = 0,01$, $v_{\text{кер}} = 0,99$ — объемная концентрация вещества.

Учитывая, что модуль упругости металлонаполнителя (сталь 10) $E_{\text{арм}} = 210$ ГПа, а керамической матрицы $E_{\text{кер}} = 2,02$ ГПа, можно рассчитать эквивалентный модуль упругости композита:

$$E_{\text{экв}} = 210 \cdot 0,01 + 2,02 \cdot 0,99 = 4,1 \text{ ГПа.}$$

Таким образом, эквивалентный модуль упругости композита вдвое превышает модуль упругости керамической матрицы или обычного неармированного кирпича. На практике в результате армирования кирпича 5 мас. % металлонаполнителя (см. табл. 2) его прочность при сжатии с 11,0 МПа возрастает до 20,5 МПа, что подтверждает результаты расчетов. В такой же степени возрастает и прочность при изгибе: с 1,6 до 3,2 Мпа.

Свойства керамического кирпича дисперсного армирования в зависимости от содержания в нем металлонаполнителя представлены в табл. 2.

Кирпичи с металлонаполнителем 2,5–15,0 мас. % выдержали 50 циклов замораживания–оттаивания.

Из табл. 2 и рис. 7 видно, что введение металлонаполнителя уже в количестве 2,5–5,0 мас. % способствует повышению марочности лицевого кирпича со 100 до 150–200 при снижении водопоглощения с 18 до 15 %.

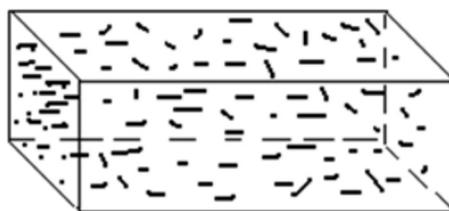


Рис. 6. Модель композита для расчета эквивалентного модуля упругости

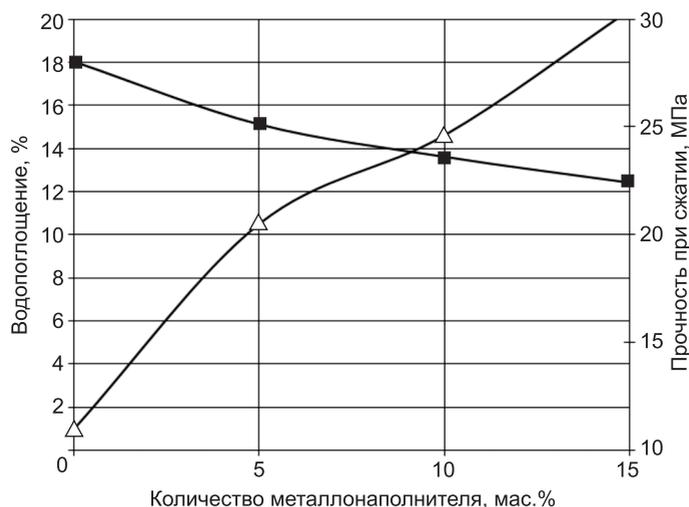


Рис. 7. Зависимость прочности и водопоглощения кирпича от количества металлонаполнителя в шихте

Выводы. Разработана технология производства металлоармированного кирпича с вариантом автоматизации процесса введения стеклобоя. При введении 2,5–10,0 мас. % структурирующей добавки металлонаполнителя марка кирпича со 100 возрастает до 150–200.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. М а ш к и н, Н.А. Дисперсно-армированный керамический кирпич из пылеватых суглинков [Текст] / Н.А. Машкин, И.М. Себелев, Т.Ф. Каткова, Ю.А. Шаравин // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 11. — С. 22–26.
2. Патент РФ № 2307109. Шихта для изготовления армированных керамических изделий [Текст] / Н.А. Машкин, Ю.А. Шаравин, Т.Ф. Каткова, Н.В. Рользинг, С.В. Рользинг. Оpubл. 27.09.2007, Бюл. № 27 (приоритет от 11.07.05).
3. С т е н и н а, Н.Г. Влияние металлонаполнителя на формирование черепка дисперсно-армированного керамического кирпича [Текст] / Н.Г. Стенина, Н.А. Машкин, П.М. Плетнев, Ю.А. Шаравин // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 1. — С. 47–51.

*МАШКИН Николай Алексеевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: mashkin@sibstrin.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

ШАРАВИН Юрий Алексеевич, канд. техн. наук, зам. главы администрации Центрального округа г. Новосибирска

*КАТКОВА Татьяна Федоровна, канд. техн. наук, доц.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*ВЕЛИЧКО Борис Порфирьевич, канд. техн. наук, доц.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*СТУПИН Вячеслав Петрович, канд. техн. наук, доц.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 26.02.14

Mashkin Nikolay Alexeevich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: mashkin@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Sharavin Yury Alexeevich, candidate of technical sciences, Vice Chief of Administration of the Central district, Novosibirsk, Russia

Katkova Tatyana Fedorovna, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Velichko Boris Porfirievich, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Stupin Vyacheslav Petrovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

TECHNOLOGY AND PROPERTIES OF DISPERSIVE-REINFORCED CERAMIC BRICK OF SILTY LOAM

Considered technology and physical and mechanical properties of ceramic bricks of the facial silt loam with the addition of the ceramic mass of metal sawdust and glass fragments, as well as options for the automation of the production process.

Key words: facing bricks, silty loam, metallfilling, window breaker, technology, physical and mechanical properties, automation of production.

REFERENCES

1. Mashkin, N.A. Dispersed-reinforced ceramic brick of silt loam [Text] / N.A. Mashkin, I.M. Sebelev, T.F. Katkova, Yu.A. Sharavin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 11. — P. 22–26.
2. The RF patent N 2307109. The charge for the manufacture of reinforced ceramic products [Text] / N.A. Mashkin, Ya.A. Sharavin, T.F. Katkova, N.V. Rolzing, S.V. Rolzing. Publ. 27.09.2007. Bull. N 27.
3. Stenina, N.G. Influence of the metall reinforcement on the formation of composite ceramic brick [Text] / N.G. Stenina, N.A. Mashkin, P.M. Pletnev, Yu.A. Sharavin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 1. — P. 47–51.

УДК 692.42:666.3/7

Л.Н. ТАЦКИ, Е.В. МАШКИНА

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА НА ОСНОВЕ МЕСТНОГО СЫРЬЯ

Приведены результаты исследований, направленных на улучшение свойств керамического кирпича, получаемого на основе низкокачественного сырья. Подтверждена эффективность активации сырья различными способами в сочетании с корректированием состава шихт добавками направленного действия.

Ключевые слова: низкокачественное глинистое сырье, активация, добавки направленного действия, повышение прочности, снижение водопоглощения.

Дефицит высококачественных глин приводит к необходимости при производстве кирпича использовать в качестве сырьевой базы пылеватые суглинки и даже супеси, умеренно- и среднепластичные, высокочувствительные к сушке, склонные к трещинообразованию и неспекающиеся. Поэтому целью исследований, выполняемых на кафедре строительных материалов и специальных технологий, является разработка технологических решений, способствующих повышению качества керамических стеновых изделий из низкокачественного местного сырья.

Эксперименты выполнялись в следующих направлениях:

1. Введение в шихты корректирующих добавок на основе силикатных и алюмосиликатных горных пород, в том числе в сочетании с пластифицирующими поверхностно-активными веществами.

2. Активация глинистого сырья различными способами (механическим, механотермическими, в сочетании с ударно-волновым).

Использованные в качестве корректирующих добавок горные породы являются силикатами (диопсид) и алюмосиликатами (альбитофир и диабаз) с повышенным содержанием легкоплавких оксидов (R_2O и RO), что предопределяет эффективность их влияния на процесс спекания керамических шихт. Альбитофир и диабаз представляют собой отходы щебеночного производства ОАО «Каменный карьер» (п. Горный, Новосибирская область). Проба диопсидовой породы была подвергнута механотермической активации в измельчительно-сушильной установке (ИСУ) фирмы ООО «Баскей» [1, 2].

Эксперименты выполнялись на основе глинистого сырья Барышевского месторождения, которое предварительно высушивалось и подвергалось помолу в течение 2 ч в шаровой мельнице (механическая активация). Для выявления наиболее эффективной добавки породы вводились в шихты в количестве 10 % по массе сверх 100 %. Влажность пресс-порошка — 12 %. Давление прессования изменялось от 15 до 25 МПа, температура обжига от 950 до 1050 °С, содержание С-3 — от 0 до 0,5 %.

Изменение свойств обожженных образцов корректирующими добавками приведено в табл. 1. Сравнительный анализ результатов показал, что лучшие прочностные показатели имеют образцы из шихт с добавкой

Таблица 1

Порода	Содержание С-3, % по сухой массе	Предел прочности при сжатии, МПа	Водопоглощение, % по массе	Средняя плотность, кг/м ³
Диопсид	0,5	31,0	11,7	1890
	0	30,8	12,9	1870
Альбитофир	—	26,8	13,9	1820
Диабаз	—	28,2	13,5	1830

диоксида. Введение в массу 0,5 % суперпластификатора С-3 дало возможность при практически неизменной прочности снизить водопоглощение с 12,9 до 11,7 %.

Интересные, на наш взгляд, результаты получены из шихт на основе глинистого сырья Бердского месторождения (табл. 2).

Таблица 2

Содержание в шихте, % по массе		Температура обжига, °С	Предел прочности при сжатии, МПа	Водопоглощение, % по массе	Средняя плотность, кг/м ³
Sika-20HE	Диопсид				
—	—	1050	42,7	13,9	1890
0,5	—	1050	42,2	12,8	1920
1,0	—	1050	36,2	14,2	1890
—	10	1000	40,3	12,2	1960

Введение гиперпластификатора Sika-20HE в оптимальной дозировке (0,5 %) позволило снизить водопоглощение без изменения прочности. Использование диоксида даже при понижении температуры обжига на 50 °С привело к существенному снижению водопоглощения, правда с некоторой потерей прочности.

Таким образом, в ряде случаев возможна замена 10 % привозного диоксида на эффективные поверхностно-активные добавки С-3 или Sika-20HE.

Второе направление исследований преследовало цель сравнить различные способы активации глинистого сырья (на примере суглинка Барышевского месторождения). Механотермическая активация осуществлялась на установке ООО «Баскей» ИСУ-10.030П, где была выпущена опытно-промышленная партия активированного суглинка в количестве 172 кг. После активации 69,3 % по массе сырье имело размер частиц 0,1 — 0,06 мм и 23,3 % — менее 0,06 мм [2].

Ударно-волновая активация производилась в роторном аппарате модуляции потоков А. Звездина, куда подавался шликер 50%-й концентрации, полученный из порошка, отобранного из рукавного фильтра ИСУ. Получено 50 л активированного шликера.

Результаты испытаний образцов, изготовленных способом полусухого прессования под давлением 25 МПа и обожженных при температуре 1050 °С, представлены в табл. 3. Максимальные прочностные показатели достигаются при сочетании механотермической и ударно-волновой активации. Однако водопоглощение при этом не снижается.

Таблица 3

Способ активации	Предел прочности при сжатии, МПа	Водопоглощение, % по массе	Средняя плотность, кг/м ³
Без активации	20,8	15,6	1800
Механический	22,4	13,9	1870
Механический с добавкой 10 % диоксида	30,8	12,9	1870
Механический с добавкой 10 % диоксида и 0,5 % С-3	31,3	11,7	1890
Механотермический	28,0	14,5	1860
Механотермический с ударно-волновым	35,6	15,1	1880

Таблица 4

Состав шихты	Формовочная влажность, %	Предел прочности при сжатии, МПа	Водопоглощение, % по массе	Средняя плотность, кг/м ³
Без шликера	23	19,6	14,4	1830
С неактивированным шликером		23,4	14,2	1780
С активированным шликером		26,9	14,2	1810

Для снижения водопоглощения наиболее эффективно введение в массу добавок — плавней, особенно в сочетании с пластифицирующими поверхностно-активными веществами. При полусухом прессовании количество вводимого в шихту активированного шликера ограничивается влажностью пресс-порошка (10–12 %). Может быть рекомендована технология с механотермической активацией сырья в ИСУ, ударно-волновой активацией части порошка, соответствующей формовочной влажности при пластическом способе. Эффективность подобной технологии показана на примере верх-тулинского сырья, являющегося сырьевой базой КЗ «Ли Колор» (табл. 4). Результаты показывают, что ударно-волновая активация позволила повысить предел прочности при сжатии на 37 %. Водопоглощение осталось без изменения.

Таким образом, направленным регулированием свойств сырьевых смесей путем введения эффективных корректирующих добавок и использования новых технологических решений возможно существенно повысить качество керамического кирпича на основе низкокачественных местных глинистых пород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Верещагин, В.И. Диоксидовые породы — универсальное сырье для производства керамических и других силикатных материалов [Текст] / В.И. Верещагин, Ю.И. Алексеев, В.М. Погребенков и др. // Промышленность строительных материалов. Сер. 5. Аналит. обзор. — Вып. 2. — М.: ВНИИЭСМ, 1990. — 60 с.
2. Тацки, Л.Н. Оценка эффективности различных способов активации глинистого сырья [Текст] / Л.Н. Тацки, Е.В. Машкина // Труды НГАСУ. — Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2007. — Т. 10, № 1 (39). — С. 32–38.

ТАЦКИ Людмила Николаевна, канд. техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

*МАШКИНА Екатерина Валерьевна, инж.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 25.02.14

Tatski Lyudmila Nikolaevna, candidate of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Mashkina Ekaterina Valerievna, engineer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

MEANS TO ENCREASE QUALITY OF CERAMIC BRICK ON BASE REGIONAL RAW

Research results on the quality improvement of ceramic brick made district low-grade clays has shown. Raw material activation along with addition of straight action admixtures effectiveness has been confirmed.

Key words: low-grade clay, activation, straight action admixtures, strengthening, watering reduction.

REFERENCES

1. Vereschagin, V.I. Diopsyde — universal raw material for ceramics and other silicates [Text] / V.I. Vereschagin, Yu.I. Alekseev, V.M. Pogrebenkov et al. // Building materials industry. Ser. 5. Analytics. — Vol. 2. — Moscow, 1990. — 60 p.
2. Tatski, L.N. Evaluation on the effectiveness of activation methods for clays [Text] / L.N. Tatski, E.V. Mashkina // NSUACE Writings. — Novosibirsk : NSUACE, 2007. — Vol. 10, N 1 (39). — P. 32–38.

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.131:624.145.4.001.24

В.В. ДЕГТЯРЕВ-мл., Д.И. ЕРШОВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКА НА УСТЬЕВЫХ ВЗМОРЬЯХ БЕСПРИЛИВНЫХ РЕК

Данная статья раскрывает подход к построению и принципы реализации модели для описания гидродинамических характеристик в областях смешения речных и морских вод. В качестве основы решения задачи применяется метод сглаженных частиц.

Ключевые слова: гидродинамика потока, метод сглаженных частиц, численное моделирование, вычислительное программное обеспечение.

На начальном этапе исследований производился поиск и анализ существующих решений и проблем сходной тематики. По итогам его реализации была поставлена более общая задача — численное моделирование гидрофизических процессов в областях смешения речных и морских вод на устьевых взморьях бесприливных рек. Поставленная задача в контексте исследований не допускала автомодельных решений и требовала учета множества разнообразных физических параметров.

Таким образом, к поиску искомого решения предъявлялись следующие обязательные требования:

- 1) постановка задачи в трехмерной форме;
- 2) учет минимального перечня физических факторов;
- 3) относительная простота внедрения в итоговую модель новых факторов;
- 4) приемлемая скорость расчета;
- 5) относительная простота программной реализации;
- 6) максимально прозрачная логика алгоритмов для реализации модели.

Постановка задачи. Следующим этапом решения была формализация задачи. В качестве наиболее оптимальной схематизации решения была принята модель истечения несжимаемой жидкости из бесконечного источника в полуограниченный резервуар (рис. 1). При этом предполагалось, что резервуар был предварительно наполненным жидкостью, в общем случае, имеющей другую плотность. В такой схеме в качестве бесконечного источника жидкости принималась область сопряжения русла реки с отмелым устьем, а под резервуаром — приемный бассейн (море).

Минимальный перечень учитываемых физических факторов включал:

- 1) рельеф дна, причем предполагалось, что батиграфическая неоднородность составляла не более 5 % от глубины в каждой координатной точке плана;

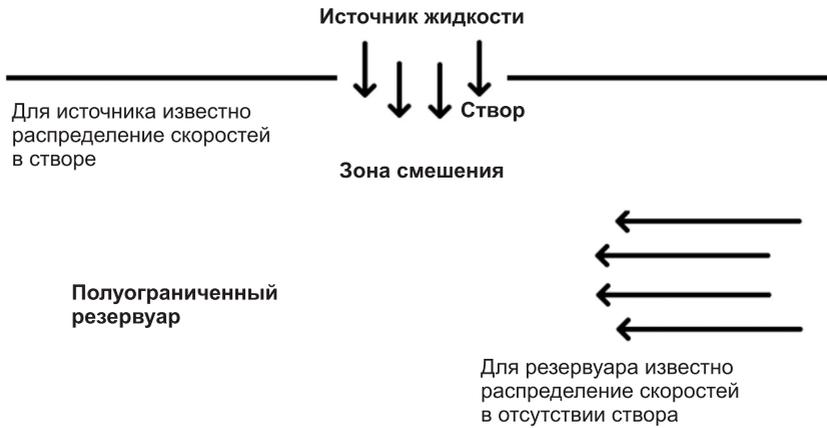


Рис. 1. Общая схема расчетной модели

- 2) распределение скоростей движения жидкости в приемном бассейне;
- 3) направления и скорости ветра над поверхностью зоны смешения;
- 4) наличие растворенных веществ минимум по одной фракции в жидкости источника и приемном бассейне.

Метод решения. Выбор метода для реализации модели происходил не только из соображений соблюдения требований к абстракции, но и с учетом предполагаемой программной организации решения. Принимая во внимание последнее, наиболее оптимальными при выборе метода решения признавались подходы, обеспечивающие максимально возможное распараллеливание вычислений, которые допускали простой способ адаптации решения к локальным гидрометеорологическим условиям и были бы принципиально прозрачными для алгоритмизации.

Окончательно, в качестве основного подхода, был выбран метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH — Smoothed Particles Hydrodynamics). Данный метод основывается на представлении жидкости в виде отдельных частиц, имеющих некоторый характерный размер — длину сглаживания, определяющую параметры аппроксимации физических свойств водной среды.

Уравнение Навье–Стокса при использовании данного подхода дискретизируется и приводится к форме второго закона Ньютона. Значение некоторой физической величины A для заданной частицы может быть выражено через аналогичные значения для частиц в окрестности радиуса $2h$:

$$A(\mathbf{r}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|, h), \quad (1)$$

где m_j — масса отдельной частицы;

ρ_j — плотность, сопоставленная частице;

A_j — значение искомой величины, сопоставленной точке;

h — длина сглаживания;

$W(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|, h)$ — функция ядра, зависящая от природы величины A . В пределе при $h \rightarrow 0$ функция ядра W переходит в δ -функцию.

Как показано в работе [1], можно получить выражение для производной $\frac{\partial}{\partial x} A(\mathbf{r})$ в любой из двух следующих форм:

$$\frac{\partial A_a}{\partial x_a} = \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} (A_b - A_a) \frac{\partial W_{ab}}{\partial x_a}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial A_a}{\partial x_a} = \frac{1}{\rho_a} \sum_b m_b (A_b - A_a) \frac{\partial W_{ab}}{\partial x_a}. \quad (3)$$

Применительно к поставленной задаче начальными условиями ее решения являются значения скоростей и координат частиц на выходе из источника. Также в любой момент времени известно распределение скоростей и координат частиц на границах объема, выделенного для жидкости резервуара и являющегося, таким образом, объемом, ограничивающим конкретную модель.

В общем случае решение задачи о моделировании движения жидкости по методу сглаженных частиц сводится к следующим этапам:

- 1) расчет давления в точках, занимаемых каждой частицей;
- 2) расчет силы давления и сил вязкости. Силы давления являются результатом дискретизации компоненты $-\frac{\nabla P}{\rho}$ уравнения Навье–Стокса.

Силы вязкости аппроксимируют компоненту $\nu \Delta \mathbf{v}$;

- 3) расчет ускорения частиц

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{F}_i^{press} + \mathbf{F}_i^{visc} + \mathbf{g}, \quad (4)$$

где \mathbf{F}_i^{press} — единичная сила давления, действующая на частицу i ;

\mathbf{F}_i^{visc} — единичная сила вязкости, действующая на частицу i ;

\mathbf{g} — ускорение свободного падения;

- 4) обновление положения частиц по элементарным кинематическим формулам.

Помимо соблюдения сформулированных требований, метод SPH имеет ряд других достоинств:

- 1) дает возможность в более простой форме определить начальные условия;

2) позволяет пользоваться большим диапазоном пространственного разрешения (с учетом автоматической адаптации) в сравнении с «эйлеровыми» методами;

3) автоматически сохраняет не только энергию и количество движения, но и момент импульса, что также не гарантировано «эйлеровыми» методами в общем случае;

4) в совокупности, с учетом сил гравитации, сохраняет полную энергию в отличие от сеточных методов.

Моделирование. Реализация модели осуществлялась путем последовательных приближений. В первом приближении требовалось произвести расчет без учета влияния ветра и наличия растворенных веществ. Задавались рельеф дна, начальные и граничные условия. Моделирование происходило до стабилизации поля скоростей. В качестве функций ядра для расчета сил давления и сил вязкости были выбраны соответственно [2]:

$$W_{press}(\mathbf{r}, h) = \frac{15}{\pi h^6} \begin{cases} (h - \|\mathbf{r}\|)^3 & 0 \leq \|\mathbf{r}\| \leq h, \\ 0 & \|\mathbf{r}\| > h \end{cases}; \quad (5)$$

$$W_{visc}(\mathbf{r}, h) = \frac{15}{2\pi h^3} \begin{cases} -\frac{\|\mathbf{r}\|^3}{2h^3} + \frac{\|\mathbf{r}\|^2}{h^2} + \frac{h}{2\|\mathbf{r}\|} - 1, 0 < \|\mathbf{r}\| \leq h \\ 0, \|\mathbf{r}\| > h \end{cases} \quad (6)$$

Жидкости источника и резервуара имели различные, постоянные плотности. В ситуациях, когда частица одной жидкости находилась в окрестности другой, соответствующие компоненты формулы (1) имели дополнительный коэффициент $\frac{\rho_{obj}}{\rho_{subj}}$, где ρ_{obj} — плотность жидкости, являющейся объектом воздействия, ρ_{subj} — плотность жидкости, со стороны которой учитывается влияние.

Пример результата расчетов приведен на рис. 2. Исходные данные:

- глубина сечения 2 м, ширина — 600 м;
- расход жидкости 2000 м³/с;
- заданное скоростное распределение;
- случайная форма дна с перепадами до 0,15 м;
- географическая широта для расчета ускорения свободного падения: 40° южной широты.

Важной составляющей моделирования по методу сглаженных частиц является обработка их столкновений. Для того чтобы обработать столкновение между частицей и некоторым препятствием, достаточно следующей информации:

- положение контактной точки;
- глубина проникновения в область препятствия;
- направление и положение нормали к поверхности препятствия в контактной точке;

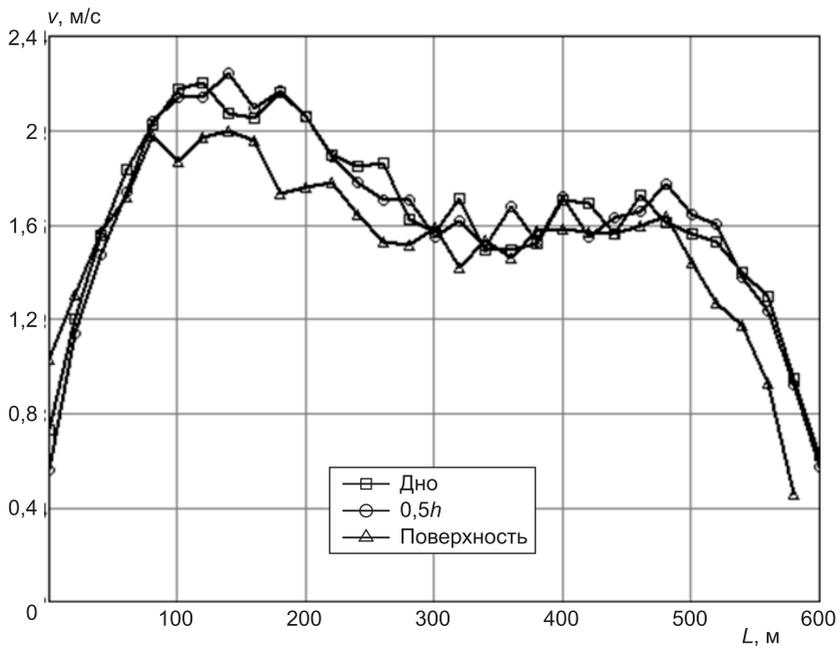


Рис. 2. Эюра скоростей при расчете двухфазным алгоритмом

— средняя скорость частицы в итерации, в которой установлено столкновение.

Столкновения между отдельными частицами не рассматриваются.

При решении поставленной задачи обрабатывались столкновения частиц с поверхностью дна с применением импульсно-проекционного метода, согласно которому положение и скорость частицы после столкновения принимаются равными:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_s + d\mathbf{n}; \quad (7)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_s - \left(1 + c_R \frac{d}{\Delta t \|\mathbf{u}_s\|} \right) (\mathbf{u}_s \mathbf{n}) \mathbf{n}, \quad (8)$$

где \mathbf{r}_s , \mathbf{u}_s — соответственно положение и скорость частицы до обработки столкновения;

d — глубина проникновения внутрь поверхности без учета столкновения;

\mathbf{n} — нормаль к поверхности в точке контакта;

c_R — коэффициент восстановления скорости;

Δt — условное время, отнесенное к текущей итерации;

\mathbf{r} , \mathbf{u} — положение и скорость частицы после столкновения.

При построении дна принималось, что никакие две точки его поверхности не могут совпасть при проецировании в плане. Второе приближение модели учитывало влияние ветра и позволяло рассчитывать концентрации осаждаемых веществ и уровень осадений за заданный промежуток времени от начала расчета.

Таким образом в модель был включен дополнительный физический фактор — воздействие ветра на водную поверхность. Расчет силы ветрового воздействия производился в последовательности:

- 1) расчет формы свободной поверхности. Применяется тот же алгоритм, что и для аппроксимации рельефа дна по отметкам в плане;
- 2) интегрирование и проецирование ветровой нагрузки на отдельные частицы;
- 3) включение в этап расчета ускорений.

Следующая задача — расчет уровня осадений. Весь осаждаемый материал принимается как совокупность сильно разреженных частиц. При этом взвеси в построенной модели не влияют на частицы жидкости, но жидкость оказывает обратное влияние. Данный подход очевидно может быть применим до определенного значения N_{\max}^{cr} — критической концентрации частиц взвеси:

$$N_{\max} = \max_{\mathbf{r} \in V, t \in T} N(\mathbf{r}, t), \quad (9)$$

где V — объем, выделенный для моделирования приемного резервуара;

T — время моделирования.

Для первоначального упрощения модель не учитывала изменение рельефа в процессе осадения. На рис. 3 и 4 показаны соответственно пример результатов расчета концентрации взвесей и толщины слоя донных осадений по данным рис. 2.

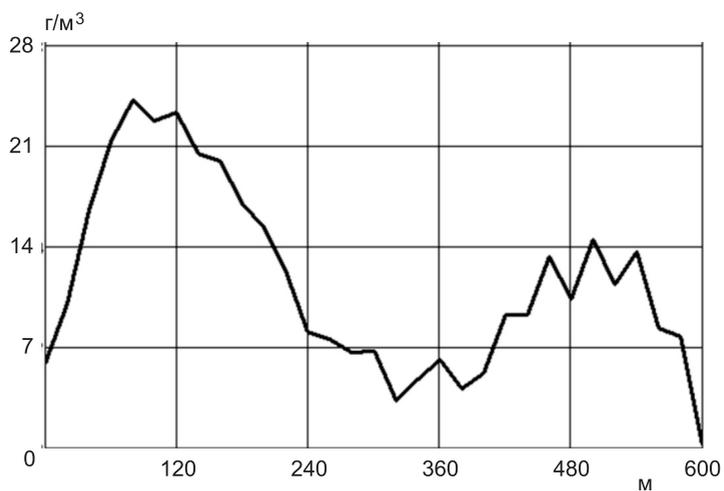


Рис. 3. Эпюра концентраций растворенных веществ для данных рис. 2

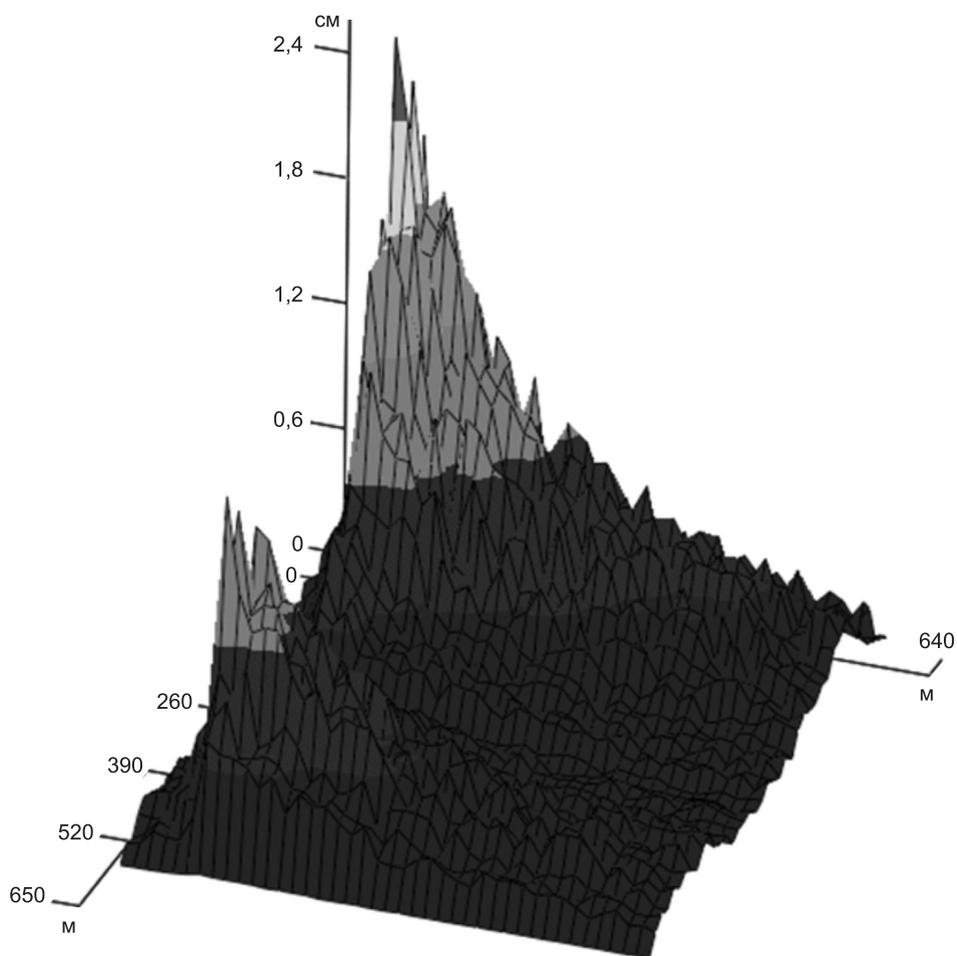


Рис. 4. Результат расчета донных отложений по данным рис. 2

Программная часть. В процессе решения задачи возникло несколько препятствий в его программной реализации.

При переходе от первого ко второму приближению наблюдалось значительное падение производительности вычислений — в среднем в 10 раз. Частично проблему удалось решить применением изменяемой длины сглаживания — значительно сократились потребляемые ЭВМ-ресурсы, но рост производительности составил в среднем лишь 20 %. Для дальнейшего усовершенствования решения необходимо перепроектирование расчетной системы на событийно-ориентированную логику, что даст возможность значительно поднять эффективность реализации вычислений для предложенного алгоритма на локальной ЭВМ и относительно просто привлекать к расчетам сразу несколько вычислительных узлов.

Заключение. В процессе исследований метод сглаженных частиц показал себя достаточно гибким и производительным и позволил достаточно просто внедрить новые гидрометеорологические факторы в модель при переходе между стадиями проектирования.

Дальнейшее развитие модели предусматривает:

- 1) наличие механизма корректировки при превышении допустимого значения уровня концентрации осаждаемых веществ;
- 2) учет изменчивости рельефа дна на больших периодах моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Monaghan, J.J. Smoothed particles hydrodynamics [Text] / J.J. Monaghan. — Monash University, Australia : School of Mathematical Sciences, 1992. — 68 p.
2. Kelager, M. Lagrangian Fluid Dynamics Using Smoothed Particle Hydrodynamics [Text] / M. Kelager. — University of Copenhagen : Department of Computer science, 2006. — 81 p.
3. Liu, G.R. Smoothed particles hydrodynamics. A meshfree particle method [Text] / G.R. Liu, M.B. Liu. — National University of Singapore : World Scientific Publishing, 2003. — 473 p.
4. Hoover, W.G. Computational Statistical Mechanics [Text] / W.G. Hoover. — Amsterdam : Elsevier Science Publisher, 1991. — 324 p.

ДЕГТЯРЕВ-мл. Владимир Владимирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: gts@sibstrin.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ЕРШОВ Дмитрий Игоревич, асп.; E-mail: mostthemain@gmail.com

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 26.02.14

Degtyarev-young. Vladimir Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: gts@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Ershov Dmitry Igorevich, post-graduate student; E-mail: mostthemain@gmail.com, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

NUMERICAL MODELLING OF THE HYDROLOGICAL MODE IN AREAS MIXTURES OF RIVER AND SEA WATERS

This article describes approach to construction and principles of model realization for studying of hydrophysical processes in areas mixtures of river and sea waters. As a primary method smoothed particles hydrodynamics is considered.

Key words: stream hydrodynamics, Smoothed Particles Hydrodynamics, numerical modeling, computational software.

REFERENCES

1. Monaghan, J.J. Smoothed particles hydrodynamics [Text] / J.J. Monaghan. — Monash University, Australia : School of Mathematical Sciences, 1992. — 68 p.
 2. Kelager, M. Lagrangian Fluid Dynamics Using Smoothed Particle Hydrodynamics [Text] / M. Kelager. — University of Copenhagen : Department of Computer science, 2006. — 81 p.
 3. Liu, G.R. Smoothed particles hydrodynamics. A meshfree particle method [Text] / G.R. Liu, M.B. Liu. — National University of Singapore : World Scientific Publishing, 2003. — 473 p.
 4. Hoover, W.G. Computational Statistical Mechanics [Text] / W.G. Hoover. — Amsterdam : Elsevier Science Publisher, 1991. — 324 p.
-

УДК 627.514:624.139

Г.И. КУЗНЕЦОВ, Н.В. БАЛАЦКАЯ

**ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ И КРИОГЕННЫХ
ФАКТОРОВ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ГИДРООТВАЛОВ
В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Рассмотрено влияние фильтрационных и криогенных факторов, существенно осложняющих работу гидросооружений в суровых климатических условиях. Даны примеры негативных процессов, приводящих к аварийным ситуациям (хвостохранилище № 1 Норильского ГМК, золоотвал № 1 Абаканской ТЭЦ и др.). При устройстве гидроотвалов в таких условиях важна защита от промерзания дренажей, располагаемых в ограждающей дамбе и массиве складированных отходов. Предложено техническое решение конструкции дренажа, которая обеспечивает его намерзаемость и работоспособность при минимальных затратах на эксплуатацию за счет использования теплосодержания гидросмеси, подаваемой в гидроотвал.

Ключевые слова: отходы, дамба, фильтрация, экран, дренаж, устойчивость.

Введение. Эксплуатация гидроотвалов (золоотвалов хвосто- и шламоохранилищ) в суровых климатических условиях сопровождается совместным воздействием ряда факторов, существенно осложняющих работу этих сооружений. К этим факторам относятся неуправляемая фильтрация в теле и основании ограждающих дамб, сезонное промерзание внешнего слоя грунта тела дамбы и поверхности надводного пляжа, сосредоточенная фильтрация по контакту с водосбросами, образование и последующее оттаивание льда в массиве складированных отходов, отказы дренажей и экранов вследствие промерзания и механических повреждений. В результате происходят глубокие деформации внешних откосов, разрушение дамб и растекание гидросмеси по прилегающей территории.

При эксплуатации гидроотвала в период отрицательных температур воздуха промерзает внешний откос дамбы. При достаточной теплоизоляции дренажной системы фильтрационный поток свободно разгружается в незамерзающий дренаж. Крайне неблагоприятный режим эксплуатации гидроотвала формируется при отказах дренажной системы, которые возникают в различных условиях, в том числе при промерзании дренажа. В таких случаях у подошвы откоса или на других участках ограждающей дамбы образуются нерегулируемые выходы фильтрационного потока и наледи, осложняющие эксплуатацию гидроотвала. Наледи в сочетании с промерзанием сооружения затрудняют выход фильтрационного потока; не имея возможности разгрузиться в дренаж, поток оказывает взвешивающее давление на поверхностный мерзлый слой. Как показывают натурные наблюдения, это может привести к выпору мерзлой корки и разрушению ограждающей дамбы.

При устройстве гидроотвалов в суровых климатических условиях существенно важным является защита от промерзания дренажей, распо-

лагаемых в ограждающей дамбе и массиве складированных отходов. Нарушение нормального фильтрационного режима приводит к уменьшению устойчивости дамбы и гидроотвала в целом, их деформациям и разрушению. Известны многочисленные примеры таких негативных процессов, приводящих к аварийным ситуациям (хвостохранилище № 1 Норильского ГМК, золоотвал № 1 Абаканской ТЭЦ и др.).

Механизм развития указанных процессов рассмотрим на примере разрушения золоотвала № 1 Абаканской ТЭЦ 12.02.1990 г. (рис. 1).

а)



б)



Рис. 1. Разрушение ограждающей дамбы золоотвала № 1 Абаканской ТЭЦ

а — поперечное сечение дамбы в проране; *б* — вид из вытекшей емкости

Дамба золоотвала построена из песчано-гравийного грунта на берегу водохранилища Красноярской ГЭС; заложение верхового и низового откосов — 1 : 3; средняя высота 8,5 м; ширина гребня 6 м. Противофильтрационный экран выполнен из полиэтиленовой пленки толщиной 0,4 мм с защитным слоем толщиной 0,5 м из песка. Максимальный уровень заполнения емкости водой предусматривался до отметки 250,0 м при отметке гребня 251,0 м. В основании залегают супеси, суглинки и галечниковый грунт с песчаным заполнителем, на отдельных участках ложа сохранен поверхностный слой заторфованного грунта толщиной до 1,2 м.

В результате разрушения низового откоса и гребня дамбы на участке длиной 45 м произошел ее размыв на полную высоту до отметки 241,86 м, а также размыв и разрывы экрана в ложе золоотвала на участке длиной

54 м и шириной 60 м. Отметка гребня дамбы по бортам прорана 250,0 м, отметка поверхности льда на золоотвале в момент аварии 249,60 м.

Основные причины разрушения дамбы — наличие многочисленных повреждений в экране, совместное воздействие фильтрационного потока и сезонного промерзания гребня, низового откоса и основания в нижнем бьефе. По данным натурных измерений и многочисленным внешним проявлениям постоянной фильтрации, особенно у подошвы разрушившегося участка дамбы, можно судить о недостаточной эффективности пленочного экрана.

Эксплуатация золоотвала в осенне-зимний период 1989–1990 гг. проводилась при высоком, но не превышающем проектной отметки, уровне воды, что при низких фактических водоупорных качествах экрана привело к обильному насыщению фильтрующейся водой массива дамбы, особенно на участке прорана.

В теплое время года фильтрационный поток беспрепятственно высачивался в заполненное водой понижение у подошвы низового откоса. Зимой в результате промерзания в зоне высачивания произошло стеснение потока; резко возросли его скорости под нижней кромкой водонепроницаемой поверхностной мерзлой корки, а в пределах всей длины откоса на нее действовало взвешивающее давление фильтрационного потока, который в создавшихся условиях стал напорным. Наиболее опасная фаза развития этого процесса совпала по времени с максимальной глубиной промерзания откоса (1,5–1,7 м); его разрушение произошло практически сразу после завершения наиболее холодного периода зимы. Давление напорного фильтрационного потока на мерзлую корку привело к ее отрыву от фильтрующего массива откоса, а образовавшаяся под ней неплотность могла стать дополнительной причиной эрозии грунта. На участке повышенных скоростей фильтрации под торцом мерзлого слоя нельзя исключать возможность развития интенсивной суффозии грунта тела и основания дамбы. Совокупность всех этих воздействий и стала причиной быстрого разрушения дамбы, завершившегося ее размывом потоком воды и пульпы.

Для оценки совместного воздействия фильтрационных и криогенных факторов на процесс разрушения дамбы проведена реконструкция картины фильтрации под водонепроницаемым сезонномерзлым панцирем в момент, предшествовавший образованию прорана. На геофильтрационной модели (рис. 2) учтены:

— сезонное промерзание низового откоса и гребня на глубину до 1,7 м;

— высокое, практически на уровне гребня, положение уровня воды в золоотвале к моменту начала разрушения мерзлой корки;

— наличие на затопленном осенью пляже и на поверхности воды в отстойном пруде слоя льда толщиной до 0,45 м, образующего сплошной мерзлый панцирь вместе с мерзлым слоем золowych отложений на пляже (до 0,55 м);

— наличие незамерзающего участка высачивания шириной 5–6 м непосредственно у подошвы дамбы;

— наличие экранирующего сезонномерзлого слоя на поверхности основания за участком высачивания;

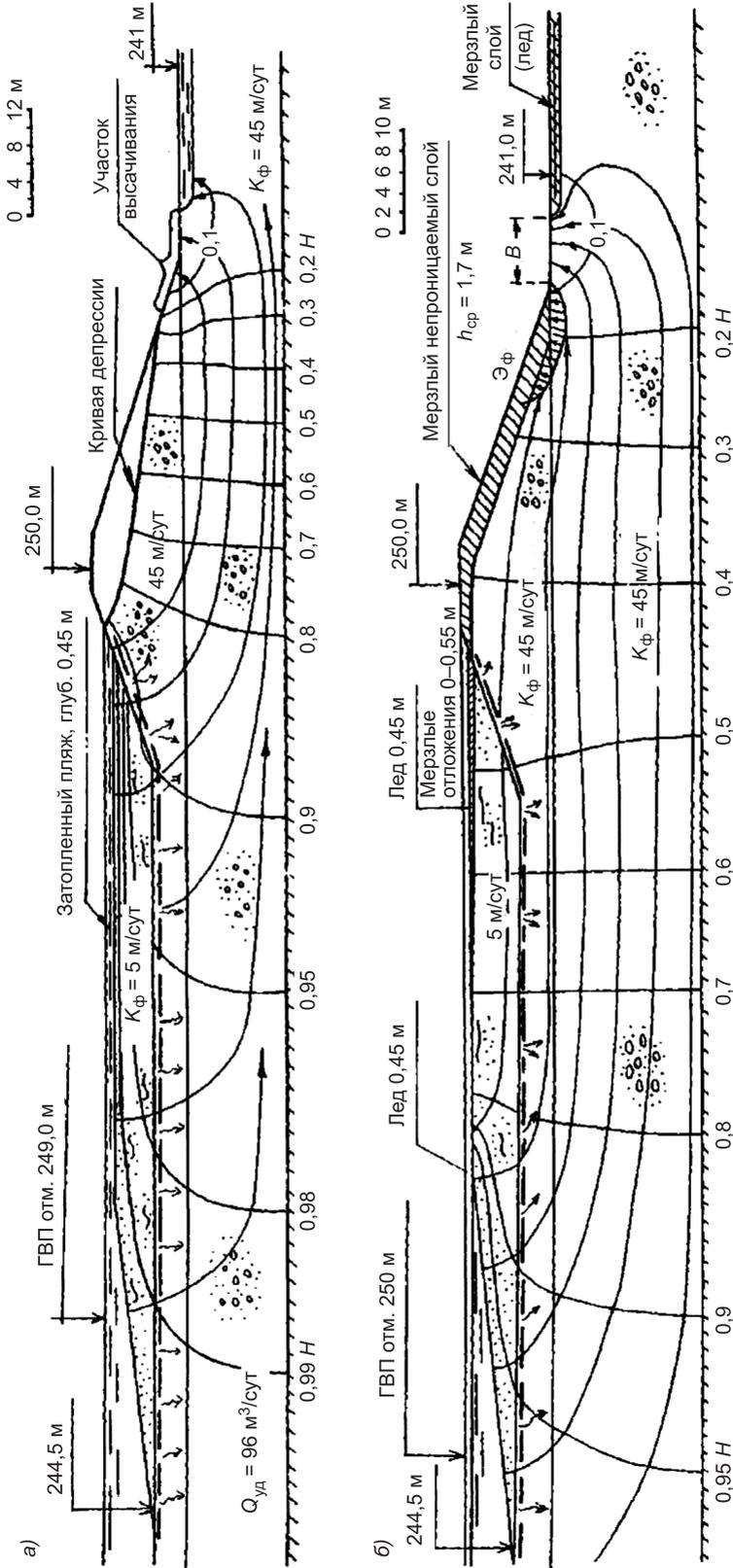


Рис. 2. Реконструкция гидродинамической сетки фильтрационного потока на участке прорана в дамбе золотоотвала № 1 Абаканской ТЭЦ

а — схема 1 (предварительная ситуация на 30.10.1989 г., свободный, незапорный, поток безнапорный, свободное высачивание); б — схема 2 (аварийная ситуация на 01.02.1990 г., напорный поток подо льдом и водонепроницаемым мерзлым слоем, стесненный участок высачивания шириной В; Эф — эпюра фильтрационного давления на мерзлый слой)

— высокая водопроницаемость ранее поврежденного пленочного экрана.

Анализ гидродинамической сетки позволяет отметить следующее.

При отсутствии внутреннего незамерзающего дренажа под водонепроницаемым мерзлым панцирем на низовом откосе в его нижней части формируется зона напорной фильтрации.

При неблагоприятном сочетании перечисленных выше факторов могут произойти отрыв, выпор и сдвиг нижней части мерзлого панциря с выносом из-под него водонасыщенного грунта, как это и наблюдалось на деформированном участке дамбы.

Аналогичная картина может проявиться с той или иной степенью опасности и на других участках дамбы; при более низких отметках уровня воды в золоотвале кратковременное ослабляющее воздействие напорной зимней фильтрации на промерзающий недренированный откос будет не столь значительным, но при многократном повторении опасность этого процесса усиливается, особенно если учитывать вполне реальную возможность контактной суффозии грунта под мерзлым панцирем.

К расчету устойчивости промерзающего откоса. Рассмотрим устойчивость обводненного промерзающего откоса для случая отказа дренажа (рис. 3, 4).

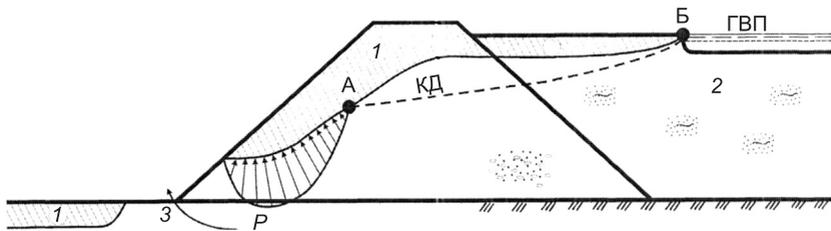


Рис. 3. Схема к расчету устойчивости промерзающего откоса

1 — мерзлый водонепроницаемый слой; 2 — намывной массив; 3 — выход фильтрационного потока; КД — кривая депрессии на участке безнапорной фильтрации АБ; Р — эпюра взвешивающего давления фильтрационного потока на напорном участке; ГВП — горизонт воды в прудке

Силовое воздействие фильтрационного потока на мерзлую водонепроницаемую корку, образующуюся на поверхности откоса при его промерзании, может быть учтено по способу, дополняющему метод А.А. Ничипоровича и аналогичные ему способы расчета устойчивости при сдвиге массива обрушения по круглоцилиндрической поверхности скольжения [1, 2]. Соответствующая формула для определения коэффициента запаса устойчивости имеет вид:

$$K = \frac{\sum [(G_n m P_n^B) m \cos \alpha_n m \Phi_n] m t g m_n + \sum C_n m l_n}{\sum G_n m \sin \alpha_n + \sum P_n^r m r_n / R} \quad (1)$$

Равнодействующая эпюры взвешивающего давления P_n на рассматриваемом участке приложена в точке А к нижней поверхности непроницаемого мерзлого слоя и направлена по нормали к ней (см. рис. 4). Горизонтальная составляющая P_n^r учитывается как дополнительное сдвигающее усилие при определении момента сдвигающих сил относительно центра вращения расчетного тела обрушения;

r_n — плечо этой силы относительно центра вращения. Вертикальная составляющая P_n^B учитывается в качестве подъемной (отрывающей) силы

при определении веса отсека G_n , который соответственно уменьшается на величину P_n^B . Остальные обозначения: Φ_n — равнодействующая фильтрационного давления в традиционной трактовке, действующая в объеме талого грунта n -отсека ниже кривой депрессии в зоне безнапорной фильтрации и ниже подошвы мерзлого слоя на участке напорной фильтрации; она приложена в центре подошвы отсека (в точке Б) и направлена по нормали к поверхности скольжения; $\text{tg}m_n$, G_n — коэффициент внутреннего трения и сцепление на подошве расчетного отсека; l_n — длина подошвы n -отсека, определяемая по круглоцилиндрической кривой скольжения; h_m — глубина промерзания откоса; R — радиус кривой скольжения и угол α обозначены на рис. 4. В отсеках, где кривая скольжения пересекает мерзлые слои, значения φ_n , C_n принимаются в зависимости от температуры грунта в момент расчета (например, в оценке «зимней» устойчивости при максимальной мощности слоя сезонного промерзания и в оценке «весенней» устойчивости, когда под оттаявшим с поверхности водонасыщенным слоем сохраняется сравнительно тонкий водонепроницаемый мерзлый слой).

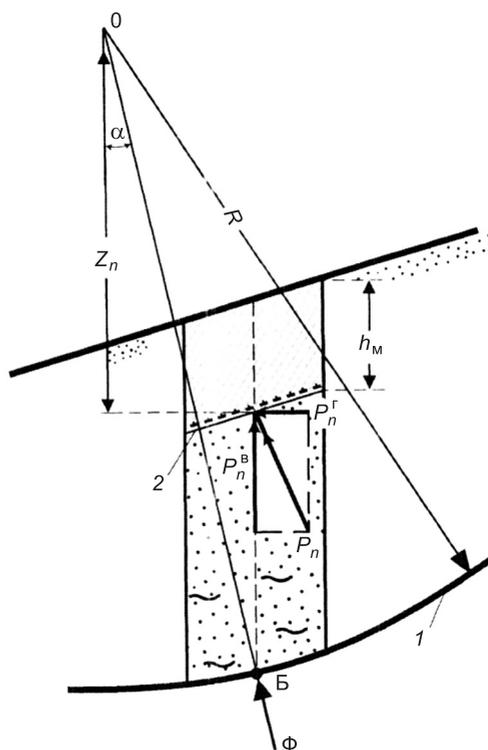


Рис. 4. Силы, действующие на отсек обрушения (обозначения в тексте)

1 — кривая скольжения; 2 — подошва мерзлого слоя на откосе

Предлагаемый способ защиты дренажа от промерзания. Авторами предложена конструкция дренажа, которая обеспечивает его незамерзаемость и работоспособность при минимальных затратах на эксплуатацию за счет использования теплосодержания гидросмеси, подаваемой в гидроотвал [6].

Трубопровод, по которому подается на гидроотвал гидросмесь отходов, имеющая положительную температуру, прокладывается совместно с дренажом. Благодаря тепловому воздействию такого трубопровода в сочетании с фильтрационным потоком, поступающим в дренаж, в грунте вокруг дренажа поддерживается талая зона, в результате чего обеспечивается незамерзаемость дренажа и, соответственно, устойчивость ограждающей дамбы и надежность работы гидроотвала.

Конструкция дренажной системы приведена на рис. 5. Создание незамерзающего дренажа и его работа осуществляется следующим образом. В процессе возведения ограждающей дамбы 1 на подготовленное основание 4 вдоль дамбы укладывается трубчатый или ленточный дренаж 2 и трубы дренажного выпуска 3. Рядом с дренажом 2 и выпуском 3 или над ними укладывается пульпопровод 5, по которому на гидроотвал пода-

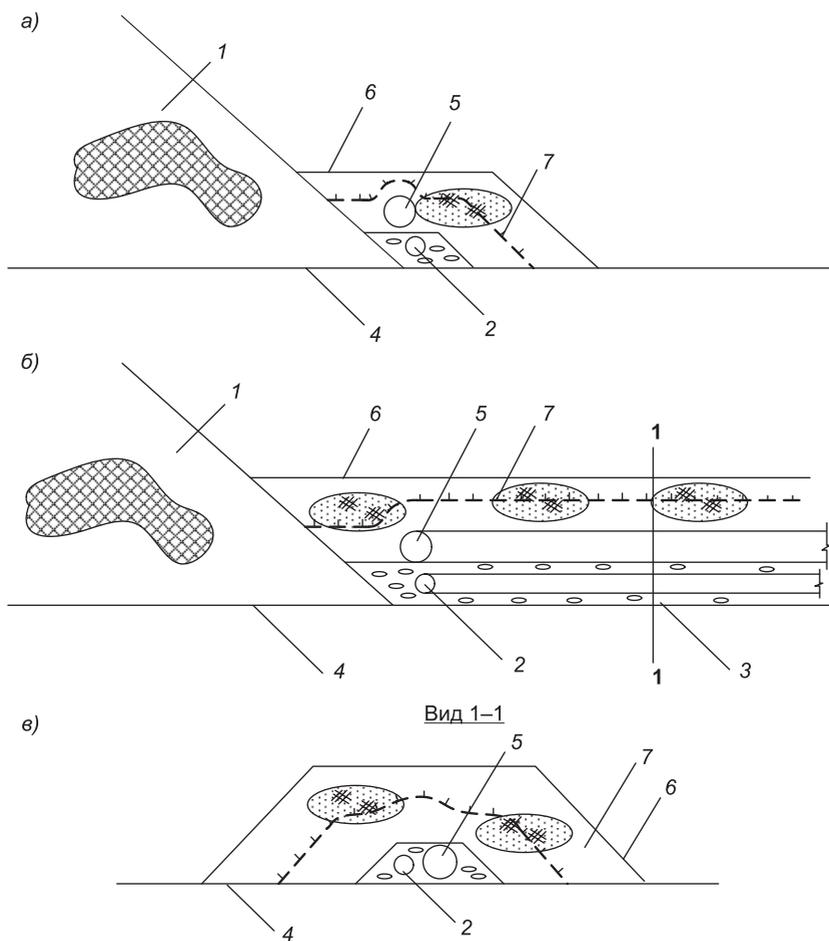


Рис. 5. Гидроотвал с незамерзающей дренажной системой. Вариант с трубчатым дренажом

a — поперечный разрез при прокладке «теплого» пульпопровода над дренажом в грунте утепляющей пригрузки; *б* — разрез по оси пульпопровода на участке дренажного выпуска; *в* — поперечный разрез для варианта с прокладкой «теплого» пульпопровода рядом с дренажным выпуском

ется гидросмесь отходов. Фильтрационный сток из гидроотвала поступает в дренаж 2 и по дренажному выпуску 3 направляется в соответствующую емкость, в естественный водоем или на очистные сооружения. Одновременно по пульпопроводу 5 подается пульпа. Совместное обогревающее влияние тепла, содержащегося в фильтрате и в пульпе, обеспечивает незамерзаемость дренажа 2 и выпуска 3. Дополнительную тепловую защиту всей дренажной системы обеспечивает утепляющая пригрузка 6, противодействующая сезонному промерзанию 7.

Дренажные трубы могут быть стальными, пластмассовыми, керамическими и железобетонными. В качестве материала пригрузки могут быть использованы сыпучие грунтовые материалы (песок, щебень, шлак), не подверженные морозному пучению.

Теплофизическое обоснование предлагаемой технологии осуществляется по двум методикам [3–5] при одинаковой упрощающей предпосылке: тепловое влияние фильтрационного потока не учитывается, так как рассматривается случай полного отказа дренажа.

Коэффициент теплоотдачи на поверхности земляной насыпи определяется по формуле, Вт/(м² · °С) [1]:

$$a_2 = 5,3 + 3,6v. \quad (2)$$

Расчет ореола оттаивания вокруг пульпопровода в зимнее время выполняется по формуле:

$$d_T = \exp \frac{\ln [d_2 + 2(\delta_r + \delta_c)] - 2,8 \frac{t_B}{t_n} \ln d_2}{1 - 2,8 \frac{t_B}{t_n}}, \quad (3)$$

где d_T — диаметр ореола оттаивания грунта, м;

d_2 — наружный диаметр трубы, м;

δ_r — толщина слоя грунта над трубой, м;

δ_c — средняя расчетная высота снегового покрова, м;

t_B — температура воздуха, °С;

t_n — температура пульпы, °С.

В примере расчета ореола оттаивания по формуле (3) температура пульпы в начале расчетного участка принята равной $t_n = 5$ °С. Пульпопровод диаметром $d_2 = 0,6$ м сверху засыпан слоем грунта толщиной слоя $\delta_r = 2$ м. Коэффициенты теплопроводности грунта насыпи $\lambda_m = 1,51$ ккал/(м · ч · °С) и $\lambda_T = 1,16$ ккал/(м · ч · °С). Диаметр ореола оттаивания грунта получен равным 0,7 м.

Температурное поле вокруг двух труб — дренажной и гидротранспортной (рис. 6) может быть рассчитано по формуле (4):

$$t = t_0 + \frac{q_1}{2\pi\lambda_{гр}} \ln \sqrt{\frac{x^2 + (y+h)^2}{x^2 + (y-h)^2}} + \frac{q_2}{2\pi\lambda_{гр}} \ln \sqrt{\frac{(x-b)^2 + (y+h)^2}{(x-b)^2 + (y-h)^2}}, \quad (4)$$

где q_1 и q_2 — удельные тепловые потери первого и второго трубопроводов, Вт/м;

$\lambda_{гр}$ — теплопроводность грунта Вт/(м · °С);

b — толщина дренажного слоя, м;

x, y — шаг по горизонтали и вертикали.

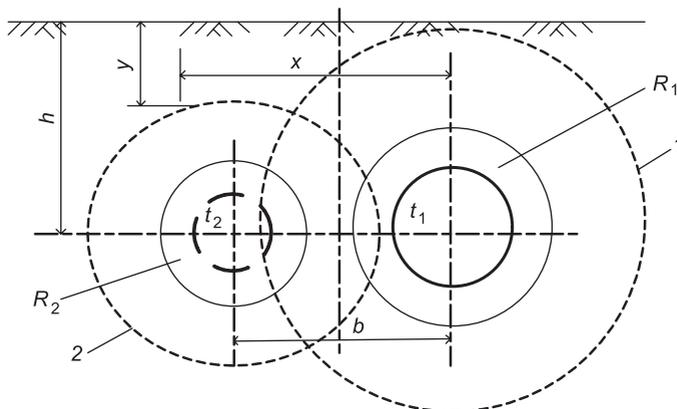


Рис. 6. Расчетная схема двухтрубной системы

1 — ориентировочное температурное поле, образующееся в грунте вокруг пульпопровода; 2 — то же вокруг дренажной трубы

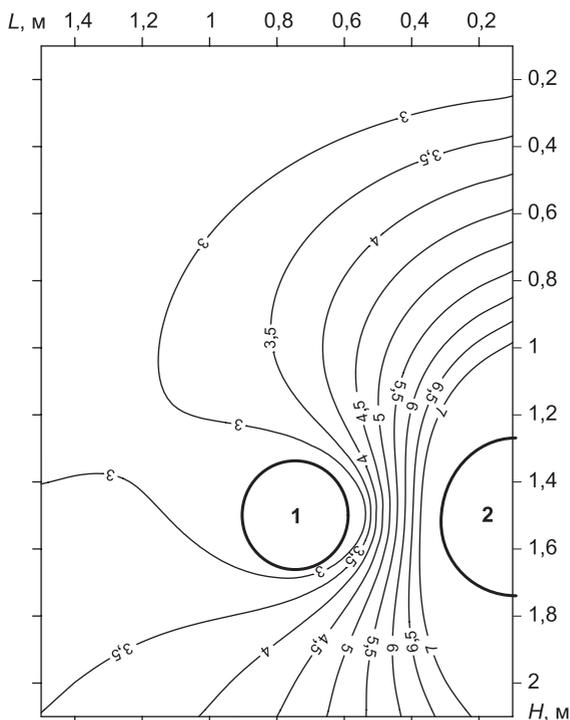


Рис. 7. Температурное поле двухтрубной системы
1 — дренажная труба; 2 — гидротранспортная труба

Расстояние x принимается от оси дренажной трубы, в которой протекает теплоноситель с меньшей температурой. Расчетная температура окружающей среды для зимнего периода принимается равной наименьшей среднемесячной температуре грунта на глубине заложения оси дренажной и гидротранспортной труб. В нашем случае эта глубина равна $h = 1,5$ м; диаметр гидротранспортной трубы $d_1 = 0,6$ м; диаметр дренажной трубы $d_2 = 0,3$ м; толщина дренажного слоя $b = 0,8$ м; теплопроводность дренажного слоя $\lambda_{из} = 2,57$ Вт/(м · °С); температура пульпы в гидротранспортной трубе $t_1 = 10$ °С, температура фильтра в дренажной трубе $t_2 = 3$ °С; температура грунта

на оси заложения труб $t_0 = 2$ °С; теплопроводность грунта дамбы $\lambda_{гр} = 5,7$ Вт/(м · °С); коэффициент теплообмена $\alpha = 12$ Вт/(м² · °С) [4].

Температурное поле, возникающее вокруг одновременно работающих дренажной и гидротранспортной труб, приведено на рис. 7. Из расчета следует, что температура грунта на данной глубине заложения труб в среднем равна 5 °С. Таким образом, благодаря совместной укладке пульпопровода и дренажа можно сэкономить на устройстве теплоизоляционного слоя и полностью исключить энергозатраты на иные способы обогрева дренажной системы.

Заключение. Изложенное требует самого пристального внимания к состоянию гидроотвалов зернистых отходов и к проектированию новых, экологически безопасных и надежных сооружений, в частности, эффективных дренажных устройств.

Предлагаемое конструктивное решение дренажной системы гидроотвала для районов глубокого сезонного промерзания обеспечивает бесперебойную работу дренажа и повышает экологическую безопасность сооружения.

Данное решение относится к ресурсосберегающим, так как заключается в использовании существующих технологических особенностей системы гидротранспорта пульпы без дополнительных энерго- и ресурсозатрат.

Расчетами теплового режима для одного из возможных вариантов установлены необходимые условия обеспечения талого состояния и работоспособности дренажной системы гидроотвала.

Уменьшение объемов грунта, необходимого для устройства теплоизоляционного слоя над дренажом, достигается за счет использования энергетического ресурса пульпы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ничипорович, А.А. Плотины из местных материалов: учеб. пособие для вузов [Текст] / А.А. Ничипорович. — М. : Стройиздат, 1973. — С. 136–142.
2. Рассказов, Л.Н. Гидротехнические сооружения. Ч. 1 : учебник для вузов [Текст] / Л.Н. Рассказов. — М. : Изв-во АСВ, 2008. — С. 413–417.
3. Антонов, А.Ф. Справочник по строительству на вечномёрзлых грунтах [Текст] / А.Ф. Антонов, Ю.Я. Велли, В.В. Гальперин. — Л. : Стройиздат, 1977.
4. Козин, В.Е. Теплоснабжение [Текст] / В.Е. Козин и др. — М. : Высш. шк., 1980.
5. СНиП 2.04.07–86* (2000). Тепловые сети [Текст]. — М. : Госстрой России, 1994.
6. Пат. № 2455087 РФ, МПК E02B 7/06. Гидроотвал с незамерзающей дренажной системой [Текст] / Г.И. Кузнецов, Н.В. Балацкая, О.А. Ворошилов, С.М. Семушева. № 20121330559/13; заявл. 01.08.2012; опубл. 20.01.2014. Бюл. № 2.

*КУЗНЕЦОВ Георгий Иванович, д-р техн. наук, проф.
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
БАЛАЦКАЯ Наталья Владимировна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: nball@mail.ru
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

Получено 11.02.14

Kuznetsov Georgy Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Balatskaya Nataly Vladimirovna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: nball@mail.ru, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**EFFECT OF FILTRATION AND CRYOGENIC FACTORS ON SAFETY
GIDROOTVALOV IN HARSH CLIMATIC CONDITIONS**

Consider the effect of filtration and griogennyh factors greatly complicate the work of hydraulic works in harsh environments. The examples of the negative processes that lead to emergency situations (tailing number 1 MMC Norilsk, ash disposal number 1 Abakan CHP and others). When the device gidrootvalov in harsh climatic conditions is essential protection against freezing drains located in the levee and the array of stored waste. Proposed solution drainage design that provides its nazamerzaemost and performance at the lowest cost of operation through the use of the heat content of the slurry fed to the hydraulic dump.

Key words: wastes, dam, filtration, shield, catchment (drainage), stability.

REFERENCES

1. Nichiporovich, A.A. Dam of local materials. Training: manual for schools [Text] / A.A. Nichiporovich. — Moscow : Sroyizdat, 1973. — P. 136–142.
2. Rasskazov, L.N. Stories Waterworks. P. 1: Textbook for high schools [Text] / L.N. Rasskazov. — Moscow : Math of the DIA, 2008. — P. 413–417.
3. Antonov, A.F. Handbook of construction on permafrost [Text] / A.F. Antonov, Yu.Ya. Valley, V.V. Halperin. — Leningrad : Sroyizdat, 1977.
4. Kozin, V.E. Heat [Text] / V.E. Kozin et. al. — Moscow : High. School, 1980.
5. SN&R 2.04.07–86* (2000). Heating networks [Text]. — Moscow : State Committee of Russia, 1994.
6. Pat. N 2455087 RF E02V IPC 7/06 With hydraulic dump antifreeze drainage system [Text] / G.I. Kuznetsov, N.V. Balatskaya, O.A. Voroshilov, S.M. Semusheva. N 20121330559 /13; stated 01.08.2012; publ. 20.01.2014. Bull. N 2.

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 628.5:533.6

И.Н. ЛОГАЧЕВ, К.И. ЛОГАЧЕВ, О.А. АВЕРКОВА, Е.И. ТОЛМАЧЕВА

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ОБЪЕМА АСПИРАЦИИ ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ КОВШОВЫМИ ЭЛЕВАТОРАМИ*

Сообщение 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разрабатываются схемы аспирации элеваторных перегрузок. Составлены балансовые уравнения воздухообмена аспирируемых укрытий. Сформулированы и решены системы уравнений для определения расходов перетекаемого воздуха для стандартного узла перегрузки. Предлагаются и аналитически обосновываются способы снижения производительности аспирационных систем.

Ключевые слова: аспирация, перегрузки сыпучих материалов, эжекция воздуха.

Эта статья является продолжением сообщений 1 и 2 [1–2]. Нумерация формул и рисунков сквозная.

Рассмотрим закономерности перетекания воздуха в более сложном случае, в случае использования трех байпасных каналов при аспирации элеваторного перегрузочного узла (рис. 14). Оценим, в частности, как изменяются расходы Q_5, Q_8 и $\Delta Q = Q_2 - Q_1$.

Для этого составим очевидные уравнения динамики и баланса воздуха для каналов и узлов слияния потока:

$$P_{\text{в}} - P_{\text{н}} + P_2(Q_2) = R_2 Q_2^2; \quad (62)$$

$$P_{\text{н}} - P_{\text{в}} + P_1(Q_1) = R_1 Q_1^2; \quad (63)$$

$$P_{\text{в}} - P_{\text{у}} + P_3(Q_3) = R_3 Q_3^2; \quad (64)$$

$$P_{\text{у}} - P_{\text{к}} = R_8 Q_8^2; \quad (65)$$

$$P_{\text{у}} - P_{\text{в}} = R_7 Q_7^2; \quad (66)$$

$$P_{\text{н}} - P_6 + P_0(Q_0) = R_0 Q_0^2; \quad (67)$$

$$P_6 - P_{\text{н}} = R_4 Q_4^2; \quad (68)$$

$$P_6 - P_{\text{н}} = R_5 Q_5^2; \quad (69)$$

* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект №14-08-31069-мол_а), программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова, Совета по грантам Президента РФ (проект МК-103.2014.1).

Здесь, кроме обозначений к системе (8)–(20), дополнительно введены:

P_k — абсолютное давление во внешней камере укрытия верхнего (принимающего) конвейера, Па;

P_6, P_y — абсолютные давления соответственно в буферной камере загрузочного желоба и во внутренней камере укрытия верхнего конвейера, Па;

Q_4, Q_6, Q_7 — расходы воздуха, циркулирующего по байпасам, м³/с;

Q_5, Q_8 — расходы воздуха, поступающего соответственно из буферной камеры в кожух башмака нории и из внутренней камеры во внешнюю камеру укрытия верхнего конвейера, м³/с;

R_4, R_6, R_7 — аэродинамические характеристики соответствующих байпасов, Па/(м³/с)², определяемые через их к.м.с. и площади поперечных сечений: $R_4 = \rho \zeta_4 / (2S_4^2)$; $R_6 = \rho \zeta_6 / (2S_6^2)$; $R_7 = \rho \zeta_7 / (2S_7^2)$;

$\zeta_4, \zeta_6, \zeta_7$ — к.м.с. соответствующих байпасов, отнесенные к динамическому напору в их поперечных сечениях;

S_4, S_6, S_7 — площади поперечных сечений соответствующих байпасов, м².

Таким образом, имеем систему из (62)–(76), (13), (14), (25) и (27) в общем случае 19 нелинейных уравнений с 19 неизвестными, в качестве которых выступают расходы воздуха в каналах Q_0, Q_1, \dots, Q_8 , расходы воздуха в неплотностях укрытий Q_b, Q_n, Q_k , давления в неаспирируемых укрытиях P_b и P_n , давления в узлах выделения рециркулируемых потоков P_6 и P_y , расходы аспирируемого воздуха Q_e и Q_a .

Можно уменьшить число уравнений, используя закон о потерях давлений в кольцах сложных вентиляционных систем рудничной аэрологии. Запишем эти уравнения:

для кольца *a*:

$$P_0(Q_0) = R_0 Q_0^2 + R_4 Q_4^2; \quad (77)$$

для кольца *b*:

$$P_1(Q_1) = R_1 Q_1^2 + R_5 Q_5^2 - R_6 Q_6^2; \quad (78)$$

для кольца *c*:

$$P_1(Q_1) + P_2(Q_2) = R_1 Q_1^2 + R_2 Q_2^2; \quad (79)$$

для кольца *d*:

$$P_3(Q_3) = R_3 Q_3^2 + R_7 Q_7^2; \quad (80)$$

для кольца *e**:

$$P_0(Q_0) = R_0 Q_0^2 + R_5 Q_5^2 - R_n Q_n^2 + R_n (Q_0 - Q_4)^2; \quad (81)$$

для кольца *f*:

$$-R_b Q_b^2 + R_6 Q_6^2 + R_n (Q_0 - Q_4)^2 - R_4 Q_4^2 = 0; \quad (82)$$

для кольца *k*:

$$R_k Q_k^2 = R_8 Q_8^2 + R_b Q_b^2 - R_7 Q_7^2. \quad (83)$$

Для определения десяти неизвестных ($Q_0, Q_1, \dots, Q_8, Q_b$) имеем десять уравнений (77–83), (71), (75) и (73). Будем решать эту систему нелинейных уравнений методом итерации. А именно, будем задавать разрежение в неаспирируемом кожухе головки элеватора (что равносильно заданию первоначальной величины Q_b в силу (26)). Пусть, например, величина этого разрежения *h* (в качестве первого приближения можем положить

* Кольца *e, f, k* — фиктивные, соединяющие воздушные потоки в каналах с помощью замыкания их на атмосферу помещения через неплотности укрытий (эти связи показаны пунктирными «каналами» на рис. 14, б).

$h_1 = 0$ или $h_1 = h_k$). Находим при этом значение разрежения расхода воздуха в каналах $Q_0(h_i), Q_1(h_i), Q_2(h_i), \dots, Q_8(h_i)$, как функции от h_i .

Уточняем величину разрежения:

$$s_i = R_B |Q_B(h_i)| Q_B(h_i), \quad (84)$$

где $Q_B(h_i) = Q_2(h_i) - Q_1(h_i) + Q_3(h_i) - Q_6(h_i) - Q_7(h_i)$.

Повторяем процесс расчета при новом значении h_{i+1} .

Для ускорения процесса счета можно в качестве $i + 1$ -го приближения принять:

$$h_{i+1} = \frac{h_i + s_i}{2}.$$

Счет прекращается при выполнении неравенства:

$$|s_i - h_i| \leq E, \quad (85)$$

где E — принятая точность ($E \approx 10^{-2}$).

Найдем расчетные формулы i -х приближений для расхода воздуха в каналах: $Q_0(h_i), Q_1(h_i), \dots, Q_8(h_i)$.

Рассмотрим верхние каналы, примыкающие к укрытию головки нории. Из уравнения (80) имеем:

$$\dot{f}_7 = Q_7(h_i) = \frac{L_3(Q_3(h_i))}{\sqrt{R_7 |L_3(Q_3(h_i))|}}, \quad (86)$$

где $L_3(Q_3(h_i)) = P_3(Q_3(h_i)) - R_3 |Q_3(h_i)| (Q_3(h_i))$.

Учитывая связь разрежения в укрытии с расходом воздуха в неплотностях этого укрытия, уравнение (83) запишем в виде:

$$-h_i + h_k = R_8 [Q_8(h_i)]^2 - R_7 |Q_7(h_i)| (Q_7(h_i)),$$

откуда найдем

$$Q_8(h_i) = \frac{L_9}{\sqrt{R_8 |L_9|}}, \quad (87)$$

где

$$\dot{f}_9 = L_9 = h_k - h_i + R_7 \dot{f}_7(Q_3(h_i)) | \dot{f}_7(Q_3(h_i)) |.$$

В силу (75) можем записать уравнение с одним неизвестным $Q_3(h_i)$:

$$\dot{f}_{10} = Q_3(h_i) - Q_8(Q_3(h_i)) - Q_7(Q_3(h_i)) = 0,$$

решение которого можно осуществить методом бисекции. Определив $Q_3(h_i)$, найдем по формуле (86) величину $Q_7(h_i)$ и по формуле (87) величину $Q_8(h_i)$.

Рассмотрим теперь нижний узел (укрытие башмака нории). Для упрощения записи не будем указывать аргумент функций расхода воздуха. Уравнение (81) с учетом связи разрежения и расхода воздуха в неплотностях кожуха башмака элеватора запишем в виде:

$$h_n + L_0(Q_0) = R_5 Q_5^2 + R_n (Q_0 - Q_4)^2,$$

откуда

$$\dot{f}_5 = Q_5 = \dot{f}_{15} / \sqrt{| \dot{f}_{15} |}, \quad (88)$$

где для удобства записи введены функции:

$$\begin{aligned} f_{15} = L_{15} &= \frac{h_n + L_0(Q_0)}{R_n} - R_n(Q_0 - Q_4)^2, \\ f_0 &= L_0(Q_0) = P_0(Q_0) - R_0 Q_0 |Q_0|. \end{aligned}$$

Из равенства (77) имеем:

$$f_4 = Q_4 = \frac{L_0(Q_0)}{\sqrt{R_4 |L_0(Q_0)|}}. \quad (89)$$

Чтобы найти Q_6 как функцию Q_0 , воспользуемся уравнением (82), которое запишем в виде:

$$h_i - R_n(Q_0 - Q_4) |Q_0 - Q_4| + R_4 Q_4 |Q_4| = R_6 Q_6 |Q_6|$$

или

$$L_{11} = R_6 Q_6 |Q_6|,$$

где

$$L_{11} = f_{11} = h_i - R_4(Q_0 - Q_4) |Q_0 - Q_4| + R_4 Q_4 |Q_4|,$$

откуда имеем:

$$f_6 = Q_6 = \frac{L_{11}}{\sqrt{R_6 |L_{11}|}}. \quad (90)$$

Подставляя (88), (89) и (90) в уравнение воздушного баланса (71), получим следующее функциональное уравнение для определения Q_0 :

$$f_{12} = Q_0 - Q_4(Q_0) - Q_5(Q_0) - Q_6(Q_0) = 0.$$

Определив $Q_0(h_i)$ и подставляя в уравнения (88), (89) и (90), найдем расходы $Q_4(h_i)$, $Q_5(h_i)$ и $Q_6(h_i)$.

Для определения оставшихся неизвестных Q_1 и Q_2 можно воспользоваться уравнениями (43)–(45) из [3] и (48)–(50) из [4].

Найденные значения $Q_1(h_i)$, $Q_2(h_i)$, $Q_3(h_i)$, $Q_6(h_i)$ и $Q_7(h_i)$ подставим в (84) с целью определения следующего итерационного значения разрежения.

Завершается итерационный процесс при выполнении условия (85).

Рассчитанные расходы Q_0 – Q_8 позволяют не только найти разрежение в неаспирируемых укрытиях головки элеватора (h) и в укрытии приводного барабана питателя

$$h_n = R_n(Q_0 - Q_4) |Q_0 - Q_4|,$$

но и определить необходимые объемы аспирации:

$$Q_a = Q_8 + \sqrt{\frac{h_k}{R_k}}, \quad Q_e = Q_5 + Q_2 - Q_1 + \sqrt{\frac{h_n}{R_n}}.$$

Роль байпасов можно оценить, сравнив текущие величины Q_5 , Q_8 и ΔQ с аналогичными величинами $Q_{5\infty}$, $Q_{8\infty}$ и ΔQ_∞ для системы аспирации без байпасов. Лучше всего это сделать на примере некоторого «стандартного» элеваторного узла. В качестве такого узла возьмем рассмотренный пример элеваторной перегрузки (см. п. 3 сообщения 2 [2]), который оснастим в общем случае тремя байпасными каналами по аналогии

с рис. 14, а. При этом в качестве постоянных параметров, характеризующих этот перегрузочный узел, будут выступать следующие величины:

$$\begin{aligned}
 E_0 &= 4 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2; L_{k0} = 1,6 \text{ м}^3 / \text{с}; L_{n0} = 1 \text{ м}^3 / \text{с}; h_n = 5 \text{ Па}; \\
 R_n &= 10 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2; E_1 = 200 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2; \\
 E_2 &= 400 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2; R_1 = 21 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2; \\
 R_2 &= 22 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2; L_1 = L_2 = 1 \text{ м}^3 / \text{с}; \\
 R_0 &= 10 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2; R_5 = 50 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2; \\
 R_B &= 25 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2; R_3 = 50 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2; \\
 R_8 &= 50 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2; R_H = 36 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2; \\
 E_3 &= 5 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2; L_{k3} = 2 \text{ м}^3 / \text{с}; L_{n3} = 0,5 \text{ м}^3 / \text{с}; \\
 h_k &= 5 \text{ Па}; R_K = 40 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2.
 \end{aligned}$$

Переменными будут аэродинамические характеристики байпасных каналов R_4, R_6 и R_7 в диапазоне $0,5-150 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$. Эти величины становятся постоянными и равными $10^9 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$ при перекрытии (отключении) соответствующего байпаса. Например, если $R_4 = R_6 = R_7 = 10^9$, то расходы воздуха в байпасах $Q_4 = Q_6 = Q_7 = 0$, т.е. байпасы отключены. Результаты расчета представлены на рис. 15–17. На этих графиках расходы воздуха, соответствующие случаю без байпаса, обозначены нижним

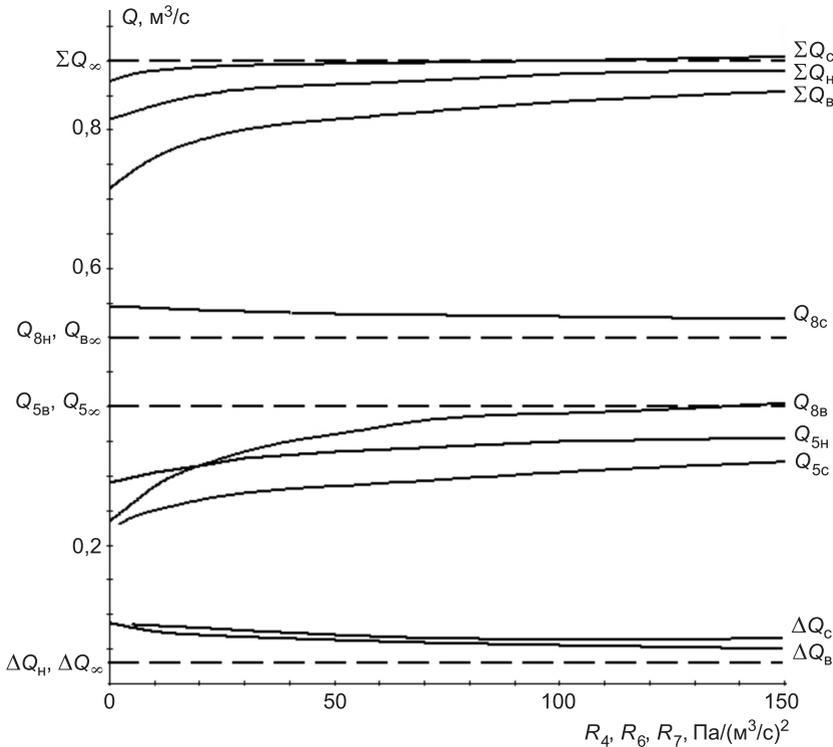


Рис. 15. Изменение расходов воздуха $Q_5, Q_8, \Delta Q$ и ΣQ от аэродинамического сопротивления при оборудовании элеватора одним байпасным каналом (н — нижним, с — средним, в — верхним, ∞ — при отсутствии байпасов)

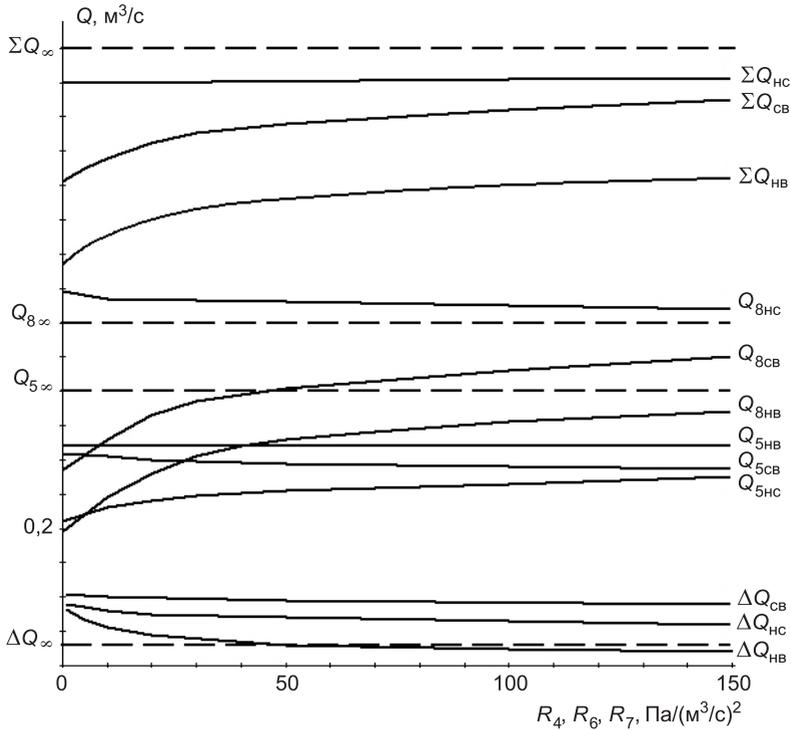


Рис. 16. Изменение расходов воздуха Q_5 , Q_8 , ΔQ и ΣQ от аэродинамического сопротивления при оборудовании элеватора двумя байпасными каналами (нс — нижним и средним, св — средним и верхним, нв — нижним и верхним, ∞ — при отсутствии байпасов)

индексом ∞ , а графики их изменения представлены горизонтальными пунктирными прямыми.

Другое постоянное значение аэродинамических характеристик байпасов составляет $25 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$. Например, на рис. 15 проставлены изменения расходов воздуха Q_5 , Q_8 , ΔQ и их сумма ΣQ для трех возможных схем устройства байпаса:

случай 1 — устройство только нижнего байпаса (на загрузочном желобе), его аэродинамическая характеристика изменяется $0,5 \leq R_4 \leq 150$, а остальные байпасы отсутствуют (их аэродинамическая характеристика стремится к ∞ , точнее составляет $R_6 = R_7 = 10^9$);

случай 2 — устройство только среднего байпаса (на кожухе элеватора), т.е. $0,5 \leq R_6 \leq 150$ и $R_4 = R_7 = 10^9$;

случай 3 — устройство только верхнего байпаса (на разгрузочном желобе), т.е. $0,5 \leq R_7 \leq 150$ и $R_4 = R_6 = 10^9$ (этот случай показан на рис. 15).

На рис. 16 представлены графики изменения расходов воздуха для трех возможных схем устройства двух байпасов:

случай 1 — устройство нижнего и среднего байпасов, при этом

$$R_4 = 25 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2, 0,5 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2 \leq R_6 \leq 150 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2, \\ R_7 = 10^9 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2;$$

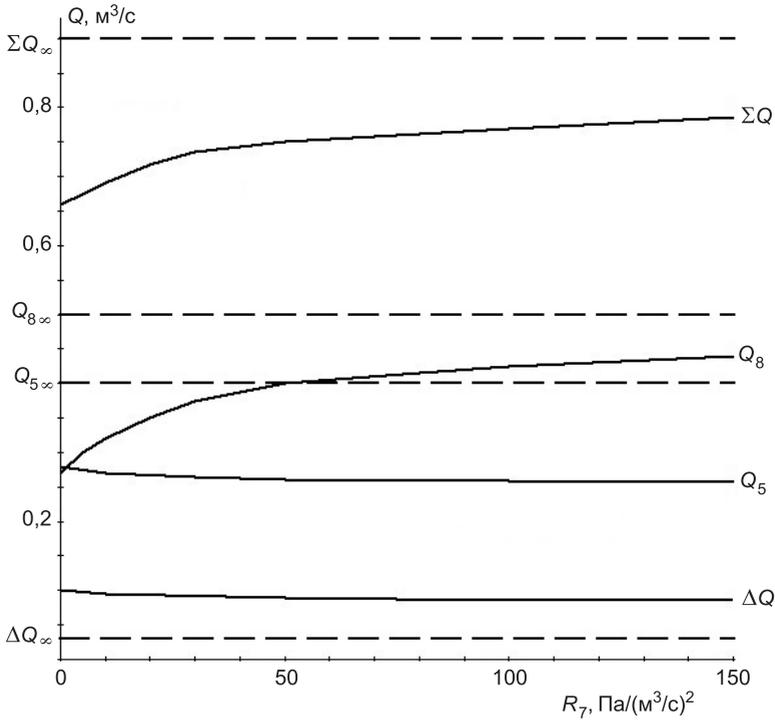


Рис. 17. Изменение расходов воздуха Q_5 , Q_8 , ΔQ и ΣQ от аэродинамического сопротивления R_7 при оборудовании элеватора тремя байпасными каналами

случай 2 — устройство среднего и верхнего байпасов, при этом

$$R_4 = 10^9 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2, R_6 = 10^9 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2, \\ 0,5 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2 \leq R_7 \leq 150 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2;$$

случай 3 — устройство нижнего и верхнего байпасов, при этом

$$R_4 = R_6 = 25 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2 \text{ и} \\ 0,5 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2 \leq R_7 \leq 150 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2.$$

На рис. 17 приведены графики изменения расходов воздуха для одной возможной схемы устройств трех байпасов: нижнего, среднего и верхнего, при этом

$$R_4 = 25 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2, R_6 = 25 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2, \\ 0,5 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2 \leq R_7 \leq 150 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2.$$

Как видно из графиков, устройство байпасов заметно уменьшает суммарный объем воздуха, поступающего через неплотности неаспирируемых укрытий питателя и головки элеватора:

$$\sum Q = Q_5 + Q_8 + \Delta Q,$$

где $\Delta Q = Q_2 - Q_1$.

Так при устройстве одного байпаса наибольший эффект в рассматриваемом примере дает устройство верхнего байпаса (см. рис. 15): при $R_7 = 25 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$ ($R_6 = R_7 = 10^9$) суммарный объем воздуха

$$\sum Q_b = \frac{0,79}{0,9} \sum Q_\infty = 0,88 \sum Q_\infty,$$

т.е. в 1,14 раза меньше, чем при отсутствии байпасов. Еще заметнее эффект для случая оборудования элеватора двумя байпасами — верхним и нижним (см. рис. 15): при $R_4 = 25 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$, $R_6 = 10^9 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$ и $R_6 = 25 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$ суммарный объем воздуха $\sum Q_{\text{нв}} = \frac{0,66}{0,9} \sum Q_\infty = 0,73 \sum Q_\infty$, т.е. в 1,37 раза меньше, чем для случая аспирации без устройства байпасов.

Устройство трех байпасов в данном случае нецелесообразно, так как при $R_4 = R_6 = R_7 = 25 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$ имеем

$$\sum Q_{\text{нвс}} = \frac{0,73}{0,9} \sum Q_\infty = 0,81 \sum Q_\infty,$$

т.е. эффективность меньше, чем при устройстве двух — нижнего и верхнего байпасов. Объясняется это увеличением перетекания воздуха из верхнего укрытия (головки элеватора) в нижнее (укрытие башмака элеватора) при снижении разрежения в верхнем укрытии до 2,1 Па ($h_b = 5,6 \text{ Па}$ для случая нижнего и верхнего байпаса). При этом величина ΔQ увеличилась с 0,046 м³/с, для случая двух байпасов, до 0,093 м³/с при трех байпасах.

Что касается объемов аспирации, то эффект байпасирования будет выглядеть скромнее. Так, для случая устройства нижнего и верхнего байпасов в рассматриваемом примере:

$$Q_a = \sum Q_{\text{нв}} + Q_n + Q_k = 0,66 + \sqrt{\frac{5}{36}} + \sqrt{\frac{5}{40}} = 0,66 + 0,73 = 1,39 \text{ м}^3 / \text{с},$$

а при отсутствии байпасов: $Q_{a\infty} = \sum Q_\infty + Q_n + Q_k = 0,9 + 0,73 = 1,63 \text{ м}^3 / \text{с}$, т.е. на 17 % больше.

Следует отметить, что указанные величины могут быть и выше. Разработанные методология расчета и программы дают возможность в каждом конкретном случае сделать оценку эффекта на стадии проектирования, что позволяет выбрать рациональные схемы аспирации и байпасирования элеваторных перегрузок сыпучего материала.

5. Выводы. 1. На основании анализа известных аэродинамических характеристик конструктивно близких аналогов (диафрагм, шиберов, геометрических тел) можно сделать вывод о том, что коэффициент лобового сопротивления ковша (ζ_k) зависит не только от его геометрической формы и величины зазора между движущимся ковшом и кожухом элеватора, но и от направления относительной скорости движения воздуха (см. рис. 2). При обтекании ковша с тыльной стороны величина ζ_k может быть определена по аналогии с диафрагмой со срезанными по потоку краями. При свободном натекании воздуха в открытое отверстие ковша

его коэффициент в несколько раз выше. Однако преобладающее влияние на величину коэффициента ζ_k оказывают стесненные условия обтекания воздуха — величина зазора между стенками кожуха элеватора и ковшами. Совокупное влияние формы, степени загрузки ковшей и условия их обтекания следует определять экспериментально.

2. Схемы аспирации элеваторных перегрузок сыпучего материала должны учитывать преобладающее влияние эжекционных сил в каналах. Нисходящее действие эжекционного напора в желобах и преобладающая эжекционная характеристика холостой ветви с пустыми ковшами определяют применение классической схемы аспирации (см. рис. 3): устройство местных отсосов воздуха от укрытия башмака элеватора и от укрытия места загрузки принимающего (верхнего) конвейера или от полости принимающего бункера.

3. В качестве базовых соотношений по составлению балансовых уравнений воздухообмена аспирируемых укрытий (с целью определения необходимых объемов аспирации) может служить система уравнений динамики воздуха в четырех каналах (36)–(39) (или (41)–(44)): в загрузочном и разгрузочном желобах и в кожухе рабочей и холостой ветвей конвейера элеватора.

4. Объемы аспирации классической схемы аспирации элеваторной перегрузки определяются балансовыми уравнениями (45) и (46). Основными составляющими этих уравнений являются объемные расходы воздуха, поступающие в аспирируемые укрытия через неплотности и рабочие проемы под действием разрежения (создаваемого в укрытиях аспирационной установкой), и расходы воздуха, перетекаемого по каналам.

5. Определение расходов перетекаемого воздуха Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 можно осуществить по алгоритму, основанному на решении системы нелинейных уравнений (41)–(44) с помощью совместного использования методов итерации и бисекции.

6. Анализ результатов расчета примерного («стандартного») узла показал, что при росте разрежения в укрытии башмака и уменьшении площади неплотностей в укрытии головки элеватора растет разрежение в последнем (h_b), в результате чего расходы эжектируемого воздуха в загрузочном (Q_0) возрастают (см. рис. 4) и снижаются в разгрузочном желобе (Q_3) (см. рис. 5). Аналогично изменяется и суммарный расход воздуха в кожухах элеватора ($\Delta Q = Q_2 - Q_1$): растет с увеличением h_n и уменьшается при росте R_b . Отличительные закономерности перетекания воздуха по каналам сказываются и на объемах аспирации: необходимый расход воздуха в местном отсосе укрытия башмака элеватора (Q_e) увеличивается, а объем аспирации от укрытия верхнего конвейера (Q_a) уменьшается с ростом h_n (см. рис. 6, а), в то время как при увеличении степени герметизации эти расходы уменьшаются (см. рис. 6, б). Однако общий расход аспирируемого воздуха остается достаточно высок: даже при небольшом разрежении в укрытии башмака ($h_n = 16,8$ Па) и хорошей герметизации укрытия головки элеватора ($R_b = 14,4$ Па / (м³/с)²) суммарный объем аспирации для примерного узла составляет 2,06 м³/с.

7. Необходимую производительность аспирационной системы можно существенно снизить не только путем уменьшения оптимальной величини

ны разрежения в укрытиях и их герметизации, но и организацией замкнутой циркуляции эжектируемого воздуха с помощью байпасных каналов.

8. Закономерности перетекания и циркуляции воздуха при оборудовании перегрузки сыпучего материала с конвейера на конвейер байпасным каналом, соединяющим внутреннюю камеру укрытия с двойными стенками с укрытием приводного барабана (см. рис. 7), можно исследовать с помощью уравнений потерь давления в каналах (47)–(51) и балансовых уравнений расхода воздуха для укрытий и узлов слияния (52)–(54). Анализ этих закономерностей показал, что условием эффективной работы байпасного канала является превышение величины разрежения в укрытии верхнего неаспирируемого конвейера над величиной разрежения буферной (внутренней) камеры (55) или (57). Эта камера повышает надежность работы байпаса по схеме циркуляции, а не по схеме параллельного перетекания воздуха, увеличивающего суммарный объем притока воздуха из верхнего укрытия в нижнее и приводящего к росту необходимых объемов аспирации.

9. Анализ результатов численного решения уравнений (61) с учетом (60) для примерного конвейерного перегрузочного узла показал, что при отсутствии байпаса расход воздуха $Q_{y\infty}$, поступающего из внутренней камеры укрытия во внешнюю камеру укрытия с двойными стенками, заметно выше, чем при оборудовании узла байпасным каналом (Q_y). Чем выше сопротивление внутренних стенок укрытия и больше поперечное сечение байпаса ($R_0 < 20$), тем заметнее отклонение расходов Q_y и $Q_{y\infty}$ (см. рис. 8).

Расход воздуха Q_6 , поступающего по байпасному каналу перегрузочного узла, увеличивается с ростом сопротивления буферной (внутренней) камеры и снижения аэродинамического сопротивления байпаса (см. рис. 9 и 11). При плохой герметизации верхнего (неаспирируемого) укрытия ($R_n \leq 5 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$) и небольшом сопротивлении перегородок ($R_y < 20 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$) возможно изменение направления движения воздушного потока в байпасном канале ($Q_6 < 0$). Зона «отрицательного» течения воздуха в канале увеличивается до $R_y = 40 - 90 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$ при росте разрежения в укрытии конвейера до 20 Па (см. рис. 13). Для предотвращения появления такой зоны необходимо увеличить герметизацию верхнего укрытия (см. рис. 10). При увеличении сопротивления буферной камеры (при $R_y > 200 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$) расход рециркулируемого воздуха Q_6 достигает 60 % от $Q_{ж}$.

Расход воздуха $Q_{ж}$, поступающего по желобу при наличии байпаса, больше расхода $Q_{ж\infty}$ воздушного потока в этом желобе при отсутствии байпаса (см. рис. 8). Это объясняется тем, что формируемый в желобе эжекционный напор служит своеобразным нагнетателем (вентилятором), работающим на параллельную сеть двух каналов — байпасного канала и проема между внутренними стенками укрытия и конвейерной лентой верхнего конвейера, обладающих меньшим аэродинамическим сопротивлением, чем каждый из этих каналов. Поэтому корректнее степень рециркуляции байпасного канала характеризовать отношением $Q_6 / Q_{ж\infty}$.

10. Наибольший эффект снижения объемов аспирации перегрузочного узла, оборудованного байпасным каналом, достигается хорошей герметизацией укрытий и наличием в нижнем укрытии буферной камеры с повышенным аэродинамическим сопротивлением. В рассмотренном примере при $R_y = 100 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$ и небольшом сопротивлении байпасного канала $R_6 = 25 \text{ Па} / (\text{м}^3 / \text{с})^2$ расход воздуха Q_y составляет 70 % от $Q_{\text{жос}}$, т.е. снижается по сравнению с узлом без байпаса в 1,428 раза.

11. Для снижения объемов аспирации элеваторного перегрузочного узла возможно применение трех байпасных каналов (см. рис. 14, а), обеспечивающих за счет перетекания воздуха уменьшение разрежения в неаспирируемых укрытиях питателя и головки элеватора. Количественный анализ расходов воздуха можно осуществить на основе системы уравнений (77)–(83) о потерях давления в кольцах аэродинамического аналога узла (см. рис. 14, б). Решение этой системы нелинейных уравнений осуществлено численно по разработанному алгоритму на основе совместного применения методов итерации и бисекции.

Анализ полученных результатов для «стандартного» элеватора (см. рис. 15–17) показал, что наибольший эффект снижения объемов воздуха (ΣQ), поступающего через неплотности неаспирируемых укрытий, достигается при устройстве двух байпасов: нижнего, соединяющего укрытие питателя и буферную камеру перед укрытием башмака элеватора, и верхнего, соединяющего укрытие головки элеватора и внутреннюю камеру укрытия с двойными стенками верхнего (принимающего) конвейера. Суммарный расход ΣQ для рассмотренного примера оказался в 1,37 раза меньше ΣQ_x (соответствующего случая аспирации при тех же технологических и конструктивных параметрах узла, но при отсутствии байпасных каналов).

В каждом конкретном случае эффект может отличаться от приведенного, который можно определить с использованием разработанной программы на стадии проектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Л о г а ч е в, И.Н. Разработка способов снижения объема аспирации при перегрузках сыпучих материалов ковшовыми элеваторами. С о о б щ е н и е 1. Особенности расчетной схемы аспирации элеваторных перегрузок [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова, Е.И. Толмачева // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 2. — С. 46–56.
2. Л о г а ч е в, И.Н. Разработка способов снижения объема аспирации при перегрузках сыпучих материалов ковшовыми элеваторами. С о о б щ е н и е 2. Снижение объемов аспирации [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова, Е.И. Толмачева // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 3. — С. 42–51.
3. Л о г а ч е в, И.Н. Эжекция воздуха при перегрузках сыпучих материалов в вертикальных каналах с ковшами. С о о б щ е н и е 2. Эжектирующие свойства ленточного ковшового элеватора [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 10. — С. 38–47.
4. Л о г а ч е в, И.Н. Эжекция воздуха при перегрузках сыпучих материалов в вертикальных каналах с ковшами. С о о б щ е н и е 3. Обсуждение результатов исследований [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 1. — С. 66–74.

ЛОГАЧЕВ Иван Николаевич, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ЛОГАЧЕВ Константин Иванович, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

АВЕРКОВА Ольга Александровна, канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ТОЛМАЧЕВА Елена Игоревна, инж.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 14.02.14

Logachev Ivan Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Logachev Konstantin Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Averkova Olga Alexandrovna, candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Tolmacheva Elena Igorevna, engineer, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

DEVELOPMENT OF METHODS FOR REDUCING THE VOLUME OF ASPIRATION DURING OVERLOADS OF GRANULAR MATERIALS BY BUCKET ELEVATORS

Message 3. THE RESULTS OF CALCULATIONS AND DISCUSSION

The schemes of aspiration of elevator overloads have been developing. Balance equations of ventilation of aspiration covers are compiled. The system of equations for determination of the volumes of ventilating air for a standard node overload are formulated and solved. Ways of reducing productivity of aspiration systems are offered and analytically substantiated.

Key words: aspiration, bulk material transfer, air suction.

REFERENCES

1. Logachev, I.N. Development of methods for reducing the volume of aspiration during overloads of granular materials by bucket elevators. Message 1. Features of the settlement scheme aspiration of elevator overloads [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev, O.A. Averkova, E.I. Tolmacheva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 2. — P. 46–56.
2. Logachev, I.N. Development of methods for reducing the volume of aspiration during overloads of granular materials by bucket elevators. Message 2. The decrease in volumes of aspiration [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev, O.A. Averkova, E.I. Tolmacheva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 3. — P. 42–51.
3. Logachev, I.N. The ejection of air during overloads of granular materials in a vertical channels with ladles. Message 2. Ejected characteristics of belt-and-bucket elevator [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev, O.A. Averkova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 10. — P. 38–47.
4. Logachev, I.N. The ejection of air during overloads of granular materials in a vertical channels with ladles. Message 3. Discussion of research results [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev, O.A. Averkova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 1. — P. 66–74.

УДК 697.95-5.628.87

А.Г. РЫМАРОВ, В.В. САВИЧЕВ

**К РАСЧЕТУ ТРЕБУЕМОГО ВОЗДУХООБМЕНА
В ПОМЕЩЕНИЯХ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЛИЧЕСТВА ЧЕЛОВЕК**

Рассматривается проблема необходимости изменения существующих норм воздухообмена, связанных с количеством наружного воздуха, подаваемого в помещения общественно-го здания в зависимости от количества людей. Чистый наружный воздух в городах — редкость. Загрязненный наружный воздух приводит к росту требуемого воздухообмена, что не учитывается в нормах. Проблема может быть решена увеличением площади, приходящейся на человека в офисе административного здания, что позволит уменьшить общее поступление углекислоты в воздух помещения без увеличения требуемого воздухообмена.

Ключевые слова: воздухообмен помещения, концентрация углекислого газа, вентиляция общественных зданий.

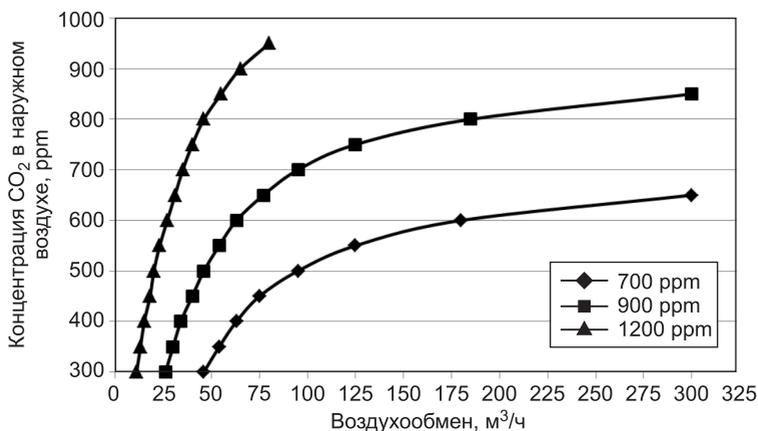
Современные офисные здания — это совокупность помещений, где за столами работают люди, количество которых регламентируется нормами из расчета от 4 до 6 м² на человека, что регулируется нормами СНиП 31-05–2003 «Общественные здания административного назначения» и СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Качество офиса и работоспособность сотрудников в частности определяется параметрами микроклимата и концентрацией вредных примесей в воздушной среде помещения, которая зависит от воздухообмена, формируемого приточно-вытяжной механической системой вентиляции [1].

Требуемый воздухообмен необходим для создания комфортного санитарно-гигиенического состояния воздушной среды в помещении в течение всего рабочего дня с учетом изменяющихся во времени концентраций вредных примесей в наружном воздухе [2]. Индикатором качества загрязненности воздуха в помещениях общественных зданий и в наружном воздухе принят СО₂ [3], так как его изменение можно спрогнозировать [2]. Неудовлетворительное экологическое состояние воздушной среды в городах, улицы которых заполнены автотранспортом, приводит к ухудшению качества воздуха в зданиях. Нормируемое минимальное количество наружного воздуха, которое следует подавать на человека в рабочее время согласно СНиП 41-01–2003 (приложение М), составляет 60 м³/ч или согласно СНиП 31-05–2003 (п. 8.5) не менее 20 м³/ч, что относится к помещениям общественных зданий административного назначения, где есть возможность открывать окна для проветривания при одновременной работе системы вентиляции.

Европейский стандарт EN 13779 предлагает принимать концентрацию углекислого газа наружного воздуха в сельской местности 350 ppт, в небольших городах 400 ppт, в центрах городов 450 ppт. В стандарте АВОК «Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена» в качест-

ве рекомендуемой величины предлагается концентрация углекислоты в наружном воздухе: сельская местность — 332 ppт (650 мг/м³), малые города — 409 ppт (800 мг/м³), большие города — 511 ppт (1000 мг/м³), при этом в реальной ситуации в центре городов Москва и Санкт-Петербург эта величина близка к 1000 ppт, а в час пик и больше.

На примере офиса площадью 1000 м², с количеством людей 150 человек (6,7 м² на человека), с массовым расходом выделяемого СО₂ взрослыми людьми, занимающимися умственной работой, 45 г/ч, проведены расчеты воздухообмена на основе точечной модели газового режима помещения [4]. На рисунке представлены графики, позволяющие определить количество наружного воздуха, подаваемого на одного человека в помещение, в зависимости от концентрации СО₂ в наружном воздухе для трех уровней качества воздуха помещений (высокий — 700 ppт, средний — 900 ppт, низкий — 1200 ppт). Следовательно, при количестве людей исходя из 6 м² на человека требуемый воздухообмен возрастает на 12 %, а при количестве людей исходя из 4 м² на человека — на 68 %. Из рисунка видно, что грязный наружный воздух приводит к росту требуемого воздухообмена на одного человека, подаваемого в помещение.



Зависимость воздухообмена от величины концентрации СО₂ в наружном воздухе

Анализ графиков показывает, что при сочетании концентрации углекислоты в помещении 700 ppт и в наружном воздухе 300 ppт воздухообмена на одного человека достаточно в количестве 12 м³/ч, а при концентрации углекислоты в наружном воздухе 600 ppт воздухообмен на одного человека увеличивается до 25 м³/ч. При выборе худшего газового режима в помещении с концентрацией углекислоты 900 ppт и на улице 300 ppт воздухообмен возрастает до 25 м³/ч, а при росте загрязнения наружного воздуха до 600 ppт — до 63 м³/ч. Для самой худшей концентрации углекислоты в помещении 1200 ppт и на улице 300 ppт воздухообмен на одного человека увеличивается до 50 м³/ч, а при загрязненном наружном воздухе до величины 600 ppт — до 175 м³/ч.

Полученные величины воздухообмена 12 и 25 м³/ч меньше нормативной 60 м³/ч — это случаи, когда воздух в помещении и на улице условно чистый. Величина воздухообмена 50 и 63 м³/ч — близка к норма-

тивному воздухообмену, с условно средним качеством воздушной среды. Величина воздухообмена, равная $175 \text{ м}^3/\text{ч}$ на человека, значительно превышает нормативный воздухообмен — это урбанизированная городская среда, где превышение нормативного воздухообмена составляет более чем 2 раза. Сильно загрязненный воздух ведет к росту энергетических затрат на нагрев большего количества приточного воздуха в холодный период года, однако при этом снижение концентрации углекислоты ниже предельно допустимой концентрации (ПДК) в помещении должно выполняться.

Другой способ решения проблемы — это увеличение площади, приходящейся на человека в административном или общественном здании. Чем грязнее уличный воздух, тем больше площадь должна приходиться в офисе на одного работника, предел этого действия — величина концентрации в наружном воздухе, равная ПДК и выше, когда вентиляция не нужна и должна быть отключена, а сотрудники эвакуированы [4].

Основываясь на изложенном выше, можно сделать вывод, что руководствоваться при проектировании механической системы вентиляции общественных зданий имеющимися значениями воздухообмена на одного человека неверно. Целесообразно при расчетах учитывать загазованность улиц городов. Применение воздухообмена $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ на человека экономит капитальные и эксплуатационные расходы, но теряются доходы от болезней людей, которые дышат загрязненным воздухом. Открыть окно несложно, но в морозы это приведет к простудам, да и очистить от грубой пыли и аэрозолей поступающий через открытое окно воздух нельзя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рымаров, А.Г. Газовый режим здания [Текст] / А.Г. Рымаров // Естественные и технические науки. — 2012. — № 6. — С. 595–599.
2. Рымаров, А.Г. Прогнозирование параметров воздушного, теплового, газового и влажностного режимов помещений здания [Текст] / А.Г. Рымаров // Academia. Архитектура и строительство. — 2009. — № 5. — С. 362–364.
3. Рымаров, А.Г. Исследование изменения концентрации углекислого газа в помещении [Текст] / А.Г. Рымаров, П.Ю. Сырых // Материалы Второй международной научно-практической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции», 21–23 нояб. 2007 г., МГСУ. — М., 2007. — С. 186–187.
4. Титов, В.П. Методы единой технологической системы для оптимизации энергопотребления и повышения экологической безопасности здания [Текст] / В.П. Титов, А.Г. Рымаров // Изв. вузов. Строительство. — 1997. — № 9. — С. 76.

*РЫМАРОВ Андрей Георгиевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: ryumarov@yandex.ru
Московский государственный строительный университет*

САВИЧЕВ Виталий Валерьевич, канд. техн. наук, ст. препод.; E-mail: vsavichev@mail.ru

Московский государственный строительный университет

Получено 13.02.14

Ryumarov Andrey Georgievich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: ryumarov@yandex.ru, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Russia

Savichev Vitaliy Valerievich, candidate of technical sciences, senior lecturer; E-mail: vvsavichev@mail.ru, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Russia

TO CALCULATE THE REQUIRED AIR EXCHANGE IN ROOMS OF PUBLIC BUILDINGS DEPENDING ON THE NUMBER OF PEOPLE

Describes how to change existing norms of air exchange with the amount of outdoor air supplied into the premises of a public building, depending on the number of people. Clean outside air in cities today. Polluted outside air leads to an increase in the required air exchange that does not take into account the norms. The problem can be solved in the square of the one person in the office building, which will reduce the overall flow of carbon dioxide into the air space without increasing the ventilation rate.

Key words: ventilation, carbon dioxide concentration, ventilation of public buildings.

REFERENCES

1. R y m a r o v, A.G. Gas mode building [Text] / A.G. Rymarov // Natural et tehcnical sciences. — 2012. — N 6. — P. 595–599.
2. R y m a r o v, A.G. Prediction of air, heat, gas and humidity regimes building [Text] / A.G. Rymarov // Academia. Architectura et Construction. — 2009. — N 5. — P. 362–364.
3. R y m a r o v, A.G. Study on the changes in the concentration of carbon dioxide indoors [Text] / A.G. Rymarov, P.Yu. Syrych // Proceedings of the second international scientific-practical conference «Theoretical bases of heat and gas supply and ventilation», 21–23 november 2007, MGSU. — Moscow, 2007. — P. 186–187.
4. T i t o v, V.P. Methods of uniform technological systems to optimize energy consumption and improve environmental safety building [Text] / V.P. Titov, A.G. Rymarov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 1997. — N 9. — P. 76.

УДК 697.13

В.А. БРОЙДА

ГОДОВОЙ РАСХОД ТЕПЛА НА ВЕНТИЛЯЦИЮ ЗДАНИЙ

Представлен относительно простой и достаточно универсальный метод расчета годовых затрат тепла для прямоточной и рециркуляционной вентиляции, а также вентиляции с утилизацией тепла удаляемого воздуха. Расчет затрат тепла базируется на представлении о годовом изменении температуры наружного воздуха в форме гармонического уравнения. Суточное изменение температуры наружного воздуха также моделируется гармоническими колебаниями.

Ключевые слова: расход, рециркуляция, утилизация тепла.

Затраты тепла на нагревание вентиляционного воздуха — наиболее значительная статья расхода тепловой энергии для обеспечения микроклимата. Выбор энергоэкономичного решения основывается на умении оценивать годовые расходы тепла для разных вариантов системы вентиляции. Расчет годовых затрат тепловой энергии на вентиляцию опирается на климатические данные об изменении температуры наружного воздуха t_n , которые могут быть представлены в виде продолжительности стояния температуры наружного воздуха ΔZ . Такой подход наиболее точен, но и более трудоемок, так как требует для каждого населенного пункта индивидуального описания функции $t_n = f(\Delta Z)$, ее численного интегрирования.

Другой способ — это описание годового хода среднесуточной температуры наружного воздуха гармоническими колебаниями вокруг среднегодовой температуры T_r с амплитудой A_r :

$$t_n = T_r - A_r \cos(z), \quad (1)$$

где z — относительное годовое время,

$$z = Z \cdot 2\pi / 365, \text{ рад};$$

Z — время, отсчитываемое от годового минимума температуры, сут. Эта модель более универсальна, форма представления климатической информации для всех населенных пунктов единая, что позволяет получить общие формулы для вычисления расхода тепла.

Нагревание наружного воздуха необходимо, когда его температура t_n ниже требуемого значения $t_{тр}$, которое зависит от технологии обработки воздуха, это может быть вентиляция: прямоточная, с рециркуляцией, с утилизацией тепла удаляемого воздуха. При $t_n \geq t_{тр}$ нагревание воздуха не требуется, это режим простого вентилирования — замены воздуха помещения наружным воздухом.

В силу симметрии гармонической функции t_n , достаточно рассматривать только половину ее периода, тогда годовые затраты тепла на нагревание вентиляционного воздуха выражаются формулой, ГДж:

$$Q_r = 10^{-9} \cdot Gcn24 \cdot 365 / \pi \int_0^{z_1} (t_{тр} - \cos(z)) dz = \quad (2)$$

$$= 2,81 \cdot 10^{-3} \cdot Gn((t_{тр} - T_r)z_1 + A_r \sin(z_1)),$$

где G — расход нагреваемого воздуха, кг/ч;
 c — теплоемкость воздуха, $c = 1006$ Дж/(кг · К);
 z_1 — граница полупериода нагревания воздуха, рад;
 n — коэффициент, учитывающий продолжительность работы вентиляции в течение суток $X_2 - X_1$, ч, и число рабочих дней в неделе m ,

$$n = m(X_2 - X_1) / 168, \quad (3)$$

$$z_1 = \arccos((T_r - t_{тр}) / A_r). \quad (4)$$

Продолжительность периода нагревания, сут, составляет:

$$\Delta Z_c = 365z_1 / \pi, \quad (5)$$

а число рабочих часов системы вентиляции за год:

$$\Delta Z_{ч} = \Delta Z n 24. \quad (6)$$

Формулы (2)–(6) используются как наиболее общие, их можно конкретизировать для различных ситуаций и технологий обработки воздуха.

В том случае, когда система работает часть суток, к величине t_n следует ввести поправку Δt , которая учитывает повышение дневной и понижение ночной температуры относительно ее среднесуточного значения. Считается, что изменение температуры в течение суток также описывается гармоническими колебаниями с амплитудой A_c около среднесуточного значения, тогда

$$\Delta t = \frac{A_c}{X_2 - X_1} \int_{X_1}^{X_2} \cos(X\pi / 12) dX. \quad (7)$$

После интегрирования и применения формулы разности синусов Δt приводится к удобному виду [1]:

$$\Delta t = A_c k_1 k_2 \quad (\text{табл. 1}).$$

Таблица 1. Значения коэффициентов k_1 и k_2

Коэффициент	k_1 для продолжительности рабочего периода $X_2 - X_1$, ч k_2 для середины рабочего периода, $(X_2 - X_1) / 2$, ч									
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
k_1	0,95	0,9	0,83	0,74	0,64	0,53	0,41	0,3	0,19	0,09
k_2	0,50	0,0	-0,5	-0,87	-1,0	-0,87	-0,5	0,0	0,50	0,86

В СП [2] приведены удвоенные величины суточных амплитуд для наиболее холодного $2a_x$ и теплого $2a_t$ месяца, в качестве расчетной величины A_c можно принять их среднее арифметическое значение

$$A_c = (a_x + a_t) / 2. \quad (8)$$

Поскольку величина $A_c k_1 k_2$ не зависит от годового времени z , можно, внося коррективы, пользоваться формулами (2)–(6). При круглосуточной работе системы вентиляции $A_c k_1 k_2 = 0$.

Обозначим климатические параметры, получаемые из нормативно-справочной литературы [2]: t_g — годовая температура, a_g — амплитуда ее отклонения от годового значения. Для определения величин t_g и a_g можно использовать среднемесячные значения температуры за наиболее холодный $t_{\text{январь}}$ и наиболее теплый $t_{\text{июль}}$ месяцы, тогда $t_g = (t_{\text{январь}} + t_{\text{июль}})/2$, $a_g = (t_{\text{январь}} - t_{\text{июль}})/2$.

Несколько более точные значения величин t_g и a_g можно получить исходя из продолжительности отопительного периода $\Delta Z_{\text{от}}$ и средней температуры за отопительный период $t_{\text{от}}$, период с предельной температурой $t_{\text{пр}}$ (обычно $t_{\text{пр}} = 8$ или 10 °С).

$$a_g = \frac{t_{\text{пр}} - t_{\text{от}}}{\frac{\sin(\Delta Z_{\text{от}}\pi / 365)}{\Delta Z_{\text{от}}\pi / 365} - \cos(\Delta Z_{\text{от}}\pi / 365)}; \quad (9)$$

$$t_g = t_{\text{пр}} + a_g \cos(\Delta Z_{\text{от}}\pi / 365). \quad (10)$$

Далее следует учитывать технологию обработки воздуха.

Прямоточная система вентиляции. Требуемая температура нагрева равна температуре приточного воздуха, которая определяется при расчете или построении процесса обработки воздуха в холодный период года $t_{\text{тр}} = t_{\text{п}}$.

Система вентиляции с рециркуляцией. В таких системах обработка воздуха может производиться двумя способами: нагревание минимального количества наружного воздуха $G_{\text{н}}$, а затем смешивание с воздухом из помещения; смешивание минимального количества наружного воздуха с воздухом из помещения, а затем нагревание общего количества воздуха G . По затратам тепла эти два способа одинаковы, поэтому рассмотрим первый из них. Отличие от прямоточного способа заключается в том, что нагревается только минимальный расход воздуха $G_{\text{н}}$ до конечной температуры $t_{\text{тр}}$, которая определяется при расчете или построении такого варианта рециркуляционной обработки. Если используется второй вариант, нужное значение $t_{\text{тр}}$ вычисляется по формуле:

$$t_{\text{тр}} \approx t_y - (t_y - t_{\text{п}})G / G_{\text{н}}, \quad (11)$$

где t_y — температура воздуха, забираемого на рециркуляцию, °С.

Вентиляция с утилизацией тепла удаляемого воздуха. Температурная эффективность утилизации тепла E_T зависит от условий работы системы. Оказывают влияние изменяющиеся параметры наружного и удаляемого воздуха, изменение соотношения расходов нагреваемого и удаляемого воздуха. Для систем с постоянным соотношением расходов при невысокой влажности внутреннего воздуха, типичной для большинства помещений в холодный период года, в которых отсутствуют заметные источники влаги, приближенно можно считать величину E_T постоянной.

В табл. 2 приведены расчетные формулы, учитывающие особенность технологии обработки воздуха. Полученные результаты демонстрирует пример расчета.

Рассчитать затраты тепла на нагревание $G = 5000$ кг/ч воздуха при климате г. Казани [2]: $t_{\text{пр}} = 8$ °С, $t_{\text{от}} = -4,8$ °С, $\Delta Z_{\text{от}} = 208$ сут, $a_x = 6,5/2 = 3,25$ °С, $a_r = 9,9/2 = 4,95$ °С. Температуры: $t_{\text{в}} = 18$ °С, $t_{\text{п}} = 14$ °С, $t_y = 20$ °С. Система работает $m = 6$ дней в неделю, время работы с $X_1 = 7$ до $X_2 = 19$ ч.

Таблица 2. Формулы для расчета годового расхода тепла на вентиляцию

Расчетные величины	Технология вентиляции		
	прямоточная	рециркуляция	утилизация тепла
G , кг/ч	G	G_H	G
$t_{тр}$, °C	$t_{п}$	$t_{тр}$	$t_{п}$
T_r , °C	$t_r - A_c k_1 k_2$	$t_r - A_c k_1 k_2$	$(1 - E_r)(t_r - A_c k_1 k_2) + E_r t_y$
A_r , °C	a_r	a_r	$(1 - E_r) a_r$
z_1 , рад	$z_1 = \arccos((T_r - t_{тр})/A_r)$ (4)		
Q_r , ГДж	$Q_r = 2,81 \cdot 10^{-3} \cdot G n ((t_{тр} - T_r) z_1 + A_r \cdot \sin(z_1))$ (2)		
ΔZ_c , сут	$\Delta Z_c = 365 \cdot z_1 / \pi$ (5)		
$\Delta Z_{ч}$, ч	$\Delta Z_{ч} = \Delta Z_n \cdot 24$ (6)		

Решение.

1. Амплитуды суточных колебаний температуры наружного воздуха A_c вычисляются по формуле (8):

$$A_c = (3,25 + 4,95) / 2 = 4,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2. По формулам (9) и (10) определяются a_r и t_r :

$$a_r = \frac{8 - (-4,8)}{\frac{\sin(208\pi / 365)}{208\pi / 365} - \cos(208\pi / 365)} = 16,78 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$t_r = 8 + 16,78 \cos(208\pi / 365) = 4,35 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3. $X_2 - X_1 = 12$ ч, $(X_1 + X_2) / 2 = 13$ ч, по табл. 1 находятся $k_1 = 0,64$, $k_2 = -0,93$, вычисляется величина $A_c k_1 k_2 = 4,1 \cdot 0,64 \cdot (-0,93) = -2,4 \text{ } ^\circ\text{C}$.

4. Коэффициент n рассчитывается по формуле (3): $n = 6 \cdot 12 / 168 = 0,43$.

5. Результаты расчета годовых затрат тепла представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета годового расхода тепла

Расчетные величины	Технология вентиляции		
	прямоточная	рециркуляция	утилизация тепла
G , кг/ч	5000	3000	5000
$t_{тр}$, °C	14	$20 - (20 - 14) \times 5000 / 3000 = 10$	14
T_r , °C	$4,35 - (-2,4) = 6,75$	$4,35 - (-2,4) = 6,75$	$(1 - 0,6) \cdot (6,75) + 0,6 \cdot 20 = 14,7$
A_r , °C	16,78	16,78	$(1 - 0,6) \cdot 16,78 = 6,71$
z_1 , рад	$\arccos(6,75 - 14) / 16,78 = 2,01$	$\arccos(6,75 - 10) / 16,78 = 1,77$	$\arccos(14,7 - 14) / 6,71 = 1,47$
Q_r , ГДж	$2,81 \cdot 10^{-3} \cdot 5000 \cdot 0,43 \times ((14 - 6,75) \cdot 2,01 + 16,78 \cdot \sin(2,01)) = 179,8$	$2,81 \cdot 10^{-3} \cdot 3000 \cdot 0,43 \times ((10 - 6,75) \cdot 1,77 + 16,78 \cdot \sin(1,77)) = 80,5$	$2,81 \cdot 10^{-3} \cdot 5000 \cdot 0,43 \times ((14 - 14,7) \cdot 1,47 + 6,71 \cdot \sin(1,47)) = 34,1$
ΔZ_c , сут	$365 \cdot 2,01 / \pi = 233$	$365 \cdot 1,77 / \pi = 206$	$365 \cdot 1,47 / \pi = 171$
$\Delta Z_{ч}$, ч	$233 \cdot 0,43 \cdot 24 = 2405$	$206 \cdot 0,43 \cdot 24 = 2126$	$171 \cdot 0,43 \cdot 24 = 1765$

Из результатов расчета следует, что уменьшение годовых затрат тепла при использовании рециркуляции связано не только с уменьшением расхода наружного воздуха, а при использовании утилизации тепла не только с величиной эффективности, но и сокращением времени потребления тепла.

Полученные зависимости достаточно просто дают возможность оценивать затраты тепловой энергии на осуществление той или иной технологии обработки воздуха. Это позволяет проводить сравнение вариантов, выбирать наиболее рациональный способ и реализовывать энергосберегающие варианты решения систем вентиляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кувшинов, Ю.Я. Расчет годовых расходов энергии системами вентиляции и кондиционирования воздуха [Текст] / Ю.Я. Кувшинов // АВОК. — 2006. — № 7. — С. 20–26.
2. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная версия СНиП 23-01-99*, Минрегион России [Текст]. — М. : ФАУ «ФЦС», 2012. — 109 с.

*БРОЙДА Владимир Аронович, канд. техн. наук, доц.
Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 18.02.14

Broyda Vladimir Aronovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

ANNUAL HEAT CONSUMPTION FOR VENTILATION OF BUILDINGS

This paper presents a relatively simple and fairly universal method for calculating annual heat consumption for direct flow and recirculation ventilation, also for ventilation with exhaust air heat recovery. Heat consumption calculations are based on the representation of annual variation of outdoor temperature in the form of a harmonic equation. Daily outdoor temperature deviations are also modeled as harmonic oscillations.

Key words: airflow, recirculation, heat recovery.

REFERENCES

1. Kuvshinov, Yu.Ja. Calculation of annual energy consumption in the ventilation systems and air conditioning systems [Text] / Yu.Ja. Kuvshinov // AVOK. — 2006. — N 7. — P. 20–26.
2. RB 131.13330.2012. Building Climatology. Updated version SN&R 23-01-99*, Ministry of Regional Development of Russia [Text]. — Moscow : FAU «FCS», 2012. — 109 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

Д.Г. СУВОРОВ, М.С. НИКУЛИН

ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ ТРАМБОВКА С АВТОМАТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫМ РАБОЧИМ ПРОЦЕССОМ

Выполнен анализ структурной системы пневматической трамбовки. Отмечено, что она представляет машину-автомат с двумя приводными механизмами, работающими по автоматической программе. Носителем программы является цилиндрическая кинематическая пара, механическую часть которой составляет цилиндр-поршень машины. При движении поршня относительно цилиндра кинематическая пара выполняет роль распределителя. Распределитель, дискретно включая и отключая соответствующие каналы, программно управляет сервоприводом клапанного устройства и двумя приводными механизмами рабочего и транспортного хода машины. Применение современной микроэлектроники позволяет улучшить технические характеристики машин-автоматов.

Ключевые слова: уплотнение грунтов, автоматические системы, сжатый воздух.

Пневматические трамбовки по своим техническим характеристикам (таблица) имеют необходимый диапазон параметров для проведения ямочного ремонта дорог и грунтов, различного рода засыпок в строительстве. Применяя их, можно получить нормативную плотность засыпаемого материала, которая в отдельных случаях высока и составляет

$$\delta = (0,98-0,99)\delta_{\max},$$

где δ_{\max} — максимальная стандартная плотность материала.

Трамбовка пневматическая	Диаметр поршня, мм	Ход поршня, мм	Энергия удара, Дж	Ударная частота, Гц	Давление сжатого воздуха, МПа	Расход воздуха, м ³ /мин	Масса, кг
ПТ-4	34	75	2,5	15	0,63	0,6	3,0
ПТ-6	40	100	4,0	14	0,63	0,8	6,0
ПТ-9	59	120	25,0	10	0,63	0,8	9,5
ТПВ-5АУ	28	155	4,0	16	0,63	0,4	7,8
ТПВ-8Б	35	205	20,0	12	0,63	0,8	10,2

Эксплуатация механизмов не нуждается в высококвалифицированных рабочих, что важно в условиях современного строительства. Машины позволяют уплотнять самый разнообразный материал (продукты фрезерования, материалы с полимерными добавками, термообработанные битумом) на глубину от 0,2 до 0,5 м.

Основным направлением совершенствования машин является применение современной системы автоматического управления на базе микро-

электроники, которое дает возможность улучшить технические характеристики машин-автоматов и значительно снизить расход сжатого воздуха, который при существующем компрессорном оборудовании имеет высокую стоимость.

При исследовании механизмов манипуляторов исходя из основных понятий и принципов теории механизмов и машин авторами работы [1] был определен **принцип программируемого управления** и выделены две группы приводных механизмов, позволяющих реализовать цикловые траектории, в том числе и многопозиционные перемещения схвата рабочего органа.

1. Первая группа — механизмы с нелинейными функциями положения звеньев, управляемые автоматической системой.

2. Вторая группа — механизмы с линейными функциями положения звеньев, управляемые автоматизированной системой с программированием.

Отличие в работе этих двух механизмов заключается в наличии или отсутствии программного управления.

Проанализируем с помощью структурно-функциональной схемы, выполненной в аспекте второй группы (рис. 1), движения звеньев пневматической машины. Точка M рабочего инструмента имеет прямолинейную траекторию при прямом и обратном ходе. Это движение выполняется пневматическим цилиндром с двумя расширительными двигателями, играющими роль реверсивного привода (см. рис. 1, б). Привод обслуживает механизм прямого (рабочего) хода D_1 и механизм обратного (холостого) хода D_2 . Пространство цилиндров каждого из двигателей делится поршнями на две полости: поршневые РПП- D_1 и РПП- D_2 и запоршневые ЗП- D_1 и ЗП- D_2 . Поршневые полости являются составными элементами тепло-механических систем, в которых при расширении сжатого сетевого воздуха его энергия преобразуется в механическую работу поршней-ударников.

В запоршневых полостях при сравнительно небольшом сжатии (0,01–0,02 МПа) идут процессы вытеснения находящегося в них воздуха в атмосферу. При наличии аккумуляторных камер их зарядка ведется при отключении выхлопного канала от полости. На рис. 1, б представлен механизм при компоновке двигателей D_1 и D_2 в одном корпусе. Рабочий механизм и механизм обратного хода осуществляют рабочий цикл машины

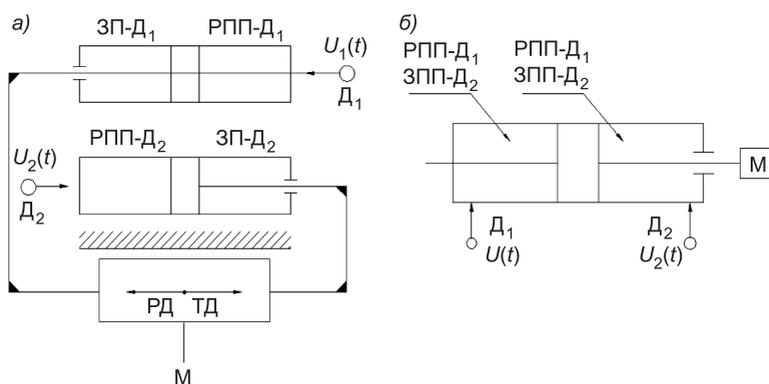


Рис. 1. Функциональная схема

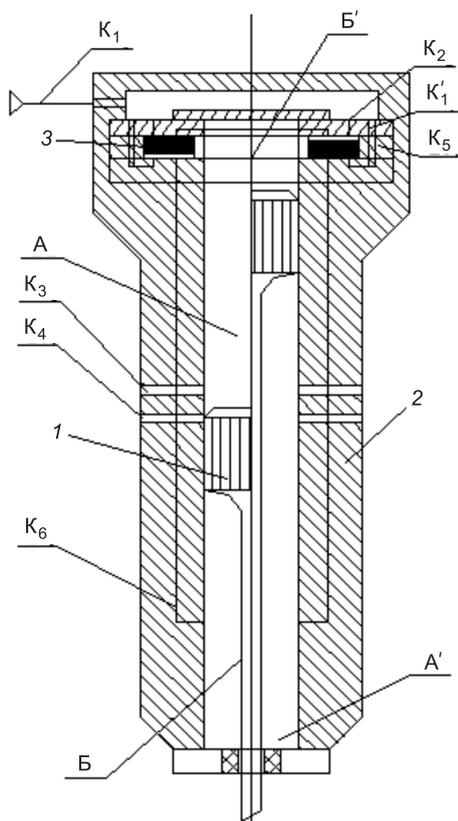


Рис. 2. Конструкция пневматической машины с клапанным воздухораспределением

управления показаны на развернутой функциональной схеме (рис. 3). В системе программного управления условно выделим релейную клапанную воздухораспределительную подсистему, которая обеспечивает реверсирование движения поршня 1 относительно цилиндра 2 (см. рис. 2). Клапанный распределитель 3 устанавливается в коробке цилиндра 2 и с помощью включения и отключения каналов K_5 , K_6 от питающей сети периодически подает сжатый воздух в полости А при рабочем ходе и в полости А' при холостом. На рис. 3 подсистема представлена в условном графическом изображении как двухпозиционный, четырехлинейный пневматический распределитель с сервоприводом 1 и собственно распределителем 2. Для сравнительной оценки на рис. 2, 3 обозначения каналов приняты одинаковыми. На схеме условно механизмы ПМ, ТМ и программирующее устройство ЦКП (см. рис. 3) связаны жесткой рычажной системой.

Позиции золотникового распределителя I', II' и позиции распределителя ЦКП цилиндр-поршень позволяют установить рабочие такты машины. Так, при прямом ходе позиция I показывает, что полость А подключена к сети K_2 и отключена от атмосферы каналом K_A , а полость Б соединена с атмосферой каналами K_B и K_3 , K_4 . Позиции II, II-V при прямом ходе и позиции V, IV-I при обратном ходе также легко определяют систему подводящих и отводящих каналов энергоносителя и поступление в них

последовательно с помощью автоматизированного программного управления.

Рассмотрим структуру программированного управления. Носителем самой программы является цилиндрическая кинематическая пара (ЦКП), механическую часть которой составляет цилиндр-поршень машины. При движении поршня относительно цилиндра кинематическая пара выполняет роль распределителя. Распределитель, дискретно включая и отключая соответствующие каналы, программно управляет сервоприводом клапанного устройства и двумя приводными механизмами рабочего и транспортного хода машины.

На рис. 2 приведена известная конструкция пневматической ударной машины с клапанным воздухо-распределительным устройством. Продольная осевая линия — граничная, по обе стороны которой представлено расположение деталей машины при прямом и обратном ходе.

Особенности программированного

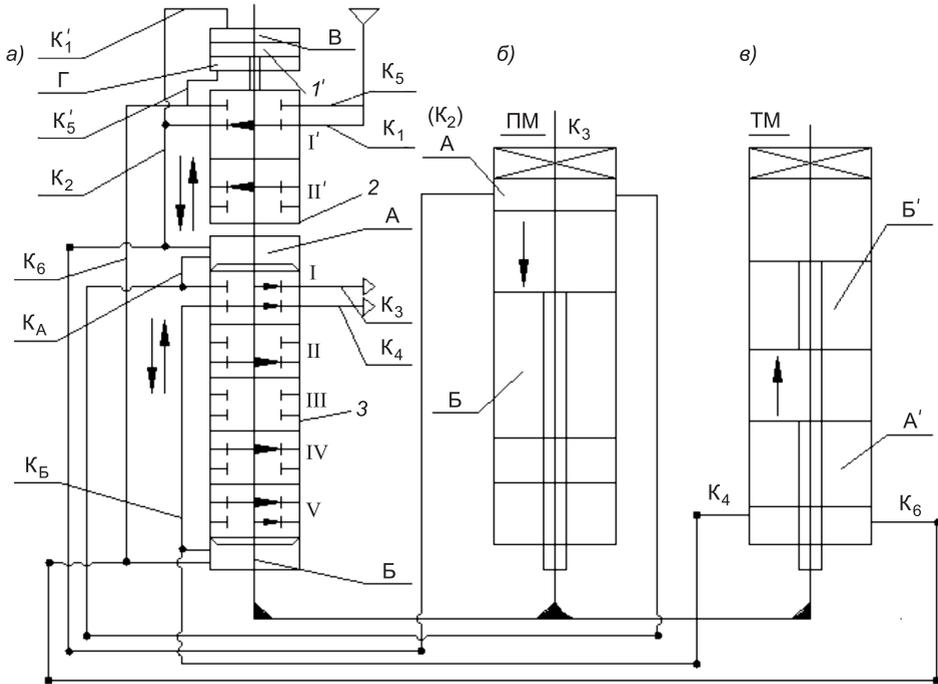


Рис. 3. Обобщенная функциональная схема программирующего устройства

сжатого воздуха, а следовательно, и такты двигателя при движении поршня машины относительно цилиндра.

При синтезе программного управления необходимо иметь информацию о возможных операциях, которые можно производить, используя простую модель машины (рис. 4) с двумя расширительными двигателями, способными выполнить рабочий и транспортный ход поршня-ударника. В этом случае эффективнее использовать граф операций пневматической поршневой машины. Пневматическая машина рассматривается как упрощенная модель (рис. 4, а). Распределители P_1, P_3 осуществляют впуск сетевого воздуха, а распределители P_2, P_4 — отработанного воздуха в атмосферу. На схеме показана машина, имеющая два распределителя.

Граф операций работы пневматической поршневой машины (рис. 4, б) включает вершины, помеченные символом S_i , которые соответствуют той или иной операции рабочего цикла. Набором булевых переменных $q_1, q_2,$

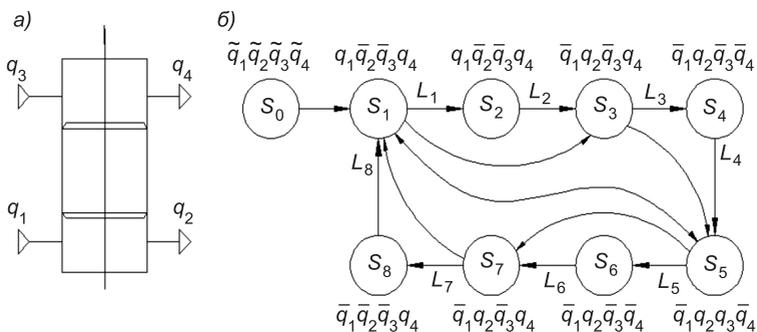


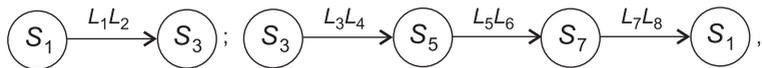
Рис. 4. Граф операций работы пневматической машины

q_3, q_4 , в качестве которых используются потоки сжатого воздуха, определим внутреннее состояние пневматической машины на момент выполнения той или иной операции (процесса) рабочего цикла в вершине S_i . При этом значение $q_i = 1$ означает наличие потока, $q_i = 0$ — его отсутствие. Условие перехода от операции S_i к операции S_{i+1} L_i определяется в процессе создания машины.

Установим особенности функционирования частных тепломеханических систем пневматической машины [2]. Для этого воспользуемся развернутой структурной механической схемой машины (см. рис. 3, а) и графической моделью системы воздухораспределения (см. рис. 4, б). Развернутая схема наглядно представляет ударный производственный (ПМ) и транспортный (ТМ) механизмы. Графическая модель [3] распределения с системой управления (СУ) включает изображение золотникового (поршень-шток 1 с цилиндром 2) и клапанного воздухораспределения 3. Клапанный распределитель (РК) трехлинейный, имеет две позиции I', II'. Золотниковый распределитель (РЗ) четырехлинейный, трехпозиционный. Каналы q_2 и q_4 условные и дают возможность применять стандартное обозначение для золотникового распределителя цилиндр-поршень. Совместная работа распределителей обеспечивает подачу и отвод сжатого воздуха из полостей А, Б — двигателя ударного механизма и А', Б' — транспортного (см. рис. 2, а). Состояние системы управления энергопотоками предопределяет состояние $|M_T|_i$. Состояние СУ в момент времени того или иного тепломеханического процесса отметим набором логических функций булевых переменных q_1, q_2, q_3, q_4 , в качестве которых используем потоки сжатого воздуха в каналах (см. рис. 4, б), «~» над переменной означает, что она может принимать значение «0» или «1». Так, полный механический цикл работы машины представлен траекторией следующего графа:

$$q_1 \bar{q}_2 \bar{q}_3 q_4 \xrightarrow{L_1} q_1 \bar{q}_2 \bar{q}_3 \bar{q}_4 \xrightarrow{L_2} q_1 q_2 \bar{q}_3 \bar{q}_4 \longrightarrow \\ \xrightarrow{L_3} \bar{q}_1 q_2 q_3 \bar{q}_4 \xrightarrow{L_4} \bar{q}_1 \bar{q}_2 q_3 \bar{q}_4 \xrightarrow{L_5} \bar{q}_1 \bar{q}_2 q_3 q_4 \xrightarrow{L_6}$$

На графике операций кроме основных траекторий вершин $S_1, S_2 - S_8$ указываются вспомогательные, такие как



которые могут быть реализованы при работе машины.

Выводы. 1. Пневматическая поршневая штоковая трамбовка отвечает всем признакам автомата с программным управлением рабочего процесса.

2. Наиболее перспективным направлением совершенствования подобных машин-автоматов является применение в их конструкциях систем управления с микропроцессорными элементами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колосский, М.З. Основы динамики промышленных роботов [Текст] / М.З. Колосский, А.В. Слоущ. — М. : Наука, 1988. — 240 с.

2. Суворов, Д.Г. Структурные особенности и рабочие циклы пневматического привода ударных машин [Текст] / Д.Г. Суворов // Изв. вузов. Строительство. — 2002. — № 1–2. — С. 102–107.
3. Суворов, Д.Г. Применение автоматических систем управления в пневматических ручных машинах ударного действия [Текст] / Д.Г. Суворов // Строительные и дорожные машины. — 1991. — № 3. — С. 17–20.

СУВОРОВ Дмитрий Григорьевич, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

НИКУЛИН Максим Сергеевич, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 03.02.14

Suvorov Dmitry Grigorievich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Nikulin Maxim Sergeevich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

PNEUMATIC RAMMER WITH AUTOMATICALLY CONTROLLED WORK PROCESS

In this work we analyzed the structural system of pneumatic rammer. Noted that by design, it is an automatic machine with two actuating mechanism, operating on automatic program. The carrier of this program is a cylindrical kinematic pair, the mechanical part of it is a cylinder-piston machine. When the piston is driving relative to the cylinder kinematic pair acts as a distributor. Distributor discrete enabling and disabling the corresponding channels software controls the servo valve actuator device and two drive mechanisms of the vehicle and transport of the machine. Application of modern microelectronics can dramatically improve the performance of automatic machines.

Key words: soil compaction, automatic systems, compressed air.

REFERENCES

1. Kolovsky, M.Z. Basics dynamics of industrial robots [Text] / M.Z. Kolovskiy, A.V. Sloushch. — Moscow : Science, 1988. — 240 p.
2. Суворов, Д.Г. Структурные особенности и рабочие циклы пневматического привода ударных машин [Текст] / Д.Г. Суворов // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2002. — № 1–2. — С. 102–107.
3. Суворов, Д.Г. Применение автоматических систем управления в пневматических ручных машинах ударного действия [Текст] / Д.Г. Суворов // Строительные и дорожные машины. — 1991. — № 3. — С. 17–20.

УДК 621.524.001

Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ, А.С. ДЕДОВ,
Е.И. КРУТИКОВ, Д.А. ПОПОВ**ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ УДАРНЫЙ МЕХАНИЗМ
С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ**

Рассмотрена принципиальная схема пневматического механизма с дроссельным, беззолотниковыми и бесклапанными элементами воздухораспределения между камерами: сетевой, распределительной, рабочего и холостого ходов.

Ключевые слова: пневматический ударный механизм, ступенчатый ударник, управляющий стержень.

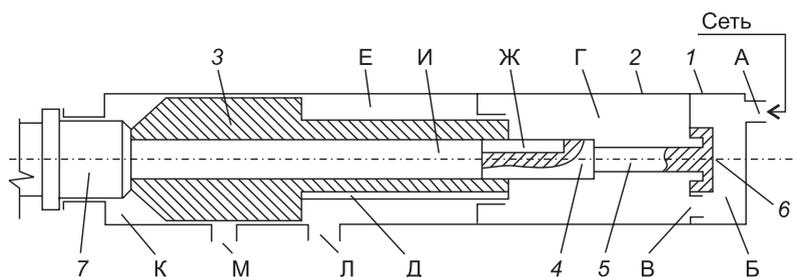
Введение. Аналоги. Особенности совершенствования известных решений [1, 2] определены с применением классификационных признаков — элементов [3]. В рассматриваемом случае синтеза в качестве исходных аналогов приняты механизмы [4, 5], содержащие кольцевые камеры атмосферного давления воздуха со стороны рабочего хода ударника ступенчатой формы. В таких и подобных им механизмах в камерах атмосферного давления силовой импульс от давления воздуха не формировался, и механизмы не реализовывали достаточно высоких энергий единичного удара.

Механизмам [1, 2, 4], как и другим подобным механизмам [3], свойствен общий недостаток: жесткое закрепление стержня относительно корпуса, что обуславливает при нарушении соосности трех деталей: корпуса, ступенчатого ударника и стержня, входящего в центральный канал ударника, — нарушение режима работы механизма и снижение его ресурса.

Механизм [5] не содержит жесткого закрепления стержня относительно корпуса, чем исключаются перекосы в паре штоковая часть ударника — поршневая часть стержня. Увеличить энергию единичного удара представляется возможным за счет подачи сжатого воздуха в кольцевую камеру посредством дополнительного канала, выполненного, например, на боковой поверхности штоковой части ударника, чем обеспечить формирование дополнительного силового импульса со стороны рабочего хода.

Пневматический ударный механизм [5] содержит стержень, свободно установленный в центральном отверстии фланца корпуса с зазором, компенсирующим отклонения соосностей штоковой и поршневой частей ударника относительно корпуса и поршневой части стержня относительно стенок центрального отверстия в штоковой части ударника. Это позволяет увеличить ресурс стержня, штоковой части ударника и пневматического ударного механизма в целом.

© Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Крутиков Е.И., Попов Д.А., 2014



Принципиальная схема синтезированного пневматического ударного механизма

Синтезированный механизм. Принципиальная схема. Синтезированный пневматический механизм с применением известных классификационных признаков — элементов механизмов [3] и механизмов [1, 2, 4, 5] (рисунок) устроен и работает следующим образом.

После включения сжатый воздух с давлением p_0 и температурой θ_0 из сети по воздухоподводящему каналу А с сечением ω_c поступает в камеру Б в крышке 1, цилиндра 2 объемом V_c с давлением воздуха p_c и температурой θ_c , отсюда по каналу В сечением $\omega_{рк}$ в распределительную камеру Г (она же камера рабочего хода) объемом $V_{рк}$ с давлением $p_{рк}$ и температурой $\theta_{рк}$. Из камеры Г воздух по дроссельному каналу Д сечением ω_p поступает в кольцевую камеру Е рабочего хода объемом V_p с давлением воздуха p_p и температурой θ_p и в зависимости от положения ступенчатого ударника 3 по отношению к управляющему выпуску воздуха клапану 4 стержня 5 с буртиком 6 воздух по каналу впуска Ж сечением ω_x периодически поступает по центральному каналу И в ступенчатом ударнике в камеру К холостого хода объемом V_x с давлением воздуха p_x и температурой θ_x .

В зависимости от положения ступенчатого ударника камера Е посредством выпускного канала Л сечением $\omega_{ар}$ и камера К посредством выпускного канала М сечением $\omega_{ах}$ сообщаются с атмосферой и периодически опорожняются до давления воздуха p_a и температуры θ_a . Длина отсекающей кромки выпускного канала М со стороны камеры К не превышает длины впускного канала Ж клапана, который перекрывает периодически впуск воздуха в камеру К из камеры Г. Под действием разницы силовых импульсов давления со стороны камер Г, Е и К ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по хвостовику инструмента 7.

Физико-математическое описание рабочего процесса. Согласно устройству и описанию рабочего процесса синтезированного механизма составлено его физико-математическое описание, представленное тремя составляющими: бародинамической, термодинамической и баромеханической системами уравнений без учета перетечек между рабочими камерами и подвижности стержня в осевом направлении.

Бародинамическая составляющая —

$$\left\{ \begin{array}{l} dp_c / dt = (k / V_c)[W(\omega_c \varphi_c - \omega_{pk} \varphi_{pk})], \\ dp_{pk} / dt = k / (V_{pk} - x_y S_{pk})[W(\omega_{pk} \varphi_{pk} - \omega_x(x_y) \varphi_x - \\ - (\omega_p \varphi_p)^*) + p_{pk} (dx_y / dt) S_{pk}], \\ dp_p / dt = k / (V_p - x_y S_p)[W((\omega_p \varphi_p)^* - \omega_{ap}(x_y) \varphi_{ap}) + \\ + p_p (dx_y / dt) S_p], \\ dp_x / dt = k / (V_x + x_y S_x)[W(\omega_x(x_y) \varphi_x - \omega_{ax}(x_y) \varphi_{ax}) - \\ - p_x (dx_y / dt) S_x]. \end{array} \right. \quad (1)$$

Термодинамическая составляющая —

$$\left\{ \begin{array}{l} d\theta_c / dt = \theta_c / (p_c V_c)[W(\omega_c \varphi_c \Omega_c - \omega_{pk} \varphi_{pk} \Omega_{pk})], \\ d\theta_{pk} / dt = \theta_{pk} / (p_{pk} (V_{pk} - x_y S_{pk})) [W(\omega_{pk} \varphi_{pk} \Omega_{pk} - \\ - (\omega_p \varphi_p \Omega_p)^*) + (k-1) p_{pk} (dx_y / dt) S_{pk}], \\ d\theta_p / dt = \theta_p / (p_p (V_p - x_y S_p)) [W((\omega_p \varphi_p \Omega_p)^* - \\ - \omega_{ap}(x_y) \varphi_{ap} \Omega_{ap}) + (k-1) (dx_y / dt) S_p], \\ d\theta_x / dt = \theta_x / (p_x (V_x + x_y S_x)) [W(\omega_x(x_y) \varphi_x \Omega_x - \\ - \omega_{ax}(x_y) \varphi_{ax} \Omega_{ax}) + (k-1) (dx_y / dt) S_x]. \end{array} \right. \quad (2)$$

Баромеханическая составляющая —

$$\left\{ \begin{array}{l} d^2 x_y / dt^2 = [p_x (S_y - S_c) - p_p S_p - p_{pk} S_{pk}] / m_y \quad \text{при } x_y > 0, \\ (dx_y / dt)_o = -k_y (dx_y / dt)_y \quad \text{при } x_y \leq 0, \\ d^2 x_k / dt^2 = [p_x (S_y - S_c) - p_p S_p - p_{pk} S_{pk} - F_n] / m_k \quad \text{при } x_k > 0, \\ (dx_k / dt)_o = -k_y (dx_k / dt)_y \quad \text{при } x_k \leq 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

В (1) и (2) следует замена, если ω_p — управляемая площадь, то вместо $(\omega_p \varphi_p)^*$ и $(\omega_p \varphi_p \Omega_p)^*$ следует $(\omega_p(x_y) \varphi_p)$ и $(\omega_p(x_y) \varphi_p \Omega_p)$.

В (1) и (2) обозначен параметр $W = (2kR / (k-1))^{1/2}$,

где k — показатель баро- и термодинамического процесса;

R — газовая постоянная;

k_y, k_k — коэффициенты отскока ударника от хвостовика инструмента, корпуса от буртика инструмента;

m_y, m_k — массы ударника и корпуса;

F_n — сила нажатия на корпус;

S_{pk}, S_p, S_x — рабочие площади ударника со стороны камер с объемами V_{pk}, V_p, V_x ;

x_y, x_k — перемещения ударника и корпуса;

S_c — площадь диаметрального сечения центрального канала И в ударнике.

Бародинамические и термодинамические параметры процессов впуска и выпуска воздуха:

$\Phi_c, \Phi_{pk}, \Phi_p, \Phi_x, \Phi_{ap}, \Phi_{ax}$ — соответственно для геометрических площадей $\omega_c, \omega_{pk}, \omega_p, \omega_x, \omega_{ap}, \omega_{ax}$;

$\Omega_c, \Omega_{pk}, \Omega_p, \Omega_x, \Omega_{ap}, \Omega_{ax}$ — соответственно термодинамические параметры в камерах с объемами V_c, V_{pk}, V_p, V_x и в процессе выпуска в атмосферу из камер с объемами V_p, V_x .

Ограничения и рекомендации. Ограничения для бародинамических и термодинамических параметров:

$$\Phi_{ij} \equiv \Phi_{ji} = \begin{cases} 0,5283 > p_i / p_j & p_i \sqrt{\theta_i} \cdot 0,2588, \\ 0,5283 \leq p_i / p_j & p_i \sqrt{\theta} \cdot \sqrt{(p_i / p_j)^{2/k} - (p_i / p_j)^{(k+1)/k}}, \\ 0,5283 > p_j / p_i & p_j \sqrt{\theta_j} \cdot 0,2588, \\ 0,5283 \leq p_j / p_i & p_j \sqrt{\theta_j} \cdot \sqrt{(p_j / p_i)^{2/k} - (p_j / p_i)^{(k+1)/k}}. \end{cases} \quad (4)$$

$$\Omega_{ij} \equiv \Omega_{ji} = \begin{cases} \Phi_{ij} > 0 & k-1, \\ \Phi_{ij} \leq 0 & k - (\theta_i / \theta_j), \\ \Phi_{ji} > 0 & k-1, \\ \Phi_{ji} \leq 0 & k - (\theta_j / \theta_i). \end{cases} \quad (5)$$

В (4) и (5) индексы ij и ji обозначают направление течения воздуха: при i — откуда и j — куда.

Ограничения для $\omega_p(x_y)^*$ и $\omega_x(x_y)$ здесь опускаются в связи их различий в конкретных конструктивных схемах механизмов. Однако начало отсчета для x_y предпочтительно принимать при положении контакта ударника с хвостовиком рабочего инструмента.

Выводы. Синтезированный вариант пневматического ударного механизма, несмотря на применение известных признаков — элементов [3], позволяет изменить качественно и количественно рабочий процесс механизма. При этом предполагается увеличение энергии и частоты ударов, а также ресурса механизма.

Рассмотренный вариант принципиальной схемы механизма может быть применен в пневматических машинах ударного действия с любыми сочетаниями энергии и частоты ударов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2504634 РФ. Пневматический ударный механизм [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, А.В. Грузин, А.В. Куликов; опубл. 2014. Бюл. № 2.
2. Пат. 2418146 РФ. Пневматический ударный механизм [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, Е.А. Иванов, Ч.Н. Чолдак-оол; опубл. 2011. Бюл. № 13.
3. Абраменков, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: справ. изд. [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск: НГУ, 1993. — 430 с.
4. А.с. 359382 СССР. Пневматический ударный механизм [Текст] / А.Я. Земляной, Ю.Н. Смирнов, М.И. Окоцкий; опубл. 1973. Бюл. № 35.

5. Пат. 2432442 РФ. Пневматический ударный механизм [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, Е.А. Иванов, Ч.Н. Чолдак-оол; опубл. 2011. Бюл. № 30.

АБРАМЕНКОВ Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

АБРАМЕНКОВ Эдуард Александрович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ДЕДОВ Алексей Сергеевич, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

КРУТИКОВ Евгений Игоревич, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ПОПОВ Денис Александрович, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 20.02.14

Abramenkov Dmitry Eduardovich, doctor of technical sciences, professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Abramenkov Eduard Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Dedov Alexey Sergeevich, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Krutikov Eugeny Igorevich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Popov Denis Alexandrovich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

PNEUMATIC HAMMER MECHANISM WITH A COMBINATION OF THE AIR

Considered the principal scheme of pneumatic mechanism with throttle, without spools and without valve elements distribution between cameras: network, distribution, operation and idle strokes.

Key words: pneumatic percussion mechanism, manual drummer, control rod.

REFERENCES

1. Pat. 2504634 of the Russian Federation. Pneumatic percussion mechanism [Text] / D.E. Abramnikov, E.A. Abramnikov, A.V. Gruzin, A.V. Kulikov; publ. 2014. Bull. N 2.
2. Pat. 2418146 of the Russian Federation. Pneumatic percussion mechanism [Text] / D.E. Abramnikov, E.A. Abramnikov, E.A. Ivanov, C.N. Zholdak-ool; publ. 2011. Bull. N 13.
3. Abramnikov, E.A. Pneumatic machinery impact machines: reference book [Text] / E.A. Abramnikov, D.E. Abramnikov. — Novosibirsk : NSU, 1993. — 430 p.
4. A.S. 359382 the USSR. Pneumatic percussion mechanism [Text] / A.Ya. Zemlyanov, Yu.N. Smirnov, M.I. Okoccy; publ. 1973. Bull. N 35.
5. Pat. 2432442 of the Russian Federation. Pneumatic percussion mechanism [Text] / D.E. Abramnikov, E.A. Abramnikov, E.A. Ivanov, C.N. Zholdak-ool; publ. 2011. Bull. N 30.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.04

А.В. ИЖЕНДЕЕВ

МАТРИЦА НАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗГИБАЕМОГО ТОНКОСТЕННОГО СТЕРЖНЯ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ

Сформирована матрица начальных напряжений (геометрической жесткости) изгибаемого тонкостенного стержня открытого профиля на основе энергетического критерия устойчивости (вариационного принципа) в форме Дж. Брайана (G.N. Bryan). Матрица симметричная размером 14×14 , ее элементы зависят от изгибающего момента и поперечной силы. Приведены формулы для вычисления этих элементов. Матрица может использоваться для определения критической нагрузки потери устойчивости (устойчивости плоской формы изгиба) стержня методом конечных элементов.

Ключевые слова: тонкостенный стержень, изгиб, устойчивость, метод конечных элементов.

В данной работе объектом исследования является тонкостенный стержень открытого профиля.

Примем геометрические допущения В.З. Власова о деформировании тонкостенного стержня открытого профиля [1]: профильная линия поперечного сечения, недеформируемая в плоскости этого сечения; деформации сдвига срединной поверхности равны нулю. Полагаем, что материал стержня однородный, сплошной, изотропный, идеально упругий, соответствует закону Гука.

Предмет исследования — формирование матрицы начальных напряжений (геометрической жесткости) изгибаемого тонкостенного стержня открытого профиля.

Пусть положение произвольной точки M тонкостенного стержня определяется в правой прямоугольной системе координат XYZ координатами: x — координата, отсчитываемая вдоль продольной оси X стержня; y и z — координаты, отсчитываемые вдоль главных центральных осей Y и Z поперечного сечения стержня. Начало системы координат XYZ находится на одном из концов стержня, ось X направлена к другому концу стержня.

Пусть деформацией стержня является такой прямой изгиб, что точки продольной оси стержня перемещаются в плоскости XZ (для определенности). В этом случае нормальное и касательное напряжения в точке M , действующие на площадке, перпендикулярной продольной оси X стержня, можно вычислить, используя формулы

$$\bar{\sigma}_x^0 = \frac{M_y}{I_y} z; \quad \bar{\tau}_{xs}^0 = \frac{Q_z S_y^{\text{от}}}{I_y t}, \quad (1)$$

где M_y — изгибающий момент, взятый относительно главной центральной оси Y поперечного сечения стержня;

Q_z — поперечная сила, линия действия которой параллельна главной центральной оси Z поперечного сечения стержня;

I_y — осевой момент инерции поперечного сечения стержня, взятый относительно главной центральной оси Y этого сечения;

$S_y^{от}$ — статический момент отсеченной части поперечного сечения стержня относительно оси Y ;

t — толщина стенки тонкостенного стержня открытого профиля.

Тогда формула для вычисления параметрической части функционала устойчивости равновесия Дж. Брайана (G.N. Bryan) для трехмерной задачи теории упругости из работы [2] примет вид

$$V_2 = \frac{1}{2} \int_V \bar{\sigma}_x^0 \left[\left(\frac{\partial u_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_1}{\partial x} \right)^2 \right] dV + \int_V \bar{\tau}_{xs}^0 \left[\frac{\partial u_1}{\partial x} \frac{\partial u_1}{\partial s} + \frac{\partial v_1}{\partial x} \frac{\partial v_1}{\partial s} + \frac{\partial w_1}{\partial x} \frac{\partial w_1}{\partial s} \right] dV, \quad (2)$$

где V — объем стержня;

u_1, v_1 и w_1 — дополнительные достаточно малые перемещения (соответственно вдоль осей X, Y и Z) точки M , которые переведут ее из начального состояния равновесия в новое;

s — координата, характеризующая положение точки M на профильной линии поперечного сечения стержня.

Напряжения $\bar{\sigma}_x^0$ и $\bar{\tau}_{xs}^0$ для формулы (2) определяют из решения линейной задачи для начального состояния равновесия системы.

Можем записать

$$u_1 = \xi - y \frac{d\eta}{dx} - z \frac{d\zeta}{dx} - \omega \frac{d\varphi}{dx}; \quad v_1 = \eta - (z - a_z)\varphi; \quad w_1 = \zeta + (y - a_y)\varphi, \quad (3)$$

где ξ — продольное перемещение (в направлении продольной оси X стержня) центра тяжести поперечного сечения стержня;

η и ζ — поперечные перемещения (в направлении главных центральных осей Y и Z поперечного сечения стержня) центра изгиба поперечного сечения стержня;

φ — угол поворота поперечного сечения стержня вокруг продольной оси X стержня;

ω — секториальная координата точки M ;

a_y и a_z — координаты центра изгиба поперечного сечения стержня, отсчитываемые вдоль главных центральных осей Y и Z поперечного сечения стержня.

Примем аппроксимирующие функции для конечного элемента:

$$\begin{aligned} \xi &= a_1 + a_2 x; \\ \eta &= a_3 + a_4 x + a_5 x^2 + a_6 x^3; \\ \zeta &= a_7 + a_8 x + a_9 x^2 + a_{10} x^3; \\ \varphi &= a_{11} + a_{12} x + a_{13} x^2 + a_{14} x^3, \end{aligned} \quad (4)$$

где a_i — некоторый i -й коэффициент.

Подставляя аппроксимирующие функции в выражения (3), а те — в формулу (2), получим (в части, касающейся одного конечного элемента)

$$V_2 = \frac{1}{2} \bar{a}^T K_\sigma \bar{a}; \quad (5)$$

$$\bar{a} = (a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7 a_8 a_9 a_{10} a_{11} a_{12} a_{13} a_{14})^T,$$

где K_σ — матрица начальных напряжений (геометрической жесткости) изгибаемого тонкостенного стержня открытого профиля (симметричная размером 14×14).

Приведем формулы для вычисления элементов матрицы K_σ , расположенных на главной диагонали и ниже ее той части матрицы, которая зависит от усилия M_y :

$$k_{\sigma,5,5} = 4M_y^{(0)} \frac{I_{yyz}}{I_y}; \quad k_{\sigma,6,5} = 12M_y^{(1)} \frac{I_{yyz}}{I_y};$$

$$k_{\sigma,6,6} = 36M_y^{(2)} \frac{I_{yyz}}{I_y}; \quad k_{\sigma,9,2} = -2M_y^{(0)};$$

$$k_{\sigma,9,5} = 4M_y^{(0)} \frac{I_{yzz}}{I_y}; \quad k_{\sigma,9,6} = 12M_y^{(1)} \frac{I_{yzz}}{I_y};$$

$$k_{\sigma,9,9} = 4M_y^{(0)} \frac{I_{zzz}}{I_y}; \quad k_{\sigma,10,2} = -6M_y^{(1)};$$

$$k_{\sigma,10,5} = k_{\sigma,9,6}; \quad k_{\sigma,10,6} = 36M_y^{(2)} \frac{I_{yzz}}{I_y};$$

$$k_{\sigma,10,9} = 12M_y^{(1)} \frac{I_{zzz}}{I_y}; \quad k_{\sigma,10,10} = 36M_y^{(2)} \frac{I_{zzz}}{I_y};$$

$$k_{\sigma,12,4} = -M_y^{(0)}; \quad k_{\sigma,12,5} = -2M_y^{(1)};$$

$$k_{\sigma,12,6} = -3M_y^{(2)}; \quad k_{\sigma,12,12} = M_y^{(0)} \frac{I_{yyz}}{I_y} - 2a_z M_y^{(0)} + M_y^{(0)} \frac{I_{zzz}}{I_y};$$

$$k_{\sigma,13,4} = k_{\sigma,12,5}; \quad k_{\sigma,13,5} = -4M_y^{(2)} + 4M_y^{(0)} \frac{I_{yz\omega}}{I_y};$$

$$k_{\sigma,13,6} = -6M_y^{(3)} + 12M_y^{(1)} \frac{I_{yz\omega}}{I_y}; \quad k_{\sigma,13,9} = 4M_y^{(0)} \frac{I_{zzz}}{I_y};$$

$$k_{\sigma,13,10} = 12M_y^{(1)} \frac{I_{z\omega\omega}}{I_y}; \quad k_{\sigma,13,12} = 2M_y^{(1)} \frac{I_{yyz}}{I_y} - 4a_z M_y^{(1)} + 2M_y^{(1)} \frac{I_{zzz}}{I_y};$$

$$k_{\sigma,13,13} = 4M_y^{(0)} \frac{I_{z\omega\omega}}{I_y} + 4M_y^{(2)} \frac{I_{yyz}}{I_y} - 8a_z M_y^{(2)} + 4M_y^{(2)} \frac{I_{zzz}}{I_y};$$

$$\begin{aligned}
 k_{\sigma,14,4} &= k_{\sigma,12,6}; \quad k_{\sigma,14,5} = k_{\sigma,13,6}; \\
 k_{\sigma,14,6} &= -9M_y^{(4)} + 36M_y^{(2)} \frac{I_{yz\omega}}{I_y}; \quad k_{\sigma,14,9} = k_{\sigma,13,10}; \\
 k_{\sigma,14,10} &= 36M_y^{(2)} \frac{I_{zz\omega}}{I_y}; \quad k_{\sigma,14,12} = 3M_y^{(2)} \frac{I_{yyz}}{I_y} - 6a_z M_y^{(2)} + 3M_y^{(2)} \frac{I_{zzz}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,14,13} &= 12M_y^{(1)} \frac{I_{z\omega\omega}}{I_y} - 12a_z M_y^{(3)} + 6M_y^{(3)} \frac{I_{yyz}}{I_y} + 6M_y^{(3)} \frac{I_{zzz}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,14,14} &= 36M_y^{(2)} \frac{I_{z\omega\omega}}{I_y} + 9M_y^{(4)} \frac{I_{yyz}}{I_y} - 18a_z M_y^{(4)} + 9M_y^{(4)} \frac{I_{zzz}}{I_y}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Теперь приведем формулы для вычисления элементов матрицы K_σ , расположенных на главной диагонали и ниже ее той части матрицы, которая зависит от усилия Q_z :

$$\begin{aligned}
 k_{\sigma,4,2} &= -Q_z^{(0)} \frac{I_{yy}^{OT}}{I_y}; \quad k_{\sigma,5,2} = -2Q_z^{(1)} \frac{I_{yy}^{OT}}{I_y}; \quad k_{\sigma,5,4} = 2Q_z^{(0)} \frac{I_{yyy}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,5,5} &= 4Q_z^{(1)} \frac{I_{yyy}^{OT}}{I_y}; \quad k_{\sigma,6,2} = -3Q_z^{(2)} \frac{I_{yy}^{OT}}{I_y}; \quad k_{\sigma,6,4} = 6Q_z^{(1)} \frac{I_{yyy}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,6,5} &= 18Q_z^{(2)} \frac{I_{yyy}^{OT}}{I_y}; \quad k_{\sigma,6,6} = 18Q_z^{(3)} \frac{I_{yyy}^{OT}}{I_y}; \quad k_{\sigma,8,2} = -Q_z^{(0)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,8,5} &= 2Q_z^{(0)} \frac{I_{yzy}^{OT}}{I_y}; \quad k_{\sigma,8,6} = 6Q_z^{(1)} \frac{I_{yzy}^{OT}}{I_y}; \quad k_{\sigma,9,2} = -2Q_z^{(1)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,9,4} &= 2Q_z^{(0)} \frac{I_{yyz}^{OT}}{I_y}; \quad k_{\sigma,9,5} = 4Q_z^{(1)} \frac{I_{yzy}^{OT}}{I_y} + 4Q_z^{(1)} \frac{I_{yyz}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,9,6} &= 12Q_z^{(2)} \frac{I_{yzy}^{OT}}{I_y} + 6Q_z^{(2)} \frac{I_{yyz}^{OT}}{I_y}; \quad k_{\sigma,9,8} = 2Q_z^{(0)} \frac{I_{yzz}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,9,9} &= 4Q_z^{(1)} \frac{I_{yzz}^{OT}}{I_y}; \quad k_{\sigma,10,2} = -3Q_z^{(2)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y}; \quad k_{\sigma,10,4} = 6Q_z^{(1)} \frac{I_{yyz}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,10,5} &= 6Q_z^{(2)} \frac{I_{yzy}^{OT}}{I_y} + 12Q_z^{(2)} \frac{I_{yyz}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,10,6} &= 18Q_z^{(3)} \frac{I_{yzy}^{OT}}{I_y} + 18Q_z^{(3)} \frac{I_{yyz}^{OT}}{I_y};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k_{\sigma,10,8} &= 6Q_z^{(1)} \frac{I_{yzz}^{OT}}{I_y}; & k_{\sigma,10,9} &= 18Q_z^{(2)} \frac{I_{yzz}^{OT}}{I_y}; & k_{\sigma,10,10} &= 18Q_z^{(3)} \frac{I_{yzz}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,11,4} &= -Q_z^{(0)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y}; & k_{\sigma,11,5} &= -2Q_z^{(1)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y}; & k_{\sigma,11,6} &= -3Q_z^{(2)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,11,8} &= Q_z^{(0)} \frac{I_{yy}^{OT}}{I_y}; & k_{\sigma,11,9} &= 2Q_z^{(1)} \frac{I_{yy}^{OT}}{I_y}; & k_{\sigma,11,10} &= 3Q_z^{(2)} \frac{I_{yy}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,12,2} &= -Q_z^{(0)} \frac{I_{y\omega}^{OT}}{I_y}; & k_{\sigma,12,4} &= -Q_z^{(1)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,12,5} &= -2Q_z^{(2)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y} + 2Q_z^{(0)} \frac{I_{y\omega y}^{OT}}{I_y}; & k_{\sigma,12,6} &= -3Q_z^{(3)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y} + 6Q_z^{(1)} \frac{I_{y\omega y}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,12,8} &= Q_z^{(1)} \frac{I_{yy}^{OT}}{I_y}; & k_{\sigma,12,9} &= 2Q_z^{(2)} \frac{I_{yy}^{OT}}{I_y} + 2Q_z^{(0)} \frac{I_{y\omega z}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,12,10} &= 3Q_z^{(3)} \frac{I_{yy}^{OT}}{I_y} + 6Q_z^{(1)} \frac{I_{y\omega z}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,12,11} &= -a_y Q_z^{(0)} \frac{I_{yy}^{OT}}{I_y} - a_z Q_z^{(0)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y} + Q_z^{(0)} \frac{I_{yyy}^{OT}}{I_y} + Q_z^{(0)} \frac{I_{yzz}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,12,12} &= -a_y Q_z^{(1)} \frac{I_{yy}^{OT}}{I_y} - a_z Q_z^{(1)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y} + Q_z^{(1)} \frac{I_{yyy}^{OT}}{I_y} + Q_z^{(1)} \frac{I_{yzz}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,13,2} &= -2Q_z^{(1)} \frac{I_{y\omega}^{OT}}{I_y}; & k_{\sigma,13,4} &= -Q_z^{(2)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y} + 2Q_z^{(0)} \frac{I_{yy\omega}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,13,5} &= -2Q_z^{(3)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y} + 4Q_z^{(1)} \frac{I_{y\omega y}^{OT}}{I_y} + 4Q_z^{(1)} \frac{I_{yy\omega}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,13,6} &= -3Q_z^{(4)} \frac{I_{yz}^{OT}}{I_y} + 6Q_z^{(2)} \frac{I_{yy\omega}^{OT}}{I_y} + 12Q_z^{(2)} \frac{I_{y\omega y}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,13,8} &= Q_z^{(2)} \frac{I_{yy}^{OT}}{I_y} + 2Q_z^{(0)} \frac{I_{yz\omega}^{OT}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,13,9} &= 2Q_z^{(3)} \frac{I_{yy}^{OT}}{I_y} + 4Q_z^{(1)} \frac{I_{y\omega z}^{OT}}{I_y} + 4Q_z^{(1)} \frac{I_{yz\omega}^{OT}}{I_y};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k_{\sigma,13,10} &= 3Q_z^{(4)} \frac{I_{yy}^{\text{OT}}}{I_y} + 6Q_z^{(2)} \frac{I_{yz\omega}^{\text{OT}}}{I_y} + 12Q_z^{(2)} \frac{I_{y\omega z}^{\text{OT}}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,13,11} &= 2Q_z^{(1)} \frac{I_{yyy}^{\text{OT}}}{I_y} + 2Q_z^{(1)} \frac{I_{yzz}^{\text{OT}}}{I_y} - 2a_y Q_z^{(1)} \frac{I_{yy}^{\text{OT}}}{I_y} - 2a_z Q_z^{(1)} \frac{I_{yz}^{\text{OT}}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,13,12} &= 2Q_z^{(0)} \frac{I_{y\omega\omega}^{\text{OT}}}{I_y} - 3a_y Q_z^{(2)} \frac{I_{yy}^{\text{OT}}}{I_y} - 3a_z Q_z^{(2)} \frac{I_{yz}^{\text{OT}}}{I_y} + 3Q_z^{(2)} \frac{I_{yyy}^{\text{OT}}}{I_y} + 3Q_z^{(2)} \frac{I_{yzz}^{\text{OT}}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,13,13} &= 4Q_z^{(1)} \frac{I_{y\omega\omega}^{\text{OT}}}{I_y} - 2a_y Q_z^{(3)} \frac{I_{yy}^{\text{OT}}}{I_y} - 2a_z Q_z^{(3)} \frac{I_{yz}^{\text{OT}}}{I_y} + 2Q_z^{(3)} \frac{I_{yyy}^{\text{OT}}}{I_y} + 2Q_z^{(3)} \frac{I_{yzz}^{\text{OT}}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,14,2} &= -3Q_z^{(2)} \frac{I_{y\omega}^{\text{OT}}}{I_y}; \quad k_{\sigma,14,4} = -Q_z^{(3)} \frac{I_{yz}^{\text{OT}}}{I_y} + 6Q_z^{(1)} \frac{I_{yy\omega}^{\text{OT}}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,14,5} &= -2Q_z^{(4)} \frac{I_{yz}^{\text{OT}}}{I_y} + 12Q_z^{(2)} \frac{I_{yy\omega}^{\text{OT}}}{I_y} + 6Q_z^{(2)} \frac{I_{y\omega y}^{\text{OT}}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,14,6} &= -3Q_z^{(5)} \frac{I_{yz}^{\text{OT}}}{I_y} + 18Q_z^{(3)} \frac{I_{yy\omega}^{\text{OT}}}{I_y} + 18Q_z^{(3)} \frac{I_{y\omega y}^{\text{OT}}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,14,8} &= Q_z^{(3)} \frac{I_{yy}^{\text{OT}}}{I_y} + 6Q_z^{(1)} \frac{I_{yz\omega}^{\text{OT}}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,14,9} &= 2Q_z^{(4)} \frac{I_{yy}^{\text{OT}}}{I_y} + 12Q_z^{(2)} \frac{I_{yz\omega}^{\text{OT}}}{I_y} + 6Q_z^{(2)} \frac{I_{y\omega z}^{\text{OT}}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,14,10} &= 3Q_z^{(5)} \frac{I_{yy}^{\text{OT}}}{I_y} + 18Q_z^{(3)} \frac{I_{yz\omega}^{\text{OT}}}{I_y} + 18Q_z^{(3)} \frac{I_{y\omega z}^{\text{OT}}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,14,11} &= -3a_y Q_z^{(2)} \frac{I_{yy}^{\text{OT}}}{I_y} - 3a_z Q_z^{(2)} \frac{I_{yz}^{\text{OT}}}{I_y} + 3Q_z^{(2)} \frac{I_{yyy}^{\text{OT}}}{I_y} + 3Q_z^{(2)} \frac{I_{yzz}^{\text{OT}}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,14,12} &= 6Q_z^{(1)} \frac{I_{y\omega\omega}^{\text{OT}}}{I_y} - 4a_y Q_z^{(3)} \frac{I_{yy}^{\text{OT}}}{I_y} - 4a_z Q_z^{(3)} \frac{I_{yz}^{\text{OT}}}{I_y} + 4Q_z^{(3)} \frac{I_{yyy}^{\text{OT}}}{I_y} + 4Q_z^{(3)} \frac{I_{yzz}^{\text{OT}}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,14,13} &= -5a_y Q_z^{(4)} \frac{I_{yy}^{\text{OT}}}{I_y} - 5a_z Q_z^{(4)} \frac{I_{yz}^{\text{OT}}}{I_y} + 18Q_z^{(2)} \frac{I_{y\omega\omega}^{\text{OT}}}{I_y} + 5Q_z^{(4)} \frac{I_{yyy}^{\text{OT}}}{I_y} + 5Q_z^{(4)} \frac{I_{yzz}^{\text{OT}}}{I_y}; \\
 k_{\sigma,14,14} &= -3a_y Q_z^{(5)} \frac{I_{yy}^{\text{OT}}}{I_y} - 3a_z Q_z^{(5)} \frac{I_{yz}^{\text{OT}}}{I_y} + 18Q_z^{(3)} \frac{I_{y\omega\omega}^{\text{OT}}}{I_y} + 3Q_z^{(5)} \frac{I_{yyy}^{\text{OT}}}{I_y} + 3Q_z^{(5)} \frac{I_{yzz}^{\text{OT}}}{I_y}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

В вышеприведенных выражениях использованы обозначения

$$M_y^{(i)} = \int_0^l M_y(x) x^i dx; Q_z^{(i)} = \int_0^l Q_z(x) x^i dx, \quad (8)$$

где l — длина конечного элемента.

Кроме того, введены дополнительные геометрические характеристики поперечного сечения стержня:

$$I_{ijk} = \int_A ijk dA; I_{ijk}^{\text{от}} = \int_A \frac{S_i^{\text{от}}}{t} \frac{dj}{ds} k dA; I_{ij}^{\text{от}} = \int_A \frac{S_i^{\text{от}}}{t} \frac{dj}{ds} dA, \quad (9)$$

где A — площадь поперечного сечения стержня;

i, j и k — какие-либо координаты точки M : y, z, ω . Например, $I_{yyz} = \int_A yyz dA$. Для вычисления таких геометрических характеристик мо-

жет использоваться алгоритм, подобный описанному в работе [3].

Матрицу начальных напряжений можно согласовывать не с вектором a коэффициентов в аппроксимирующих функциях (4), а с вектором, элементами которого являются перемещения и деформации концевых поперечных сечений стержня [4].

О точности вычисления значения критической нагрузки (потери общей устойчивости, устойчивости плоской формы изгиба изгибаемого тонкостенного стержня открытого профиля) с использованием предложенной матрицы начальных напряжений (геометрической жесткости) можно судить по отклонению такого значения от известного решения (например, из работы [1]).

Вычислительные эксперименты показали, что при описании деформирования однопролетной балки и консоли двумя конечными элементами это отклонение не превышало 5 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В л а с о в, В.З. Тонкостенные упругие стержни [Текст] / В.З. Власов. — М. : Физматгиздат, 1958. — 568 с.
2. А л ф у т о в, Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем [Текст] / Н.А. Алфутков. — М. : Машиностроение, 1978. — 312 с.
3. И ж е н д е е в, А.В. Оптимальное проектирование стержневых тонкостенных систем, находящихся под воздействием многопараметрического нагружения [Текст] / А.В. Ижендеев. — Благовещенск : Амур. гос. ун-т, 2006. — 168 с.
4. И ж е н д е е в, А.В. Формирование матрицы начальных напряжений тонкостенного стержня открытого профиля [Текст] / А.В. Ижендеев // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 1. — С. 119–125.

ИЖЕНДЕЕВ Алексей Валерьевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: alex_izhendeev@mail.ru

Дальневосточный государственный аграрный университет, г. Благовещенск

Получено 13.02.14

Izhendeev Alexey Valerievich, candidate of technical sciences, assistant professor;
E-mail: alex_izhendeev@mail.ru, Far Eastern State Agricultural University,
Blagoveshchensk, Russia

THE MATRIX OF THE INITIAL STRESS OF BENDING THIN-WALLED ROD WITH AN OPEN PROFILE

In this article formed the matrix of the initial stress for a bending thin-walled rod with an open profile. Used energy criterion for stability of G.N. Bryan. This matrix is symmetrical. Its size is 14×14 . The elements of this matrix depend on the bending moment and the shear force. We present formulas of those elements. The matrix can be used to compute critical loads of finite elements method.

Key words: thin-walled rod, bending, stability, finite element method.

REFERENCES

1. Vlasov, V.Z. Thin-walled elastic rods [Text] / V.Z. Vlasov.— Moscow : Fizmatizdat, 1958. — 568 p.
2. Alfutov, N.A. The basis of calculation on stability of elastic systems [Text] / N.A. Alfutov. — Moscow : Mechanical engineering, 1978. — 312 p.
3. Izhendeev, A.V. Optimal design of bar-thin-walled systems under the influence of multiparameter upload [Text] / A.V. Izhendeev. — Blagoveshchensk : Amur State University, 2006. — 168 p.
4. Izhendeev, A.V. The formation of the matrix of the initial stress for a thin-walled rod with an open profile [Text] / A.V. Izhendeev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 1. — P. 119–125.

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ¹

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
— *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;

к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи² за подписью автора или руководителя представляющей статью организации. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;

— *рекомендацию* соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);

— *экспертное заключение* о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;

— *разрешение* Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5").

Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Cyr размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008);

— сведения об авторах: *фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания* (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и *английском языках*;

— почтовые адреса, телефоны и *e-mail авторов*;

— *название статьи на английском языке*;

— *аннотация на английском языке*;

— *ключевые слова на английском языке*;

— *библиографический список на английском языке*.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением *.cdr (предпочтительно) или *.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др., а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *п*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

¹ С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

² На 2014 г. — из расчета 800 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

8. Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(SI).

9. В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу www.sibstrin.ru и www.izvuzstr.sibstrin.ru

10. Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

11. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присылать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

12. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректурa статей авторам не представляется.*

13. Гонорар за опубликованные статьи не выплачивается.

14. Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 1-е полугодие 2014 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции
Теория инженерных сооружений
Строительные материалы и изделия

Экономика и организация строительства

Автоматизация и технология строительного производства

Гидротехническое строительство
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов

Строительные и дорожные машины
Научные проблемы архитектуры и экологии

Научно-методический
В лабораториях вузов

Внедрение научных достижений в производство

Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 2400 р.

Цена отдельного номера — 400 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 4 (664) 2014

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*

Технический редактор *Н.М. Макаренко*

Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*

Корректор *Г.И. Шведкина*