

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
СТРОИТЕЛЬСТВО

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

№ 10 (622)
Октябрь 2010 г.

Главный редактор В.Г. Себешев
Редакционная коллегия: А.А. Афанасьев,
В.Л. Баладинский, Т.И. Баранова, В.А. Воробьев,
П.А. Дмитриев, В.А. Игнатьев, В.И. Костин (зам. гл.
редактора), Г.Б. Лебедев (зам. гл. редактора),
Е.М. Лобанов, Л.С. Ляхович, В.И. Морозов,
Ю.П. Панибратов, Ю.А. Попов, Ю.П. Правдивец,
В.Г. Себешев, И.Б. Соколов, Ю.А. Феофанов,
Е.М. Чернышов

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113.
Тел./факс 266-28-59.
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 30.11.10. Формат 70×108¹/16.
Усл. печ. л. 11,20+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 793.

ООО «Партнеры Сибири»,
630005, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 16.

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Попов Д.В., Коренько-ва С.Ф., Попов В.П. Моделирование процессов разрушения бетона гидростатическим давлением на базе механики разрушения 3

Серпик И.Н. Эффективный конечно-элементный анализ плит Тимошенко с исключением заклинивания изгибных деформаций 8

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Тарасов Р.В., Макарова Л.В., Королева О.В., Грачева Ю.В. Выбор технологии получения наноразмерных модификаторов для строительных композитов 18

Бердов Г.И., Ильина Л.В. Исследование изменения структуры портландцемента и клинкера после длительного хранения во влажных условиях методом комплексного термического анализа 23

Кудяков А.И., Белых С.А., Даминова А.М. Управление структурой и морозостойкостью растворов из сухих монтажных смесей с гранулированной воздуховлекающей добавкой 30

Куликов В.А., Ковков И.В., Абдрахимов В.З. Исследование фазового состава керамзита на основе монтмориллонитовой глины и отходо-

дов горно-обогатительной фабрики при обогащении угля	37
Баталин Б.С., Лядова Л.А., Жмыхова О.В. Разработка технологии производства керамических и лакокрасочных пигментов на основе отходов некоторых керамических производств.....	43
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Лугин И.В., Пьянкова А.Ю. Изменение температурного поля грунта вокруг подземной станции метрополитена с начала эксплуатации	48
Амбросова Г.Т., Степанова П.В., Ксенофонтова О.В. Новая установка для стабилизации, обеззараживания и обезвоживания осадков сточных вод	56
СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ	
Бокарев С.А., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Методика расчета по прочности сечений эксплуатируемых железобетонных пролетных строений, усиленных композитными материалами	63
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Гладышев Г.В., Чубаров П.В. Дроссельные пневмоударные механизмы с управляемыми проточными камерами присоединенных объемов с раздельным впуском сетевого воздуха	75
Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А., Аникин В.Н. К вопросу исследования радиоволнового канала системы дистанционного управления землеройно-транспортными машинами	86
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Галляутдинов З.Р. Многослойная модель деформирования железобетона в динамических расчетах плит, опертых по контуру	93
Гилета В.П., Юдин Б.В. Повышение эффективности работы смесителя для нанопорошков	99
Назиров Р.А., Захаргин Е.Н., Назиров Д.Р. Обоснование с помощью комплексных энергетических показателей значения допустимого уровня снижения требуемого сопротивления теплопередаче при расчетах долговечности ограждающих конструкций	106
Петров С.М. Алгоритм расчета многопролетных «сэндвич»-панелей с учетом сдвига среднего слоя и упругой податливости опор	112
Столбов Ю.В., Савицкий И.П., Кокуленко К.С. Методы расчета и обоснование технологических допусков высотного положения строительных конструкций при возведении многоэтажных зданий	122

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 691.32:539.4.001.57

Д.В. ПОПОВ, С.Ф. КОРЕНЬКОВА, В.П. ПОПОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ НА БАЗЕ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

В основу механики разрушения бетона положена энергетическая концепция, а для описания развития процессов во времени — кинетическая теория С.Н. Журкова. Представленная в статье математическая модель разрушения бетона гидростатическим давлением позволила выделить две группы параметров, от которых зависит водопроницаемость бетона, а именно: модуль упругости, поверхностная энергия, коэффициент Пуассона, а также склонность к трещинообразованию и его интенсивность.

Ключевые слова: разрушение, бетон, гидростатическое давление, механика разрушения, моделирование процессов.

Несмотря на многолетний опыт практического применения бетона на цементных вяжущих, этот материал остается малоизученным в теоретическом отношении. Для него до сих пор не разработано универсальной теории деформирования и трещинообразования, а существующие методы расчета его несущей способности и долговечности базируются в основном на эмпирических или полуэмпирических зависимостях, включающих множество поправочных коэффициентов. Это может быть объяснено рядом причин, главной из которых является сложность структуры бетона, представляющей собой многокомпонентную и поликристаллическую смесь составляющих, которые находятся в физико-химическом взаимодействии и имеют сложную систему пор и микротрещин, адсорбирующихся на своей поверхности влагу. С другой стороны, недостаточное развитие механики разрушения — науки, занимающейся изучением работы реальных материалов, накапливающих дефекты в процессе эксплуатации, также не позволяет широко применять ее для описания разрушения композитов, к которым, безусловно, относится бетон.

Между тем, как показывает первый опыт применения аппарата механики разрушения в исследовании поведения этого материала в условиях различных внешних воздействий [1, 2], такой подход обладает большой информативностью и позволяет определить комплекс параметров бетона, отвечающих за его несущую способность и долговечность. При этом были обоснованы основные положения и допущения, позволившие рассматривать бетон в качестве исходного материала, к которому применимы основные положения механики разрушения. В частности, было показано, что бетон, по крайней мере на уровне макроструктуры, разрушается хрупко. Подтверждением сказанному явился сравнительный анализ таких физико-механических характеристик стекла (материала, на кото-

ром в свое время была получена А.А. Гриффитсом [3] его знаменитая зависимость) и бетона, как модуль упругости, поверхностная энергия, прочность на растяжение и скорость распространения ультразвука. Эти параметры оказались у обоих материалов одного порядка. Кроме того, анализ результатов изучения разрушения бетона с регистрацией его методами акустической эмиссии показывает, что последний разрушается с выделением сигналов, характерных для разрушения хрупкого материала, без элементов пластического течения.

Немаловажным фактором, позволяющим применить аппарат механики разрушения к бетону при исследовании его поведения при различных внешних воздействиях, было допущение его относительной однородности на уровне макроструктуры. Было принято, что неоднородные включения в структуру бетона и участки с различной плотностью распределены в объеме материала статистически устойчиво однородно. Такое допущение является общеизвестным и широко распространенным при описании структуры не только бетона, но и множества других материалов. Оно вносит определенную погрешность, но, как показывает опыт, эта погрешность не оказывает большого влияния на точность описания процессов разрушения. Для этой же цели все дефекты структуры бетона были объединены в один дефект: приведенную трещину, параметры которой равны интегральной величине всех дефектов внутри определенного объема материала.

В этих же работах показано, что наиболее информативной концепцией в механике разрушения применительно к бетонам является энергетическая концепция, а для описания развития процессов во времени наиболее подходит кинетическая теория С.Н. Журкова в виде, представленном К.И. Кузнецовой в монографии [4].

Задачей данного исследования является описание процесса разрушения бетона статическим гидравлическим давлением на базе энергетической концепции и кинетической теории механики разрушения с выделением определенного числа параметров бетона, существенно влияющих на водостойкость бетона и позволяющих прогнозировать в дальнейшем его водопроницаемость. При этом процесс фильтрации воды через структуру бетона был представлен как механизм образования микротрещин, развивающихся под действием гидростатики от одной грани бетонного элемента до противоположной.

Рассмотрим физическую картину такого процесса. При приложении к поверхности бетонного элемента гидростатического давления будут иметь место одновременно два физических явления: капиллярный подсос, характерный для мелких пор, и задавливание воды в крупные поры и микротрещины. Давление воды создает в устьях крупных пор и микротрещин расклинивающие усилия. В условиях превышения предела прочности материала на растяжение происходит прорастание трещин на некоторую величину и стабилизация их параметров при данном давлении. Поэтапное повышение действующего на бетон давления воды приводит к дальнейшему росту микротрещин на некоторую величину, превращению микротрещин в магистральные трещины, развивающиеся в бетоне до тех пор, пока они не появятся на противоположной стороне бетонного элемента. По образовавшимся трещинам влага свободно фильтруется сквозь бетонный элемент, и сопротивление структуры бетона действию гидростатического давления равно нулю. Давление, при котором достигается предел стойкости бетона гидростатическому давлению, называется водопроницаемостью.

Математически этот процесс может быть описан в следующем виде. Энергетический баланс бетонного элемента, загружаемого гидростатическим давлением, может быть представлен зависимостью [3]

$$\frac{1}{2E} \pi \sigma^2 l^\sigma S^\sigma (1 - \mu^2) = 2vS^\sigma, \quad (1)$$

где σ — напряжение, действующее в устье приведенной трещины, Па; l^σ — длина приведенной трещины в бетонном элементе в момент действия напряжения σ , м;

S^σ — площадь приведенной трещины в бетонном элементе в момент действия напряжения σ , м²;

E — модуль упругости бетона, Па;

v — поверхностная энергия бетона, Дж / м²;

μ — коэффициент Пуассона.

Для учета скорости приложения гидростатической нагрузки была использована зависимость из кинетической теории С.Н. Журкова, представленная К.И. Кузнецовой в следующем виде [4]:

$$\frac{dl}{dt} = a_0 e^{\alpha_0 \sigma / R}. \quad (2)$$

Здесь a_0 — характеристика, отражающая склонность материала к трещинообразованию, м / с;

α_0 — характеристика, отражающая интенсивность трещинообразования, величина безразмерная;

R — прочность материала при определенном виде силового воздействия.

После подстановки в зависимость (2) параметров, учитывающих изменение скорости приложения гидростатического давления, эта формула примет вид

$$\frac{dl}{dt} = B_w \exp(\alpha_w \sigma / w), \quad (3)$$

где B_w — склонность бетона к трещинообразованию при гидростатическом давлении воды, м / Па;

α_w — интенсивность трещинообразования при гидростатическом давлении воды, величина безразмерная;

σ / w — уровень относительного действующего гидростатического давления на бетон, величина безразмерная.

Интегрирование уравнения (3) позволяет получить зависимость роста длины трещины от уровня гидростатического давления при условии действия линейного закона приложения давления во времени:

$$l^\sigma = \frac{B_w w}{\alpha_w} [\exp(\alpha_w \sigma / w) - 1]. \quad (4)$$

Постановка (4) в зависимость (1) и выделение значений водопроницаемости позволяют получить следующую формулу:

$$w = \sqrt[3]{\frac{8Ev\alpha_w}{\pi B_w [\exp(\alpha_w - 1)](1 - \mu^2)}}. \quad (5)$$

Здесь w — водопроницаемость бетона, Па.

Представленная математическая модель процесса разрушения бетона на гидростатическим давлением позволяет достаточно четко выделить две группы параметров, от которых зависит водопроницаемость бетона. Первая группа представлена начальными физико-механическими характеристиками бетона: модулем упругости, поверхностной энергией, коэффициентом Пуассона. Вторая группа характеристик, учитывающая интенсивность гидростатического давления, представлена двумя кинетическими характеристиками: склонностью бетона к трещинообразованию и интенсивностью трещинообразования.

В условиях стандартного загружения бетонных элементов гидростатическим воздействием значение совокупности кинетических характеристик является величиной постоянной и водопроницаемость бетона будет зависеть исключительно от значений начальных физико-механических характеристик. Получение последних неразрушающими способами позволяет разработать оперативный метод определения водопроницаемости бетона, который не требует громоздкого и энергоемкого оборудования.

Проводимые в настоящее время экспериментальные исследования подтверждают правильность разработанной математической модели и возможность применения оперативного метода для оценки водопроницаемости бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов, В.П. Прогнозирование ресурса долговечности бетона акустическими методами на основе механики разрушения [Текст] : Дис. ... д-ра техн. наук / В.П. Попов. — СПб. : ПГУПС, 1998. — 247 с.
2. Комухов, П.Г. Энергетические и кинетические аспекты механики разрушения бетона [Текст] / П.Г. Комухов, В.П. Попов. — Самара : РИА, 1999. — 111 с.
3. Griffith, A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids [Текст] / A.A. Griffith // Phil. Trans. Roy. Soc. — 1920. — N 221, ser. A. — P. 163–198.
4. Кузнецова, К.И. Закономерности разрушения упруговязких тел и некоторые возможности приложения их к сейсмологии [Текст] / К.И. Кузнецова. — М. : Наука, 1969. — 257 с.

ПОПОВ Д.В., асп.

Самарский государственный архитектурно-строительный университет
КОРЕНЬКОВА С.Ф., д-р техн. наук, проф.

Самарский государственный архитектурно-строительный университет
ПОПОВ В.П., д-р техн. наук, проф.

Самарский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 18.10.10

Popov D.V., post-graduate student, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Koren'kova S.F., doctor of technical sciences, professor, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Popov V.P., doctor of technical sciences, professor, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

MODELLING THE PROCESSES OF CONCRETE DESTRUCTION BY HYDROSTATIC PRESSURE ON BASE OF DESTRUCTION MECHANICS

The power concept is put in a basis of mechanics of concrete destruction, and for the description of development of processes in time — S.N. Zhurkov's kinetic theory. The

mathematical model of concrete destruction revealed in article has allowed to identify two groups of parametres on which water penetration of concrete depends, namely: the elasticity module, superficial energy, Puasson factor, and also propensity and intensity of crack formation.

Key words: destruction, concrete, hydrostatic pressure, destruction mechanics, modelling processes.

REFERENCES

1. Popov, V.P. Forecasting of concrete durability resource with the help of acoustic methods on the basis of destruction mechanics [Text]: Dis. ... doctor of technical sciences / V.P. Popov. — SPb. : PGUPS, 1998. — 247 p.
 2. Komohov, P.G. Energetic and kinetic aspects of concrete destruction mechanics [Text] / P.G. Komohov, V.P. Popov. — Samara : RIA, 1999. — 111 p.
 3. Griffith, A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids [Text] / A.A. Griffith // Phil. Trans. Roy. Soc. — 1920. — N 221, ser. A. — P. 163–198.
 4. Kuznetsova, K.I. Law of destruction of elastic-viscous bodies and some possibilities of their application to seismology [Text] / K.I. Kuznetsova. — M. : Science, 1969. — 257 p.
-

УДК 539.3

И.Н. СЕРПИК

ЭФФЕКТИВНЫЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПЛИТ ТИМОШЕНКО С ИСКЛЮЧЕНИЕМ ЗАКЛИНИВАНИЯ ИЗГИБНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Разрабатывается новый треугольный конечный элемент для расчета плит Тимошенко, формируемый на основе предельной схемы конечно-элементного анализа. На классических примерах для квадратных плит иллюстрируется высокая точность получаемых решений и отсутствие явления заклинивания изгибных деформаций при использовании этого конечного элемента.

Ключевые слова: плиты Тимошенко, конечный элемент, заклинивание, предельная схема, сходимость.

При конечно-элементном моделировании деформаций плит Тимошенко приходится сталкиваться с проблемой заклинивания, или запирания, изгибных составляющих решения [1], приводящего к снижению точности расчетов по мере уменьшения толщины пластины. Разработан ряд пластинчатых конечных элементов, позволяющих в значительной степени минимизировать влияние этого негативного фактора^{1–3}. Построены разнообразные конечные элементы для расчета толстых и тонких оболочек в объемной постановке, обеспечивающие отсутствие эффекта заклинивания^{4–6}. Тем не менее вопрос о получении простых и в то же время достаточно точных конечных элементов, полностью свободных от заклинивания изгибных деформаций и выполняющих все условия кусочного тестирования [1], еще требует проведения дальнейших исследований.

Ранее нами была рассмотрена предельная схема конечно-элементного анализа, обеспечивающая возможность построения эффективных конечных элементов для расчета тонких обшивок в рамках гипотез Кирхгофа [2–4]. Особенность данной методики состоит в получении согласованных конечных элементов путем выполнения аппроксимации перемещений только на отдельных отрезках. При этом удается удовлетворить условиям кусочного тестирования Айронса в предельном случае бесконечно малых

¹ Zienkiewicz O.C., Lefebvre D. A robust triangular plate bending element of the Reissner — Mindlin type // Intern. J. Numer. Meth. Eng. 1988. Vol. 26. P. 1169–1184.

² Wanji C., Cheung Y.K. Refined quadrilateral element based on Mindlin–Reissner plate theory // Intern. J. Numer. Meth. Eng. 2000. Vol. 47. P. 605–627.

³ Ayad R., Rigolot A. An improved four-node hybrid-mixed element based upon Mindlin's plate theory // Intern. J. Numer. Meth. Eng. 2002. Vol. 55. P. 705–731.

⁴ Киселев А.П. Расчет тонких оболочек на прочность в трехмерной постановке без упрощающих гипотез // Изв. вузов. Строительство. 2008. № 1. С. 18–23.

⁵ Гуреева Н.А., Клочков Ю.В., Николаев А.П. Расчет оболочки вращения при произвольном нагружении с использованием МКЭ на основе функционала Рейсснера // Вычисл. технологии. 2008. Т. 13, № 4. С. 51–59.

⁶ Гуреева Н.А., Клочков Ю.В., Николаев А.П. Расчет произвольных оболочек на основе МКЭ в смешанной формулировке с использованием аппроксимации тензорных полей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2010. № 1. С. 36–42.

элементов, а для относительно грубых сеток обеспечивается достижение решений достаточно высокой точности. В настоящей работе концепция предельной схемы метода конечных элементов реализуется применительно к расчету плит с учетом деформаций поперечного сдвига. Строится треугольный конечный элемент, в котором совместный учет деформаций от изгиба и поперечного сдвига полностью исключает заклинивание изгибных деформаций.

Ставим задачу расчета в линейной постановке плит Тимошенко в соответствии с теорией Рейсснера–Миндлина [1]. Учитываем следующие векторы обобщенных напряжений $\boldsymbol{\sigma}$ и деформаций $\boldsymbol{\epsilon}$ для плиты, срединная поверхность которой расположена в плоскости Ox_1x_2 декартовой системы координат $Ox_1x_2x_3$ ⁷:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} M_{x1} \\ M_{x2} \\ M_{x12} \\ Q_{x1} \\ Q_{x2} \end{pmatrix}, \boldsymbol{\epsilon} = \begin{pmatrix} \chi_{x1} \\ \chi_{x2} \\ \chi_{x12} \\ \gamma_{x1} \\ \gamma_{x2} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \partial^2 \delta_{x3} / \partial x_1^2 + \partial \phi_{x1} / \partial x_1 \\ \partial^2 \delta_{x3} / \partial x_2^2 + \partial \phi_{x2} / \partial x_2 \\ 2\partial^2 \delta_{x3} / \partial x_1 \partial x_2 + \partial \phi_{x1} / \partial x_2 + \partial \phi_{x2} / \partial x_1 \\ \phi_{x1} \\ \phi_{x2} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где M_{x1} , M_{x2} — изгибающие моменты в плоскостях Ox_1x_3 и Ox_2x_3 ; M_{x12} — кручущий момент в этой системе осей; Q_{x1} , Q_{x2} — поперечные силы в плоскостях Ox_1x_3 и Ox_2x_3 ; χ_{x1} , χ_{x2} , χ_{x12} — деформации, вызванные изгибом; δ_{x3} — проекция вектора прогиба на ось Ox_3 ; γ_{x1} , γ_{x2} — деформации поперечного сдвига; ϕ_{x1} , ϕ_{x2} — углы поворота нормали к срединной поверхности плиты в плоскостях Ox_1x_3 и Ox_2x_3 , вызванные сдвиговыми деформациями.

Введем треугольный конечный элемент с тремя узлами в углах (рис. 1, a). В каждом i -м узле рассматривается по три обобщенных перемещения: $\delta_{x3}^{(i)}$ и полные углы поворота $\theta_{x1}^{(i)}$ и $\theta_{x2}^{(i)}$ нормали к срединной поверхности плиты относительно осей Ox_1 и Ox_2 . Вектор обобщенных узловых перемещений конечного элемента представим в виде

$$\boldsymbol{\delta}_x = \{\delta_{x3}^{(1)} \quad \theta_{x1}^{(1)} \quad \theta_{x2}^{(1)} \quad \delta_{x3}^{(2)} \quad \theta_{x1}^{(2)} \quad \theta_{x2}^{(2)} \quad \delta_{x3}^{(3)} \quad \theta_{x1}^{(3)} \quad \theta_{x2}^{(3)}\}^T. \quad (2)$$

Для описания деформаций изгиба и поперечного сдвига будем выполнять аппроксимацию перемещений по границам элемента и его медианам. В соответствии с предельной схемой метода конечных элементов зададим вспомогательные точки 4, 5, 6 по серединам сторон треугольника. Необходимо выразить обобщенные деформации в этих точках через обобщенные перемещения узлов.

Получим зависимости для определения обобщенных деформаций в точке 4. Используем аппроксимацию перемещений на отрезках 1–2 и 3–4. Первоначально рассмотрим отрезок 1–2, а затем на основе выражения обобщенных перемещений в точке 4 через обобщенные перемещения узлов 1 и 2 выполним аппроксимацию по отрезку 3–4. При описании вдоль каждого из этих отрезков прогибов и деформаций поперечного сдвига воспользуемся приведенной Р. Галагером схемой построения матрицы жесткости конечного элемента для подвергаемого прямому изгибу стержня Тимошенко⁸. В этой процедуре применяется метод сил в предложении, что сдвиговая деформация является постоянной по длине

⁷ Секулович М. Метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1993. 664 с.

⁸ Галагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. 428 с.

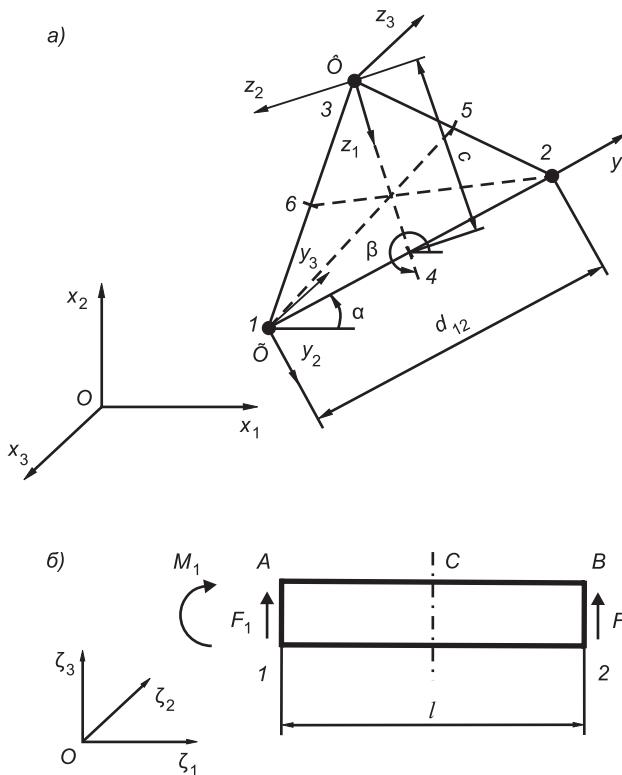


Рис. 1. Схемы конечных элементов

а — треугольный конечный элемент; *б* — вспомогательный стержневой конечный элемент

стержня. Пусть векторы обобщенных узловых перемещений δ и сил \mathbf{R} для стержневого конечного элемента с двумя узлами (рис. 1, б) записываются таким образом:

$$\delta = \begin{Bmatrix} \delta_{\zeta_3}^{(1)} \\ \theta_{\zeta_2}^{(1)} \\ \delta_{\zeta_3}^{(2)} \\ \theta_{\zeta_2}^{(2)} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ M_1 \\ F_2 \\ M_2 \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где осевые и угловые перемещения обозначаются по аналогии с соответствующими перемещениями для пластин;

F_i, M_i — сила и момент для узла i ($i = 1, 2$).

Тогда матрица жесткости стержневого конечного элемента определяется выражением⁹

$$K_s = \begin{bmatrix} \Delta^{-1} & \Delta^{-1} L^T \\ L \Delta^{-1} & L \Delta^{-1} L^T \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где Δ — матрица, связывающая вектор обобщенных перемещений $\delta_1 = \{\delta_{\zeta_3}^{(1)}, \theta_{\zeta_2}^{(1)}\}^T$ узла 1 с вектором обобщенных сил $\mathbf{R}_1 = \{F_1\}^T$ этого узла

в случае, когда конечный элемент рассматривается в виде консоли, защемленной в узле 2:

⁹ Галагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. 428 с.

$$\delta_1 = \Delta \mathbf{R}_1, \quad \Delta = \begin{bmatrix} \frac{l^3}{3E_s J_s} + \frac{kl}{G_s A_s} & \frac{l^2}{2E_s J_s} \\ \frac{l^2}{2E_s J_s} & \frac{l}{E_s J_s} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

L — матрица, связывающая в соответствии с условиями равновесия векторы обобщенных сил узлов 1 и 2:

$$\mathbf{R}_2 = L \mathbf{R}_1, \quad L = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -l & -1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Здесь l — длина стержня;

E_s, G_s — модуль упругости и модуль сдвига материала стержня;

A_s, J_s — площадь и рассматриваемый при плоском изгибе осевой момент инерции его поперечного сечения;

k — коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения стержня.

Учитывая отсутствие изменения сдвиговой деформации по длине стержневого конечного элемента, мы можем выразить обобщенные деформации и перемещения в его среднем поперечном сечении C через величины F_1, M_1 следующим образом:

$$\chi^C = -\left(\frac{\partial^2 \delta_{\zeta 3}}{\partial \zeta_1^2}\right)^C = -\frac{1}{E_s J_s} \left(F_1 \frac{l}{2} + M_1\right), \quad \gamma^C = -\varphi^C = -\frac{kF_1}{G_s A_s}; \quad (7)$$

$$\delta_{\zeta 3}^C = \left(\frac{5l^3}{48E_s J_s} + \frac{kl}{2G_s A_s}\right) F_1 + \frac{l^2}{8E_s J_s} M_1, \quad \theta_{\zeta 2}^C = \frac{3l^2}{8E_s J_s} F_1 + \frac{l}{2E_s J_s} M_1, \quad (8)$$

где χ^C, γ^C — обобщенные деформации изгиба и сдвига для сечения C ;

φ^C — угол поворота сечения C , обусловленный сдвигом.

Обобщенные деформации в сечении B определяются равенствами

$$\chi^B = -\left(\frac{\partial^2 \delta_{\zeta 3}}{\partial \zeta_1^2}\right)^B = -\frac{1}{E_s J_s} (F_1 l + M_1), \quad \gamma^B = -\varphi^B = -\varphi^C. \quad (9)$$

В качестве вспомогательных стержней будем рассматривать полосы прямоугольного поперечного сечения. При этом, как известно, $k = 1, 2$. Ширина полос и модуль упругости материала не влияют на результаты аппроксимации.

Считаем, что угол поворота $\theta_{\zeta 1}$ относительно оси $O\zeta_1$ изменяется вдоль этой оси по линейному закону. С учетом данного положения, равенства

$$\mathbf{R} = K_s \boldsymbol{\delta} \quad (10)$$

и формул (7), (8) мы можем связать значения $\partial^2 \delta_{y3} / \partial y_1^2, \partial^2 \delta_{y3} / \partial y_1 \partial y_2, \varphi_{y1}$ и обобщенных перемещений в точке 4 треугольного конечного элемента через обобщенные перемещения точек 1 и 2. Далее с использованием зависимостей (9), (10) значения $\partial^2 \delta_{z3} / \partial z_1^2, \varphi_{z1}$ в точке 4 можно выразить через обобщенные перемещения точек 3 и 4. Тогда будем иметь

$$\mathbf{Q}_{\Lambda}^{(4)} = \Pi \boldsymbol{\delta}_y, \quad (11)$$

где $\mathbf{Q}_\Lambda^{(4)}$ — вектор $\mathbf{Q}_\Lambda = \{\partial^2 \delta_{y_3} / \partial y_1^2, \partial^2 \delta_{y_3} / \partial y_1 \partial y_2, \partial^2 \delta_{y_3} / \partial z_1^2, \phi_{y_1}, \phi_{z_1}\}^T$ для точки 4;

$$\Pi = \text{diag} \left(\frac{1}{E_s J_s}, 1, \frac{1}{E_s J_s}, \frac{k}{G_s A_s}, \frac{k}{G_s A_s} \right) [\Phi];$$

$$[\Phi] = [\Phi_1 \ \Phi_2 \ \Phi_3];$$

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} K_{11}^d d_{12} / 2 + K_{21}^d & 0 & K_{12}^d d_{12} / 2 + K_{22}^d \\ 0 & -1/d_{12} & 0 \\ H_{31} K_{23}^c + T_{31} l_1 K_{24}^c + S_{31} & -(K_{14}^c c + K_{24}^c) l_2 / 2 & H_{33} K_{23}^c + T_{33} l_1 K_{24}^c + S_{33} \\ K_{11}^d & 0 & K_{12}^d \\ S_{61} / c & -K_{14}^c l_2 / 2 & S_{63} / c \end{bmatrix};$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} K_{13}^d d / 2 + K_{23}^d & 0 & K_{14}^d d_{12} / 2 + K_{24}^d \\ 0 & 1/d_{12} & 0 \\ H_{34} K_{23}^c + T_{34} l_1 K_{24}^c + S_{34} & -(K_{14}^c c + K_{24}^c) l_2 / 2 & H_{36} K_{23}^c + T_{36} l_1 K_{24}^c + S_{36} \\ K_{13}^d & 0 & K_{14}^d \\ S_{64} / c & -K_{14}^c l_2 / 2 & S_{66} / c \end{bmatrix};$$

$$\Phi_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ K_{11}^c c + K_{21}^c & -T_{38} l_2 & T_{39} l_1 \\ 0 & 0 & 0 \\ K_{11}^c & -K_{12}^c l_2 & K_{12}^c l_1 \end{bmatrix};$$

$K_{ij}^d, K_{ij}^c (i, j = 1, \dots, 4)$ — элементы матриц жесткости вспомогательных стержней, введенных соответственно для отрезков 1–2 и 3–4 (см. рис. 1, a); d_{12}, c — длина отрезков 1–2 и 3–4;

$$H_{31} = K_{11}^d \delta_{CF} + K_{21}^d \delta_{CM}; \quad T_{31} = K_{11}^d \theta_{CF} + K_{21}^d \theta_{CM}; \quad S_{31} = (H_{31} K_{13}^c + T_{31} l_1 K_{14}^c) c;$$

$$H_{33} = K_{12}^d \delta_{CF} + K_{12}^d \delta_{CM}; \quad T_{33} = K_{12}^d \theta_{CM} + K_{22}^d \theta_{CF}; \quad S_{33} = (H_{33} K_{13}^c + T_{33} l_1 K_{14}^c) c;$$

$$H_{34} = K_{13}^d \delta_{CF} + K_{23}^d \delta_{CM} + 1; \quad T_{34} = K_{13}^d \theta_{CF} + K_{23}^d \theta_{CM}; \quad S_{34} = (H_{34} K_{13}^c + T_{34} l_1 K_{14}^c) c;$$

$$H_{36} = K_{14}^d \delta_{CF} + K_{24}^d \delta_{CM} + d_{12} / 2; \quad T_{36} = K_{14}^d \theta_{CF} + K_{24}^d \theta_{CM} + 1;$$

$$S_{36} = (H_{36} K_{13}^c + T_{36} l_1 K_{14}^c) c; \quad T_{38} = K_{12}^c c + K_{22}^c;$$

$$T_{39} = T_{38}; \quad S_{61} = S_{31}; \quad S_{63} = S_{33}; \quad S_{64} = S_{34}; \quad S_{66} = S_{36};$$

$$\delta_{CF} = \frac{5d_{12}^3}{48E_s J_s} + \frac{kd_{12}}{2G_s A_s}; \quad \delta_{CM} = \frac{d_{12}^2}{8E_s J_s}; \quad \theta_{CF} = \frac{3d_{12}^2}{8E_s J_s}; \quad \theta_{CM} = \frac{d_{12}}{2E_s J_s}$$

— соответственно прогибы и углы поворота центрального сечения вспомогательного стержня, построенного для отрезка 1–2, от действия поперечной силы $F_1 = 1$ и момента $M_1 = 1$;

l_1, l_2 — направляющие косинусы [1] оси Oz_1 по отношению к осям Oy_1 и Oy_2 ;

δ_y — вектор обобщенных узловых перемещений в осях $Oy_1 y_2 y_3$.

Используя методы дифференциальной геометрии, можно получить зависимость

$$\mathbf{Q}_\Lambda = \Lambda \mathbf{Q}, \quad (12)$$

где

$$\mathbf{Q} = \left\{ \frac{\partial^2 \delta_{x3}}{\partial x_1^2} \frac{\partial^2 \delta_{x3}}{\partial x_2^2} \frac{\partial^2 \delta_{x3}}{\partial x_1 \partial x_2} \phi_{x1} \phi_{x2} \right\}^T; \quad (13)$$

α, β — углы, показанные на рис. 1, а;

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -\cos^2 \alpha & -\sin^2 \alpha & -\sin 2\alpha & 0 & 0 \\ -0,5\sin 2\alpha & 0,5\sin 2\alpha & \cos 2\alpha & 0 & 0 \\ -\cos^2 \beta & -\sin^2 \beta & -\sin 2\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & 0 & 0 & -\cos \beta & -\sin \beta \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Согласно уравнениям (1), (12), (13), вектор $\boldsymbol{\epsilon}^{(4)}$ обобщенных деформаций плиты в точке 4 с учетом отсутствия изменения угла сдвига по длине каждого вспомогательного стержня может быть представлен с помощью равенства

$$\boldsymbol{\epsilon}^{(4)} = \Psi \Lambda^{-1} \mathbf{Q}_\Lambda^{(4)}, \quad (15)$$

где $\Psi = -\text{diag}(1 1 2 1 1)$.

Введем матрицу деформаций $B^{(4)}$ для точки 4, выражающую вектор $\boldsymbol{\epsilon}^{(4)}$ через вектор $\boldsymbol{\delta}_x$:

$$\boldsymbol{\epsilon}^{(4)} = B^{(4)} \boldsymbol{\delta}_x. \quad (16)$$

Принимая во внимание соотношения (11), (15) и (16), будем иметь

$$B^{(4)} = \Psi \Lambda^{-1} \Pi T,$$

где T — матрица, связывающая вектор $\boldsymbol{\delta}_y$ с вектором $\boldsymbol{\delta}_x$:

$$\boldsymbol{\delta}_y = T \boldsymbol{\delta}_x.$$

Как известно,

$$T = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix},$$

где в данном случае матрица

$$\lambda = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & -\cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

Матрицы деформаций $B^{(5)}, B^{(6)}$ для точек 5, 6 могут быть получены аналогично.

Рассматриваем точки 4, 5, 6 как точки интегрирования. Применяя второй порядок квадратуры Гаусса [1], запишем следующую зависимость для вычисления матрицы жесткости треугольного конечного элемента:

$$K = \frac{1}{3} F \sum_{i=4}^6 (B^{(i)})^T D B^{(i)},$$

где F — площадь треугольника;

D — матрица упругости, которая для изотропного материала определяется зависимостью [1]

$$D = \begin{bmatrix} \tilde{D} & \tilde{D}\nu & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{D}\nu & \tilde{D} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{D} \frac{1-\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{5E}{12(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{5E}{12(1+\nu)} \end{bmatrix};$$

$\tilde{D} = Eh^3 / (12(1-\nu^2))$, E , ν — модуль упругости и коэффициент Пуассона материала плиты, h — толщина плиты.

Используемые нами схемы аппроксимации перемещений вдоль отрезков выражаются функциями, которые описывают работу некоторых условных стержней при поперечном изгибе и чистом кручении в случае задания обобщенных перемещений по концевым точкам. Для таких функций обеспечивается возможность воспроизведения смещения конечного элемента как абсолютно твердого тела и состояния постоянных обобщенных деформаций по его длине. При постоянных обобщенных деформациях в плите их значения для всех точек рассматриваемых отрезков будут совпадать со значениями соответствующих обобщенных деформаций в условных стержнях. Отсюда следует возможность удовлетворения условия постоянных деформаций для одного треугольного конечного элемента. Выполнение условия жесткого смещения автоматически реализуется как частный случай постоянных деформаций. На границе между любыми двумя стыкающимися конечными элементами прогиб δ_{x_3} и углы поворота θ_{x_1} и θ_{x_2} при постоянных деформациях полностью определяются обобщенными перемещениями узлов, принадлежащих обоим этим элементам. То есть дискретизация в данных условиях является конформной и имеется возможность описания постоянных деформаций для группы конечных элементов, что говорит о выполнении требований кусочного тестирования по Айронсу [1].

Для иллюстрации эффективности разработанного конечного элемента приведем некоторые результаты расчета квадратных пластин с шарнирно опертым и защемленным контуром, подверженных действию равномерно распределенной нагрузки интенсивностью q . Вводились равномерные последовательно сгущающиеся сетки конечных элементов. На рис. 2 поясне-

на схема получения этих сеток на примере первых двух разбиений.

В таблице отражены возможности данного конечного элемента при расчете пластин с малой толщиной, на рис. 3 приведена зависимость получаемых решений от соотношения стороны квадрата b и величины h , на рис. 4 — скорость сходимости результатов к точному решению по мере сгущения сетки при $h/b = 0,1$. Здесь

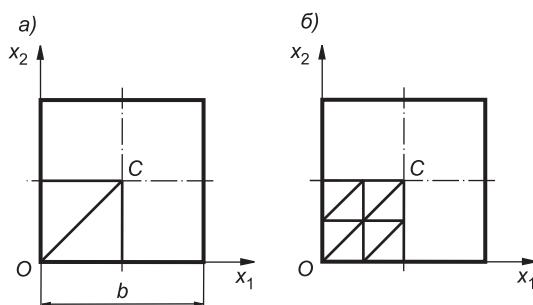


Рис. 2. Квадратная пластина с разбиейкой четвертой части системы на треугольные конечные элементы

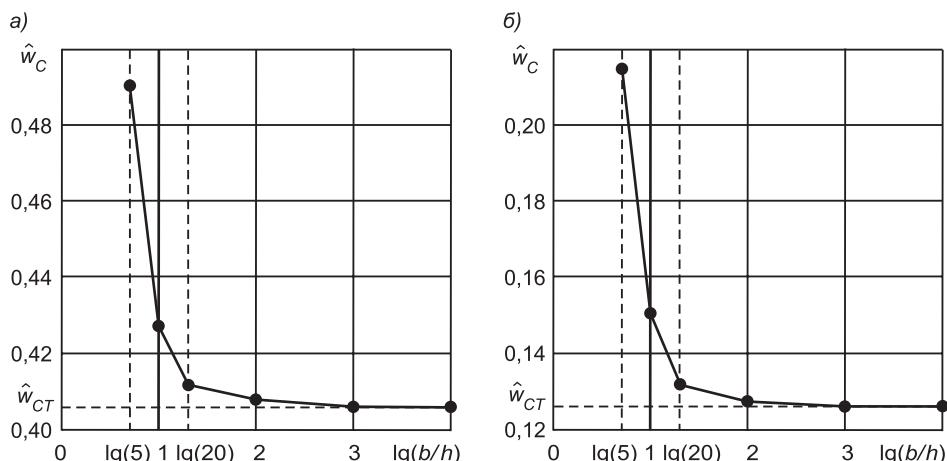
а — сетка 1×1 ; б — сетка 2×2

Результаты расчетов при $h/b = 0,00001$

Сетка	\hat{w}_c		\hat{M}_{lc}	
	шарнирное опирание	защемление по контуру	шарнирное опирание	защемление по контуру
2×2	0,4017	0,1233	0,04259	0,02355
4×4	0,4051	0,1255	0,04687	0,02225
8×8	0,4060	0,1257	0,04791	0,02287
16×16	0,4062	0,1263	0,04789	0,02290
32×32	0,4062	0,1265	0,04789	0,02290
Точное решение для тонкой пластины [1]	0,4062	0,1265	0,04789	0,02291

$\hat{w}_c = 100w_c \tilde{D} / (qb^4)$; w_c — прогиб в центре C пластины; $\hat{M}_{lc} = M_{lc} / (qb^2)$; M_{lc} — значение момента M_l в точке C ; \hat{w}_{ct} — точное значение \hat{w}_c (на рис. 3 точное решение рассматривается при справедливости гипотез Кирхгофа); n — число полос конечных элементов в направлениях координатных осей Ox_1 и Ox_2 ; $e = [(\hat{w}_c - \hat{w}_{ct}) / \hat{w}_{ct}] \cdot 100\%$ — погрешность определения прогиба. При этом на рис. 4 результаты расчета с помощью предлагаемого конечного элемента сопоставлены с данными, полученными при использовании треугольных трехузловых конечных элементов в программном комплексе STARK_ES 4.2 (лицензия Брянской государственной инженерно-технологической академии № 060154 от 4.12.2006 г.), где при шарнирном опирании $\hat{w}_{ct} = 0,4273$, при защемлении по контуру $\hat{w}_{ct} = 0,1499$ [1]; ПС — конечный элемент, разработанный на основе предельной схемы метода конечных элементов; РСН, ЛГР — конечные элементы программного комплекса STARK_ES 4.2, основанные соответственно на применении функционала Рейсснера (гибридный конечный элемент) и функционала Лагранжа (метод перемещений).

Из таблицы и рис. 3 видно, что для предлагаемого конечного элемента не проявляется эффект заклинивания изгиблых деформаций при малых толщинах пластины. Согласно таблице и рис. 4, получаемые с помощью данного конечного элемента решения стремятся к точным значениям по мере сгущения сетки. Для относительно крупных сеток рассматриваемый



Rис. 3. Зависимость прогиба в центре пластин от отношения b/h

a, б — для пластин с шарнирно опертым и защемленным контуром

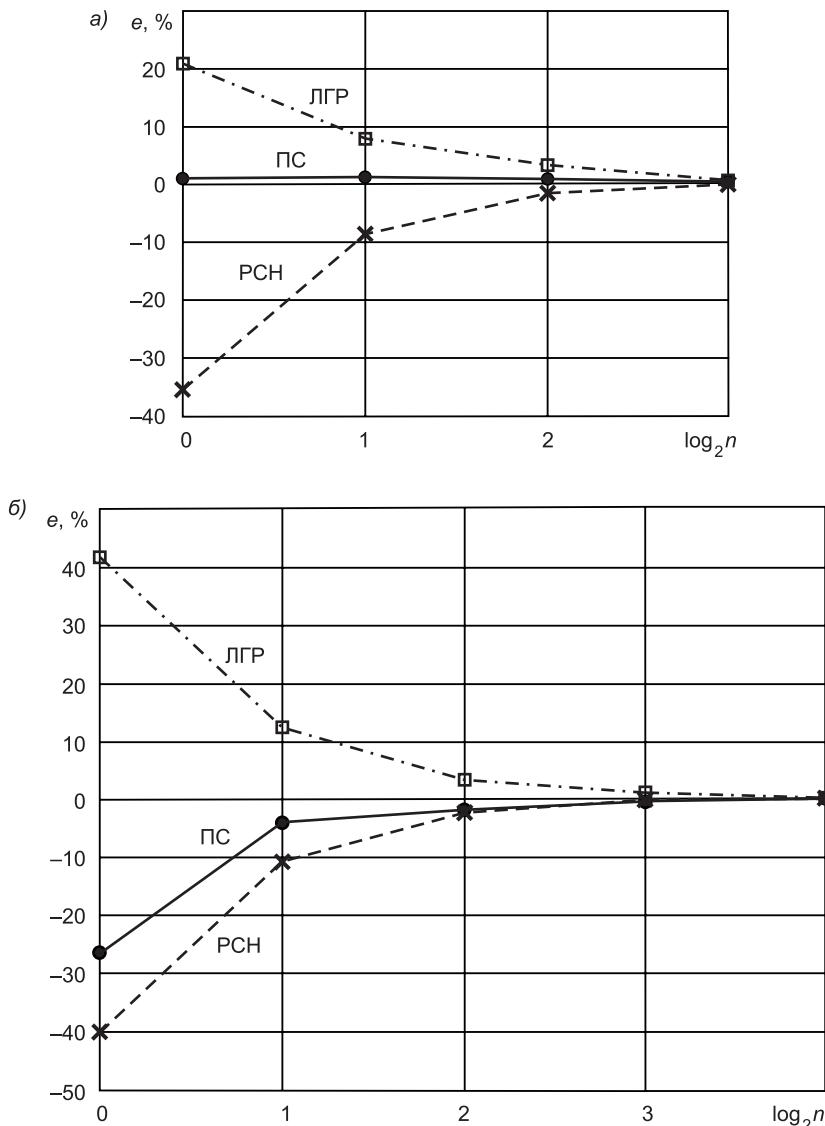


Рис. 4. Зависимость точности определения прогиба в центре пластин от густоты сетки конечных элементов при $h/b = 0,1$
а, б — для пластин с шарнирно опертым и защемленным контуром

нами подход к аппроксимации перемещений позволяет добиваться существенно меньших погрешностей расчетов по сравнению с сопоставляемыми треугольными конечными элементами.

Выводы. 1. Разработан новый треугольный трехузловой конечный элемент для анализа работы плит Тимошенко с использованием концепции предельной схемы метода конечных элементов. Этот конечный элемент удовлетворяет всем требованиям кусочного тестирования по Айронсу и свободен от явления запирания изгибных деформаций. По мере сгущения сетки элементов результаты расчетов с помощью рассматриваемой схемы дискретизации плит стремятся к точным решениям задач, а при уменьшении толщины пластин — к результатам расчетов, полученным в соответствии с теорией Кирхгофа.

2. Учитывая простоту и высокую точность предлагаемого конечного элемента, его можно рекомендовать к использованию в пакетах прикладных программ конечно-элементного анализа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zienkiewicz, O.C. The finite element method. Vol. 2: Solid mechanics [Text] / O.C. Zienkiewicz, R.I. Taylor. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000. — 459 p.
2. Серпик, И.Н. Неявная аппроксимация перемещений в пластинчатых конечных элементах [Текст] / И.Н. Серпик. — Деп. в ВИНТИ 28.11.2001, № 2485—B2001. — Брянск : Брян. гос. техн. ун-т, 2001.— 8 с.
3. Серпик, И.Н. Предельная схема метода конечных элементов для численного моделирования деформаций пластин и оболочек [Текст] / И.Н. Серпик // Тр. III Все-рос. конф. по теории упругости с международным участием. — Ростов н/Д, 2004. — С. 322–324.
4. Серпик, И.Н. Треугольная дискретизация тонких оболочек на основе модифицированного подхода к кусочному тестированию в методе конечных элементов [Текст] / И.Н. Серпик // Строительная механика и расчет сооружений. — 2010. — № 1. — С. 27–33.

СЕРПИК И.Н., д-р техн. наук, проф.; E-mail: iserpik@online.debryansk.ru
Брянская государственная инженерно-технологическая академия

Получено после доработки 18.10.10

Serpik I.N., doctor of technical sciences, professor; E-mail: iserpik@online.debryansk.ru, Bryansk State Technological Academy of Engineering, Russia

AN EFFECTIVE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF TIMOSHENKO PLATES WITH EXCEPTION OF LOCKING FOR BENDING DEFORMATION

A new triangular finite element for calculating of Timoshenko plates is developed on the basis of the limit scheme of finite element analysis. The high accuracy of the decisions and the absence of the locking effect for bending deformations by using this finite element are illustrated on the classical examples for the square plates.

Key words: Timoshenko plates, finite element, locking, limit scheme, convergence.

REFERENCES

1. Zienkiewicz, O.C. The finite element method. Vol. 2: Solid mechanics [Text] / O.C. Zienkiewicz, R.I. Taylor. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000. — 459 p.
2. Serpik, I.N. Implicit approximation of displacements in the plate finite elements [Text] / I.N. Serpik. — Dep. at VINITI 28.11.2001, N 2485 — B2001.— Bryansk: Bryansk State Technical University, 2001. — 8 p.
3. Serpik, I.N. The limit scheme of the finite element method for numerical simulation of plates and shells strains [Text] / I.N. Serpik // Proc. III All-Russian Conf. on Elasticity Theory with International Participation.— Rostov-on-Don, 2004.— P. 322–324.
4. Serpik, I.N. Triangular discretization of thin shells on base of modified approach to patch test in finite element method [Text] / I.N. Serpik // Building Mechanics and Calculation Constructions. — 2010. — N 1. — P. 27–33.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.001

Р.В. ТАРАСОВ, Л.В. МАКАРОВА, О.В. КОРОЛЕВА, Ю.В. ГРАЧЕВА

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

Выбор методов получения наноразмерных порошков зависит от химической природы соединения, требуемого размера его частиц и имеющейся экспериментальной базы. Расчет обобщенного критерия выбора направления модифицирования позволил определить наиболее рациональные технологии получения наноразмерных модификаторов для модификации структуры и управления свойствами строительных композитов.

Ключевые слова: строительные композиты, наноразмерные модификаторы, обобщенный критерий.

Разработанные к настоящему времени методы получения нанопорошков весьма разнообразны. В литературе приводится около десятка классификаций этих методов по разным физическим и химическим принципам [1–4]^{1, 2}. Например, существует классификация методов по принципу изменения размера частиц в процессе синтеза:

— диспергационные методы (основаны на диспергировании исходных материалов);

— конденсационные методы (основаны на получении наночастиц из систем, в которых вещества диспергированы на молекулярном (атомном) уровне).

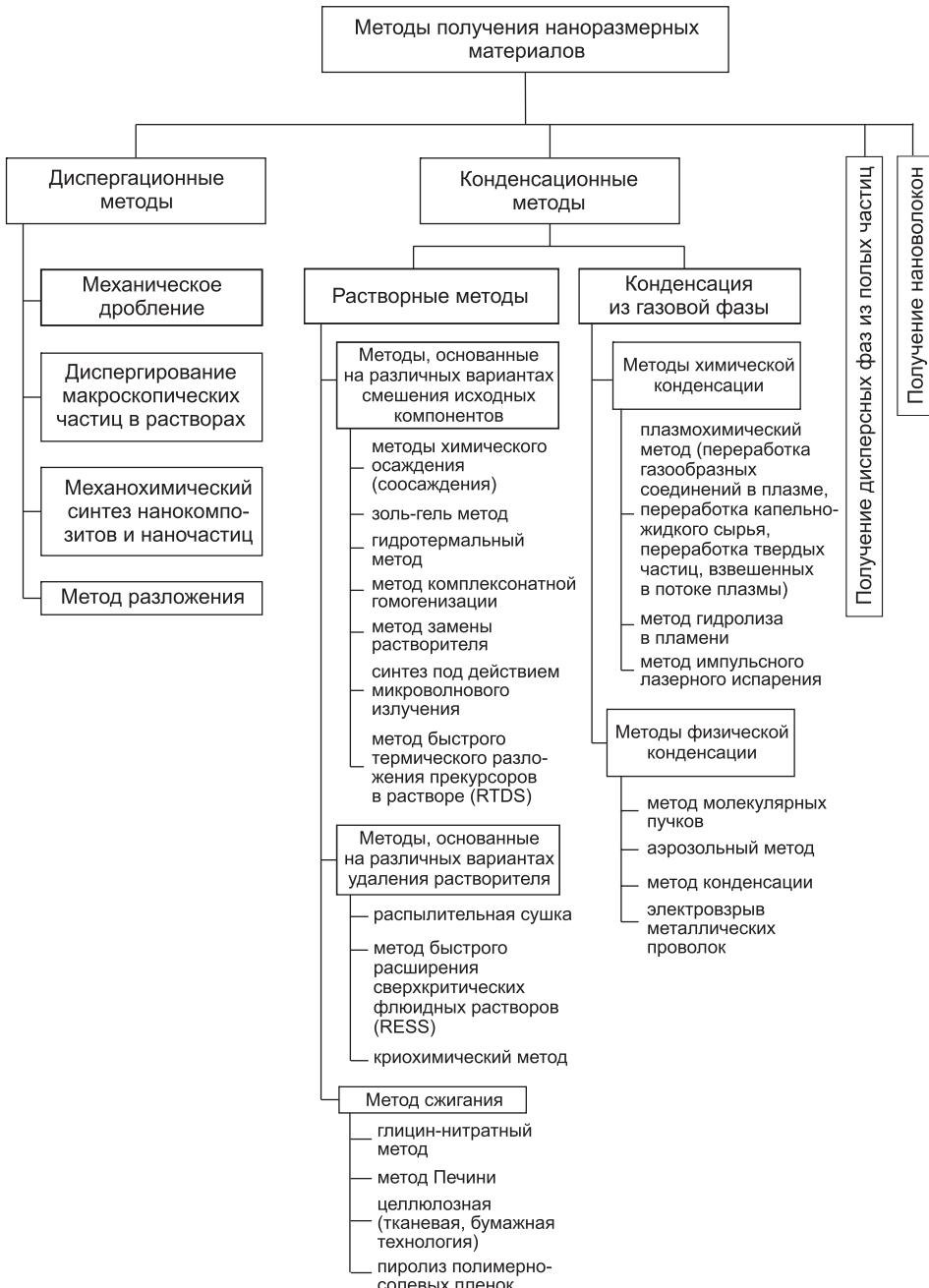
Не менее продуктивной и логичной является классификация методов по агрегатному состоянию исходных веществ: газофазные, жидкофазные, твердофазные. Наиболее предпочтительной является классификация по принципу изменения размера частиц в процессе синтеза, представленная на рисунке.

Таким образом, существует несколько десятков методов получения нанопорошков. Какой из них выбрать при синтезе искомого соединения? Выбор зависит от химической природы соединения, требуемого размера его частиц и имеющейся в лаборатории экспериментальной базы.

Наиболее простые, не требующие сложного аппаратурного оформления способы получения сложных оксидов — методы осаждения, сжигания, комплексонатный метод и метод полимерно-солевых композиций. Золь-гель метод также прост, но обычно для получения мелкодисперсного продукта в качестве прекурсоров требуются малодоступные аллоксиды металлов. Довольно легко реализуемы также гидротермальный и микро-

¹ Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2005. 336 с.

² Смирнов В.М. Химияnanoструктур. Синтез, строение, свойства. СПб.: СПбГУ, 1996.



Методы получения наноразмерных модификаторов

волновый методы при наличии в лаборатории автоклава и микроволновой печи.

Для определения рациональной технологии получения наноразмерных модификаторов составим обобщенный критерий, содержащий следующие частные критерии (табл. 1):

- 1) энергоэффективности технологии;
- 2) оснащенности традиционным оборудованием;
- 3) реализации самоорганизации материи;
- 4) структурной устойчивости;
- 5) размера частиц.

Таблица 1

Группы свойств и их количественная оценка

№ п/п	Наименование критерия	Расчетная формула	Пояснение
1	Критерий энергоэффективности технологии	$k_p = \frac{\sum T_o t_o}{\sum_j T_j t_j}$	T_o, t_o — соответственно температура и продолжительность стадии технологического процесса энергоэффективного производства наноразмерного модификатора; T_j, t_j — соответственно температура и продолжительность стадии технологического процесса синтеза наноразмерного модификатора
2	Критерий оснащенности традиционным оборудованием	$k_{ob} = \frac{n}{N}$	n — количество имеющегося оборудования при традиционной технологии; N — количество необходимого оборудования для получения наноразмерных модификаторов
3	Критерий реализации самоорганизации материи	k_{co}	$k_{co} = 1,0$ при самоорганизации материи; $k_{co} = 0,5$ при синтезе энергоемких структур
4	Критерий структурной устойчивости	k_y	$k_y = 1,0$ при термодинамически стабильных соединениях; $k_y = 0,5$ при синтезе неустойчивых соединений
5	Критерий размера частиц	$k_d = \frac{d_{50}}{d}$	при $k_d > 1$ принимаем $k_d = 1,0$ или при $d < 50$ нм — $k_d = 1,0$

Обобщенный критерий выбора направления модификации целесообразно представить в виде

$$k_{ef} = \sqrt[5]{k_p k_{ob} k_{co} k_y k_d}$$

Значения частных и обобщенного критериев определяли с применением экспертного метода. Полученные результаты сведены в табл. 2, анализ которой показывает, что наиболее рационально при получении

Таблица 2

Значения частных и обобщенного критериев для выбора технологии получения наноразмерных модификаторов

№ п/п	Наименование метода	Значения частных критериев					Значение обобщенного критерия
		k_p	k_{ob}	k_{co}	k_y	k_d	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Механическое дробление	0,2	0,95	1,0	0,5	0,6	0,56
2	Ультразвуковое диспергирование макроскопических частиц в растворе	0,25	0,8	1,0	0,5	0,9	0,62
3	Механический синтез нанокомпозитов и наночастиц	0,2	0,95	1,0	0,5	1,0	0,62
4	Метод разложения	0,95	0,93	1,0	1,0	1,0	0,98
5	Методы химического осаждения (со-осаждения)	0,8	0,98	1,0	1,0	0,9	0,93
6	Золь-гель метод	0,8	0,98	1,0	1,0	0,9	0,93
7	Гидротермальный метод	0,85	0,92	1,0	1,0	0,93	0,94
8	Метод комплексонатной гомогенизации	0,8	0,9	1,0	1,0	0,85	0,91
9	Метод замены растворителя	0,9	0,8	0,5	0,5	1,0	0,71

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
10	Синтез под действием микроволнового излучения	0,92	0,85	1,0	1,0	1,0	0,95
11	Метод RTDS	0,91	0,68	0,5	0,5	0,85	0,67
12	Распылительная сушка	0,87	0,6	1,0	0,5	0,9	0,75
13	Метод RESS	0,89	0,71	0,5	1,0	0,9	0,78
14	Криохимический метод	0,82	0,72	1,0	1,0	0,9	0,88
15	Глицин-нитратный метод	0,8	0,68	0,5	1,0	0,85	0,75
16	Метод Печини	0,92	0,9	1,0	1,0	0,4	0,80
17	Целлюлозная (тканевая, бумажная) технология	0,9	0,9	0,5	1,0	0,85	0,81
18	Пиролиз полимерно-соловых пленок	0,61	0,85	0,5	1,0	0,85	0,74
19	Плазмохимический метод а) переработка газообразных соединений в плазме б) переработка капельно-жидкого сырья в) переработка твердых частиц, взвешенных в потоке плазмы	0,56 0,58 0,6	0,5 0,6 0,48	0,5 0,5 0,5	1,0 1,0 1,0	0,85 0,6 0,8	0,65 0,64 0,65
20	Метод гидролиза в пламени	0,56	0,63	0,5	1,0	0,75	0,67
21	Метод импульсивного лазерного испарения	0,61	0,7	0,5	1,0	0,9	0,72
22	Метод молекулярных пучков	0,46	0,71	0,5	0,5	0,95	0,60
23	Аэрозольный метод	0,52	0,72	1,0	1,0	0,85	0,80
24	Метод криоконденсации	0,6	0,73	0,5	1,0	1,0	0,74
25	Электровзрыв металлических проволок	0,7	0,4	0,5	1,0	0,9	0,66
26	Получение нановолокон — золь-гель метод — конденсация из газовой фазы	0,78 0,82	0,8 0,75	1,0 1,0	1,0 1,0	0,9 0,9	0,89 0,89
27	Получение дисперсных фаз из полых сферических и трубообразных частиц	0,75	0,72	0,5	1,0	0,85	0,75

наноразмерных модификаторов для модификации структуры и управления свойствами строительных композитов целесообразно применять:

- метод разложения;
- метод химического осаждения (соосаждения);
- золь-гель метод;
- гидротермальный метод;
- метод комплексонатной гомогенизации;
- синтез под действием микроволнового излучения.

Работа выполнялась в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (госконтракт с Федеральным агентством по образованию РФ № П1456).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рusanov, A.I. Термодинамические основы механохимии [Текст] / A.I. Rusanov. — СПб. : Наука, 2006. — 221 с.
2. Sergeev, G.B. Нанохимия [Текст] / G.B. Sergeev. — M. : Изд-во МГУ, 2003. — 288 с.

3. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. — М. : Физматлит, 2005. — 416 с.
4. Андриевский, Р.А. Nanostructural materials [Text] / R.A. Andrievsky, A.V. Ragulya. — M. : Изд. центр «Академия», 2005. — 192 с.

ТАРАСОВ Р.В., канд. техн. наук, доц.

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
МАКАРОВА Л.В., канд. техн. наук, доц.*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
КОРОЛЕВА О.В., канд. техн. наук, ст. препод.*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
ГРАЧЕВА Ю.В., канд. техн. наук, ст. препод.*

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 04.03.10

Tarasov R.V., candidate of technical sciences, assistant professor, Penza State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Makarova L.V., candidate of technical sciences, assistant professor, Penza State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Koroleva O.V., candidate of technical sciences, senior lecturer, Penza State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Grachova Yu.V., candidate of technical sciences, senior lecturer, Penza State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

THE CHOICE OF TECHNOLOGY FOR GETTING NANO-SIZE MODIFIERS FOR STRUCTURAL COMPOSITES

The choice of methods for getting nano-size powders depends on compound chemical nature, designed sizes of its particles and the experimental basis. Calculation of generalized criteria for modification trend choice allowed to elect the most rational technology of getting nano-size modifications for structure modification and structural composites features management.

Key words: building composites, nanomodifiers, generalized criterion.

REFERENCES

1. Rusanov, A.I. Thermodynamic bases of mechanochemistry [Text] / A.I. Rusanov. — SPb. : Science, 2006. — 221 p.
2. Sergeys, G.B. Nanochemistry [Text] / G.B. Sergeys. — M. : Publ. House of MGU, 2003. — 288 p.
3. Gusev, A.I. Are nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies [Text] / A.I. Gusev. — M. : Fizmatlit, 2005. — 416 p.
4. Andrievsky, R.A. Nanostructural materials [Text] / R.A. Andrievsky, A.V. Ragulya. — M. : Publ. center «Academy», 2005. — 192 p.

УДК 691.542:551.571

Г.И. БЕРДОВ, Л.В. ИЛЬИНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ
СТРУКТУРЫ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА И КЛИНКЕРА
ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ
ВО ВЛАЖНЫХ УСЛОВИЯХ МЕТОДОМ
КОМПЛЕКСНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

Установлено, что при длительном хранении портландцемента в условиях повышенной влажности происходит значительно большая его гидратация и карбонизация, чем при хранении клинкера, что приводит к значительному снижению гидратационной активности цемента.

После хранения клинкера в случае его измельчения без гипса наблюдается его незначительная гидратация и карбонизация. Существенно большие изменения структуры проявляются при измельчении хранившегося клинкера с добавлением при помоле 5 % гипса. При этом не фиксируется наличие $\text{Ca}(\text{OH})_2$, значительно возрастают общие потери массы. В поверхностном слое длительно хранившегося клинкера отмечена гидратация с образованием $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Ключевые слова: портландцемент, клинкер, длительное хранение, дифференциальный-термический анализ, термогравиметрический анализ, эндоэффект, экзоэффект, потеря массы.

Распределение производства цемента по территории России неравномерно. Основные объемы цемента изготавливаются в Центральном федеральном округе (около 30 %). За пределами единой железнодорожной сети РФ находятся: большая часть территории Республики Саха (Якутия), Камчатской и Магаданской областей, Корякского, Чукотского, Ненецкого автономных округов, значительная часть территории Красноярского края. Поэтому в ряде случаев цемент транспортируется водным транспортом в период краткосрочной летней навигации и вынужденно подвергается длительному хранению. Воздействие окружающей среды приводит к частичной гидратации и карбонизации цемента [1]. Это обусловливает снижение его активности при гидратационном твердении, уменьшение прочности образцов при сжатии и изгибе. Это так называемый «лежалый» цемент.

В данной работе исследован портландцемент производства ООО «Искитимцемент» (Новосибирская область) марки ПЦ400 Д-20. Минеральный состав, мас. %: C_3S — 50...55, C_2S — 18...22, C_3A — 7...11, C_4AF — 12...15. Удельная поверхность 320 $\text{m}^2/\text{кг}$. 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. Исследован портландцемент заводского изготовления, а также клинкер этого цемента. Клинкер хранился в виде гранул диаметром 10...20 мм. Перед приготовлением образцов для определения механической прочности клинкер измельчали до удельной поверхности 320 $\text{m}^2/\text{кг}$.

Температура эндоэффектов и изменение массы образцов цемента и клинкера* по результатам термического анализа

Вид вяжущего	Продолжительность и условия хранения	Номер эндоэффекта						Потеря массы в интервале 120...464 °C, %	Общая потеря массы, %		
		1		2		3					
		T, °C	Δm, %	T, °C	Δm, %	T, °C	Δm, %				
Портландцемент ПЦ400 Д-20	7 сут, нормальные условия	—	—	105,6	0,46	457,6	0,36	726	1,38		
	4 мес, влажные условия	96,0	0,88	121,8	0,68	466,6	0,39	726	2,44		
Клинкер, последующий помол без гипса	4 мес, влажные условия	95,8	0,82	—	—	462	0,73	737	2,14		
	4 мес, влажные условия с гипсом	95,8	0,81	128,1	0,59	—	—	743	2,79		
Клинкер, последующий помол без гипса	4 мес, влажные условия и дополнительное «состаривание»	78,2	0,79	—	—	460,7	0,50	737	2,08		
	4 мес, влажные условия с гипсом	99,3	0,60	124,6	0,26	—	—	752	3,54		
Клинкер, последующий помол с гипсом	4 мес, влажные условия	83,6	1,43	—	—	464	0,78	741,2	2,77		
	4 мес, влажные условия и дополнительное «состаривание»	—	—	—	—	—	—	762	3,45		
Поверхностный слой клинкера		—	—	—	—	—	—	—	6,14		

* В работе исследован клинкер портландцемента ПЦ400 Д-20.

Исследованы образцы цемента и клинкера после хранения в течение 7 сут при нормальных условиях (температура 20 ± 2 °C, влажность — не более 60 %), после хранения в течение 4 и 12 мес в среде с влажностью около 80 % при температуре 20 ± 2 °C и после 4 мес хранения в такой же среде и дополнительного искусственного «состаривания» (влажность — более 90 %, температура 70...80 °C) в течение 48 ч.

Механическая прочность при сжатии и изгибе определена на образцах размерами 40×40×160 мм, приготовленных из портландцемента или измельченного клинкера и песка при соотношении вяжущее : песок, равном 1 : 3. Определена прочность образцов после тепловлажностной обработки (ТВО), а также после 3, 7, 14 и 28 сут твердения при нормальных условиях.

При определении механической прочности образцов, хранившихся в указанных выше условиях, установлено, что уже после хранения в течение 4 мес во влажной среде портландцемент значительно утрачивает активность. Снижение прочности при сжатии и изгибе составляет: после тепловлажностной обработки — соответственно 30 и 27 %, после 28 сут твердения при нормальных условиях — 41 и 51 %. Дополнительное искусственное «состаривание» цемента приводит к дальнейшему уменьшению прочности образцов при сжатии и изгибе.

Хранение портландцемента в течение 12 мес в среде с повышенной влажностью приводит к снижению прочности при сжатии и изгибе образцов после тепловлажностной обработки соответственно на 55 и

33 %, после твердения в течение 28 сут при нормальных условиях — на 68 и 52 %.

Значительно меньшее снижение активности при гидратационном твердении наблюдается при хранении клинкера того же состава, что и портландцемент. После 4 мес хранения клинкера во влажной среде снижение прочности при сжатии и изгибе образцов после ТВО составило соответственно 8 и 6 %, после 28 сут твердения при нормальных условиях — 5 и 7 %. После 12 мес хранения клинкера во влажных условиях снижение прочности при сжатии и изгибе составило 28 % как в случае ТВО, так и при твердении в течение 28 сут при нормальных условиях.

Для установления особенностей изменения структуры портландцемента и клинкера при длительном хранении (4 мес) во влажных условиях проведен комплексный термический анализ.

Дифференциальные и термогравиметрические исследования [2, 3] выполнялись на дериватографе DTG60H фирмы Shimadzu (Япония) при скорости нагрева образцов 10 °C/мин.

Анализ полученных результатов позволяет установить следующее (таблица). У цемента, хранившегося в течение 4 мес во влажных условиях, довольно велико количество адсорбированной воды, удаляемой при 95 °C (рис. 1). Потери массы при термической деструкции гипса и Ca(OH)₂ близки к величинам, наблюдаемым у свежеприготовленного цемента (рис. 2). Однако существенно больше потери массы при температуре 726 °C, они составляют 2,44 % по сравнению с 1,38 % для свежеприготовленного цемента. Наиболее существенные различия наблюдаются при сравнении общих потерь массы в интервале от 120 до 470 °C. Они составляют для свежеприготовленного цемента 0,83 %, для «состаренного» — 3,37 %. По-видимому, эти потери массы обусловлены разложением продуктов гидратации клинкерных минералов. При этом, кроме температуры 458...464 °C, других эндоэффектов и экстремумов на кривой DTG в этом температурном интервале не обнаружено. То есть разложение продуктов гидратации (гидросиликатов, гидроалюминатов) происходит без явно выраженных экстремумов на кривых DTA и TGA. После достижения температуры 740...760 °C изменения массы образцов во всех рассмотренных случаях не происходит. Увеличение об-

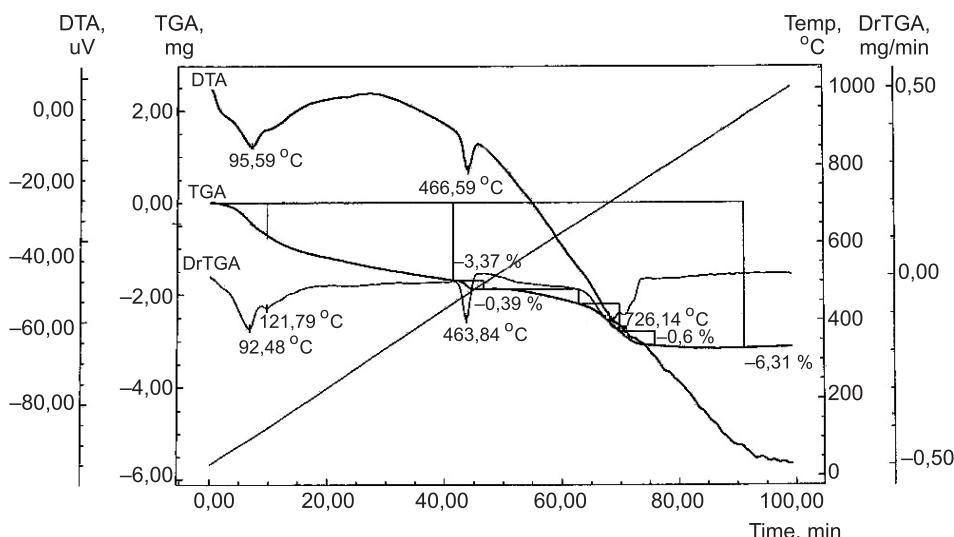


Рис. 1. Результаты термического анализа портландцемента, хранившегося в течение 4 мес во влажных условиях

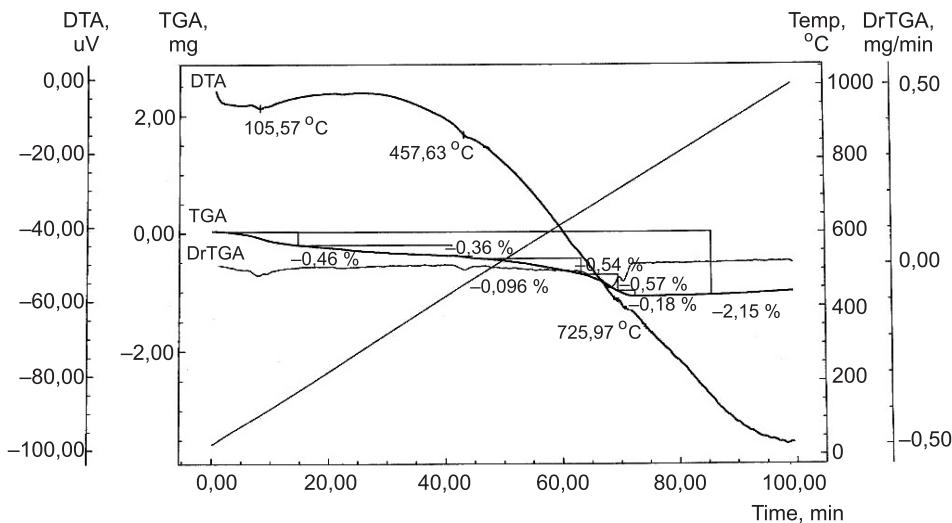


Рис. 2. Результаты термического анализа свежеприготовленного портландцемента

щей потери массы в случае «состаренного» цемента почти в 3 раза по сравнению со свежеприготовленным свидетельствует о значительной гидратации и карбонизации портландцемента при длительном хранении во влажных условиях.

В случае длительного хранения клинкера (4 мес) в среде с влажностью около 80 % (рис. 3), а также после его дополнительного «состаривания» и последующего помола клинкера без гипса регистрируются потери массы в обоих случаях при температуре 78...86 °C, составляющие 0,8 %. Они обусловлены удалением адсорбированной воды. Регистрируются потери массы при 460 и 737 °C, соответствующие разложению $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и CaCO_3 . Общее изменение массы в интервале температур 120...460 °C составляет соответственно 1,65 и 1,26 %. Общие потери массы образцов в исследованном температурном интервале 20...1000 °C составляют соответственно 3,79 и 3,49 %. При этом они несколько больше у клинкера без дополнительного состаривания, т. е. такое состаривание не приводит к существенной дополнительной гидратации клинкера. Этот факт опреде-

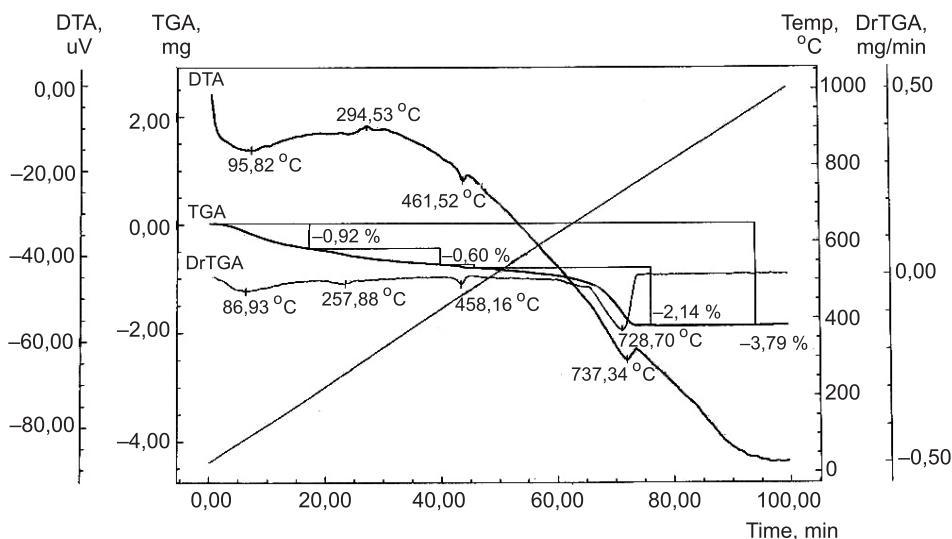


Рис. 3. Результаты термического анализа клинкера, хранившегося в течение 4 мес во влажных условиях и измельченного без гипса

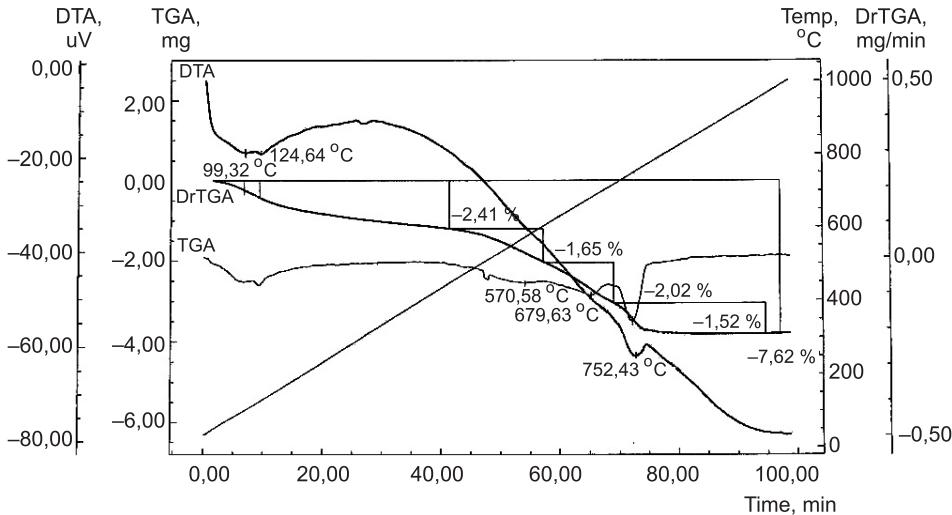


Рис. 4. Результаты термического анализа клинкера, хранившегося в течение 4 мес во влажных условиях и дополнительно «состаренного», измельченного с гипсом

ляется тем, что как длительное хранение, так и искусственное состаривание клинкера проводились, когда он находился в виде достаточно крупных гранул (диаметром 10...20 мм). Более значительные изменения должны наблюдаться на поверхности, а не в объеме гранулы.

Весьма интересный результат получен в случае измельчения клинкера после хранения, когда при помоле добавляли 5 % гипса. При этом, естественно, как в случае длительно хранившегося клинкера, так и после дополнительного «состаривания» (рис. 4) при температуре 125...128 °C фиксируется изменение массы, соответствующее разложению гипса. Регистрируется также изменение массы при температуре 748...752 °C, соответствующее разложению карбонатов кальция и магния. Причем эти значения существенно выше, чем в случае измельчения клинкера без гипса. Соответствующие значения составляют 2,79 и 3,54 % против 2,14 и 2,08 % при отсутствии гипса. Следует отметить также значительное увеличение потери массы в интервале температур 120...460 °C. Ее значения составляют 4,06 и 4,21 % против 1,65 и 1,26 % без гипса. Возрастают и общие потери массы. Они составляют соответственно 7,10 и 7,62 % против 3,79 и 3,49 %. Характерно, что при помоле с гипсом и температуре 460 °C исчезает эндоэффект, соответствующий разложению $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Эти изменения свидетельствуют о более глубокой гидратации клинкера, хранившегося в указанных условиях, при помоле его совместно с гипсом. Изменяется и механизм гидратации, так как отсутствует в заметном количестве $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Как показывают результаты рентгенофазового анализа, это может быть обусловлено тем, что при длительном хранении клинкера в гранулах во влажных условиях регистрируется наличие в нем кремнезема, очевидно, вследствие выделения его из стекла. Клинкер резко охлаждают на выходе из печи. Это фиксирует неравновесное состояние стеклофазы, которая со временем, при длительном хранении во влажных условиях, по-видимому, выделяет кристаллический SiO_2 . Он связывает выделяющийся $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Вместе с тем совокупность всех этих процессов приводит к незначительному снижению активности клинкера после длительного хранения во влажных условиях.

Рассмотрим изменение свойств поверхностного слоя клинкера. В поверхностном слое клинкера достижение равновесного состояния облегчается. Процессы выделения свободного кремнезема, как показывает рент-

генофазовый анализ, не развиваются. В поверхностном слое клинкера, хранившегося в течение 4 мес во влажных условиях, отмечаются значительные потери массы при температуре 84 °C, связанные с удалением адсорбированной воды. Отмечен эндоэффект при температуре 464 °C, сопровождаемый потерей массы 0,78 %, а также при температуре 741 °C. Общая потеря массы составляет 5,06 %, что значительно больше, чем в случае измельчения клинкера без гипса, но меньше, чем у состаренного цемента.

Дополнительное состаривание цемента приводит к тому, что в поверхностном слое исчезает эндоэффект, соответствующий $\text{Ca}(\text{OH})_2$, возрастают потери массы при температуре 762 °C и общие потери массы, т.е. происходит более полная гидратация минералов клинкера.

После хранения клинкера в течение 4 мес, а также после дополнительного состаривания в случае измельчения клинкера без гипса наблюдается его незначительная гидратация и карбонизация. Существенно большие изменения структуры проявляются при измельчении хранившегося клинкера в случае добавления при помоле 5 % гипса. При этом не фиксируется наличие $\text{Ca}(\text{OH})_2$, значительно возрастают общие потери массы. В поверхностном слое длительно хранившегося клинкера отмечена гидратация с образованием $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Однако после дополнительного состаривания клинкера эндоэффект, соответствующий $\text{Ca}(\text{OH})_2$, не наблюдается.

Таким образом в результате комплексного термического анализа установлено, что при длительном хранении портландцемента в условиях повышенной влажности происходит значительно большая его гидратация и карбонизация, чем при хранении клинкера, что приводит к существенному снижению гидратационной активности цемента.

Указанные особенности изменения структуры цемента и клинкера при длительном хранении в условиях повышенной влажности целесообразно учитывать при выборе способа длительного хранения клинкерных материалов и определении способов повышения стойкости цемента к длительному хранению, а также методов восстановления активности длительно хранившегося цемента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горчаков, Г.И. Строительные материалы [Текст] / Г.И. Горчаков, Ю.М. Баженов. — М. : Стройиздат, 1986. — 688 с.
2. Пиккеринг, У.Ф. Современная аналитическая химия [Текст] / У.Ф. Пиккеринг. — М. : Химия, 1977. — 560 с.
3. Зубехин, А.П. Физико-химические методы определения тугоплавких неметаллических и силикатных материалов [Текст] / А.П. Зубехин, В.И. Страхов, В.Г. Чеховский. — СПб. : Синтез, 1995. — 190 с.

БЕРДОВ Г.И., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

ИЛЬИНА Л.В., канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

Получено после доработки 23.06.10

Berdov G.I., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Iliyna L.V., candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

STUDY OF CHANGES IN THE STRUCTURE OF PORTLAND CEMENT AND CLINKER AFTER PROLONGED STORAGE IN HUMID CONDITIONS METHOD COMPLEX THERMAL ANALYSIS

Established that during prolonged storage of Portland cement in terms with higher humidity is much greater its hydration and carbonation than storing clinker, which leads to a significant reduction in the activity of hydration of cement.

After storage of clinker in the event of his grinding without gypsum observed its small hydration and carbonation. Much larger structural changes occur during grinding of clinker stored with the addition of grinding 5 % gypsum. It is not recorded the presence of $\text{Ca}(\text{OH})_2$, significantly increasing overall weight loss. In the surface layer of the long storage of clinker hydration is awarded to the formation of $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Key words: portland cement, clinker, long-term storage, differential thermal analysis, thermogravimetric analysis, endoeffect, exothermic effect, loss of mass.

REFERENCES

1. Gorchakov, G.I. Building materials [Text] / G.I. Gorchakov, Yu.M. Bazhenov. — M. : Stroyizdat, 1986. — 688 p.
 2. Pikkerig, U.F. Modern analytical chemistry [Text] / U.F. Pikkerig. — M. : Chemistry, 1977. — 560 p.
 3. Zubehin, A.P. Physical chemical methods for the determining melting non-metallic and silicate materials [Text] / A.P. Zubehin, V.I. Strakhov, V.G. Chekhovsky. — SPb. : Synthesis, 1995. — 190 p.
-

УДК 666.972

А.И. КУДЯКОВ, С.А. БЕЛЫХ, А.М. ДАМИНОВА

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ И МОРОЗОСТОЙКОСТЬЮ РАСТВОРОВ ИЗ СУХИХ МОНТАЖНЫХ СМЕСЕЙ С ГРАНУЛИРОВАННОЙ ВОЗДУХОВОВЛЕКАЮЩЕЙ ДОБАВКОЙ

Разработаны и исследованы сухие монтажные смеси с гранулированной органоминеральной добавкой на основе микрокремнезема, сырого сульфатного мыла и суперпластификатора С-3. Получены монтажные смеси с прочностью на сжатие M200 и морозостойкостью F200.

Ключевые слова: смеси сухие строительные монтажные, гранулированная органоминеральная добавка, продукты сульфатной переработки древесины, сульфатное мыло, микрокремнезем, суперпластификатор, состав, свойства раствора, подвижность, воздухововление, прочность при сжатии, параметры условно-замкнутой пористости, морозостойкость.

В настоящее время выпускаются различные виды сухих смесей для строительных работ. Особое место в номенклатуре изготавляемых строительных смесей занимают смеси для монтажных работ, объем использования которых относительно небольшой. Монтажные смеси должны обладать свойствами, аналогичными свойствам основных элементов монтируемой конструкции, быть достаточно подвижными при обеспечении высоких показателей по прочности, морозостойкости и непроницаемости.

По данным натурных наблюдений, экспертной оценки специалистов и анализа проектных решений установлено, что агрессивному воздействию в различных отраслях промышленности подвергаются от 15 до 75 % строительных конструкций зданий и сооружений [1]. Ущерб от этих действий в мировой практике составляет более 5 % от национального дохода. Для бетонов и растворов, эксплуатируемых в суровых климатических условиях Сибири, основные повреждения бетона вызваны морозной деструкцией.

Среди известных приемов управления морозостойкостью затвердевших смесей эффективными и технологичными являются: создание условно-замкнутой и снижение капиллярной пористости материала путем введения воздухововлекающих и пластифицирующих добавок и уплотнение структуры тонкодисперсными активными минеральными компонентами.

Авторами разработаны гранулированные воздухововлекающие добавки (C_{MK}) из микрокремнезема (МК) и продуктов сульфатной варки целлюлозы (например, сырого сульфатного мыла — ССМ) для изготовления сухих растворных смесей. Установлено, что компоненты добавки после грануляции сохраняют природу модифицирующего воздействия [2]. Воздухововлекающий компонент добавки C_{MK} обеспечивает необходимый объем вовлеченного воздуха (для монтажных растворов 7–9 %), а микрокремнезем в количестве до 10 % от массы цемента повышает прочностные характеристики раствора на 35–40 %.

В качестве монтажных смесей в строительной практике используют составы с высоким расходом цемента (450...500 кг на 1 м³) для обеспече-

ния заданной подвижности растворной смеси и прочности раствора. Производители часто называют эти смеси пескобетоном или мелкозернистым бетоном. Большой расход цемента на 1 м³ и объемное содержание цементного теста в таких смесях объясняют значительную капиллярную пористость и усадку.

Исследовано три состава сухой строительной смеси при соотношении Ц : П, равном 1 : 3, 1 : 4 и 1 : 5. При введении в такие составы гранулированной добавки С_{МК} в оптимальном количестве (9–10 % от массы цемента при соотношении компонентов ССМ^{сух} : МК = 1 : 200) получены затвердевшие строительные растворы марок М200, М100 и М75 соответственно.

Основной целью настоящих исследований являлось получение монтажных смесей с повышенной прочностью и морозостойкостью.

Для снижения капиллярной пористости и фактического содержания цементного камня в растворе в состав гранулированной добавки С_{МК} вводили суперпластификатор С-3. Добавка С-3 обладает значительным водоредуцирующим эффектом и при уменьшении расхода воды на 10 л / м³ капиллярная пористость цементного материала уменьшается в среднем на 1 %. Соотношение компонентов комплексной гранулированной добавки устанавливали таким образом, чтобы дозировка С-3 в смеси была в количестве 0,5 % от массы цемента.

Было изучено влияние способа введения суперпластификатора С-3 в гранулированную воздухововлекающую добавку при ее изготовлении на совокупную эффективность действия. Было опробовано три способа введения суперпластификатора С-3:

- 1) в сухом виде совместно с тонкодисперсным минеральным компонентом при минерализации пены;
- 2) путем дозированной подачи раствора С-3 в минерализованную пену в капельно-воздушном состоянии;
- 3) вспениванием водного раствора, содержащего С-3 и воздухововлекающую добавку.

Наибольший эффект по воздухововлечению и пластификации достигнут при введении С-3 в гранулированную добавку вторым способом. При ее введении в цементно-песчаный раствор, вероятно, вначале происходит растворение С-3 и его адсорбция на границе раздела фаз вода — твердое тело, далее растворившийся воздухововлекающий компонент добавки адсорбируется на границе раздела фаз вода — воздух. Благодаря очередности выхода в раствор компоненты добавки адсорбируются на границах раздела разных фаз, что позволяет синхронизировать их основные эффекты действия с процессом перемешивания. Благодаря освобождению пластификатором иммобилизованной воды процесс воздухововлечения происходит более полно. Гранулы добавки, полученные первым и третьим способами, обладают меньшим эффектом пластификации.

С целью определения эффективности полученной комплексной гранулированной добавки С_{МК+С-3} в монтажных растворах методом математического моделирования была проведена серия экспериментов с использованием двух способов корректировки исходных составов:

- 1) при постоянном водоцементном отношении (В/Ц) для составов без добавок с подвижностью П_{к2};
- 2) при постоянной подвижности П_{к2} для всех составов.

В качестве варьируемых факторов были выбраны цементно-песчаное отношение (Ц/П) X₁ (1:3, 1:4, 1:5) и количество гранулированной добавки С_{МК+С-3} X₂ (0, 5, 10 %). При дозировке добавки С_{МК+С-3} 5 % от массы цемента содержание отдельных компонентов составляло: воздухововле-

Таблица 1

Уравнения регрессии

Отклик	Уравнения регрессии	
	при постоянном В/Ц	при постоянной подвижности смеси ($\Pi_k 2$)
Подвижность растворной смеси	$Y_1 = 106 - 0,545X_1 + 3,01X_2 - 1,36X_1^2 - 0,229X_2^2 - 0,945X_1X_2$	—
Водоцементное отношение	—	$Y_1 = 0,782 - 0,142X_1 - 0,0913X_2 - 0,0277X_1^2 + 0,00173X_2^2 + 0,0158X_1X_2$
Объем вовлеченного воздуха	$Y_2 = 6,9 - 1,21X_1 + 2,47X_2 - 1,04X_1^2 + 0,134X_2^2 - 0,331X_1X_2$	$Y_2 = 6,08 - 0,956X_1 + 2,14X_2 - 0,883X_1^2 + 0,533X_2^2 - 0,0166X_1X_2$
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут нормального твердения	$Y_3 = 12,4 + 8,14X_1 + 1,58X_2 + 4,06X_1^2 - 1,56X_2^2 + 1,67X_1X_2$	$Y_3 = 17,7 + 7,38X_1 + 5,04X_2 + 1,571X_1^2 - 1,64X_2^2 + 0,429X_1X_2$

кающего — 0,024 %, тонкодисперсного минерального — 4,8 %, пластифицирующего — 0,24 %.

Сухие растворные смеси, затворенные водой, испытывали в соответствии с ГОСТ 5802–86, а свойства затвердевшего раствора оценивали по ГОСТ 31357–2007 и ГОСТ 28013–98*.

Путем математической обработки экспериментальных данных с использованием программы STADIA составлены уравнения регрессии каждого отклика. Полученные регрессионные модели (табл. 1) адекватны экспериментальным данным по множественному коэффициенту корреляции, коэффициенту детерминации, показателю статистики Фишера и уровню значимости нулевой гипотезы.

Установлено, что при использовании гранулированной добавки с пластифицирующим компонентом не изменяется характер зависимости объема вовлеченного воздуха от дозировки добавки. При этом в высокоподвижных смесях объем вовлекаемого воздуха выше, чем в составах равной подвижности. Так, при изменении величины погружения стандартного конуса с 6,5...7,0 до 12,0...14,5 см увеличивается содержание воздуха в среднем на 1 % при равном количестве воздухововлекающей добавки. Это согласуется с данными В.Г. Батракова [3].

Известно, что эффективность пластифицирующих добавок с уменьшением расхода цемента снижается [3]. Однако при введении добавки C_{MK+C_3} пластифицирующий эффект в большей степени проявляется в толстых составах: с увеличением содержания гранулированной добавки от 0 до 10 % при одинаковом В/Ц в пределах каждого состава для смесей с Ц/П, равным 1 : 4 и 1 : 5, подвижность увеличивается с 6,5...6,6 ($\Pi_k 2$) до 13,0...14,3 см ($\Pi_k 4$); для смесей с Ц/П, равным 1 : 3, — с 6,9 ($\Pi_k 2$) до 12,0 см ($\Pi_k 3$).

Ранее установлено [4], что в составе 1 : 3 вовлеченный воздух играет структурирующую роль, уменьшая подвижность раствора, а в составах 1 : 4 и 1 : 5 проявляется пластифицирующая способность воздуха. Вероятно, в данном случае в составах 1 : 4 и 1 : 5 суммируется пластифицирующий эффект воздухововлекающей и пластифицирующей добавок, а

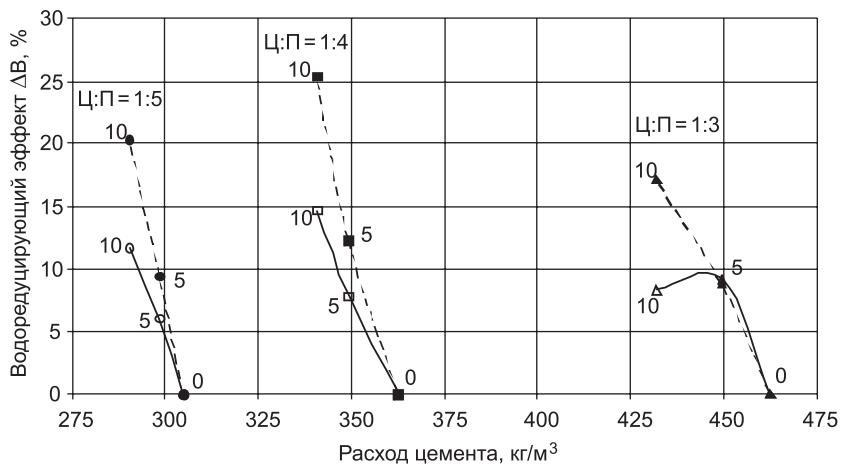


Рис. 1. Водоредуцирующий эффект добавок C_{Mk} и C_{Mk+C-3} при условии получения равноподвижных смесей марки Π_k2
0, 5, 10 — количество добавки, % от массы цемента; — C_{Mk} ; - - - C_{Mk+C-3}

при 1 : 3 увеличение подвижности смеси обеспечивается только за счет суперпластификатора С-3 в составе гранулированной добавки.

На рис. 1 показан водоредуцирующий эффект добавок C_{Mk} и C_{Mk+C-3} при получении равноподвижных смесей марки Π_k2 . В составах с Ц/П, равным 1 : 4 и 1 : 5, наблюдаем аддитивное увеличение водоредуцирующего эффекта двух компонентов добавки: пластифицирующего и воздухововлекающего. Максимальный водоредуцирующий эффект (25,4 %) достигается при введении добавки C_{Mk+C-3} в количестве 10 % в смесях с Ц/П, равным 1 : 4.

На рис. 2 видно, что в равноподвижных смесях при введении гранулированной добавки C_{Mk+C-3} в количестве 10 % за счет водоредуцирующего эффекта (ΔB , %) увеличивается прочность раствора без добавок с Ц/П = 1 : 3 с марки M200 до M250 ($\Delta B = 17,2$ %); раствора с Ц/П = 1 : 4 — с марки M75 до M200 ($\Delta B = 25,4$ %); раствора с Ц/П = 1 : 5 — с марки M50 до M100 ($\Delta B = 20,4$ %) при одновременном увеличении содержания вовлеченного воздуха на 7–9 %.

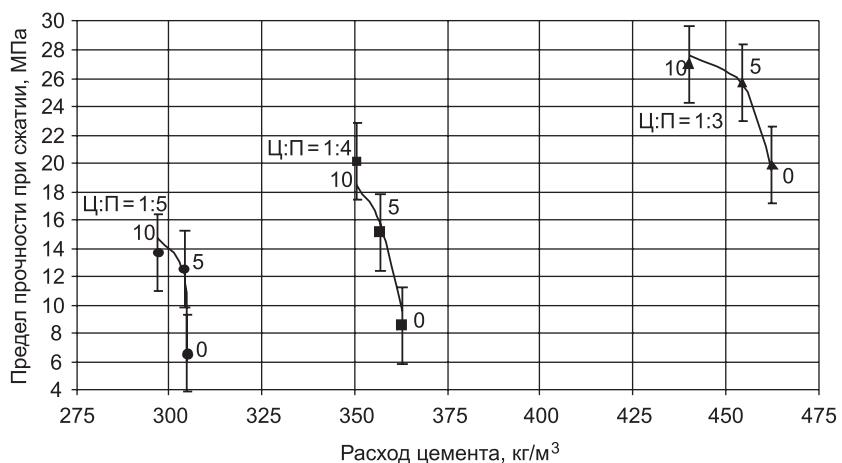


Рис. 2. Изменение предела прочности при сжатии затвердевших составов из смесей равной подвижности (28 сут нормального твердения) при различных Ц/П-отношениях и дозировках добавки C_{Mk+C-3}
0, 5, 10 — количество добавки C_{Mk+C-3} , % от массы цемента

Таким образом, при введении гранулированной добавки С_{МК+С-3} становится возможным получить из исходного состава 1 : 4 марки М75 без добавок монтажную сухую смесь марки М200. Если сравнивать с равнопрочными бездобавочными монтажными смесями М200, экономия цемента составляет 22–24 %. При этом объем цементного камня в таких смесях значительно меньше, что обеспечивает меньшую деформацию усадки, снижение капиллярной пористости затвердевших смесей.

Изменение прочности затвердевших растворов с исследованными гранулированными добавками подчиняется закону цементно-водного отношения, т.е. при сокращении количества воды повышается прочность. Это позволяет проектировать составы сухих монтажных смесей традиционными методами для обычных мелкозернистых бетонов, учитывая водоредуцирующий эффект добавки. Среднее уменьшение расхода воды в равноподвижных смесях при оптимальном введении гранулированной добавки С_{МК+С-3} при расходе цемента 425...475 кг/м³ составляет 15–17 %, при расходе цемента 350...400 кг/м³ — 22–25 %, при расходе цемента 300...350 кг/м² — 18–20 %.

Введение разработанных гранулированных добавок оказывает влияние на различные уровни структуры затвердевших смесей в связи с различным механизмом действия их компонентов. На микроуровне изменение структуры связано с участием микрокремнезема в процессах структурообразования цементного камня [2]. Кроме того, меняется объем капиллярных пор из-за значительного снижения расхода воды и уменьшения объема цементного камня. Воздухововлекающий компонент формирует условно-замкнутую пористость, результаты исследования которой представлены в табл. 2 и на рис. 3.

Установлено, что в сухих цементных смесях с гранулированными добавками формируются условно-замкнутые поры оптимальных размеров диаметром до 300 мкм (преимущественно от 14 до 140 мкм) при факторе расстояния L 0,216...0,233 мм, уменьшается показатель среднего размера открытых капиллярных пор λ (в 1,7–2,5 раза), что обеспечивает повышение морозостойкости затвердевших растворов (от 25–50 до 100–250 циклов).

По сравнению с исходной воздухововлекающей добавкой при введении гранулированных добавок повышается концентрация мелких пор

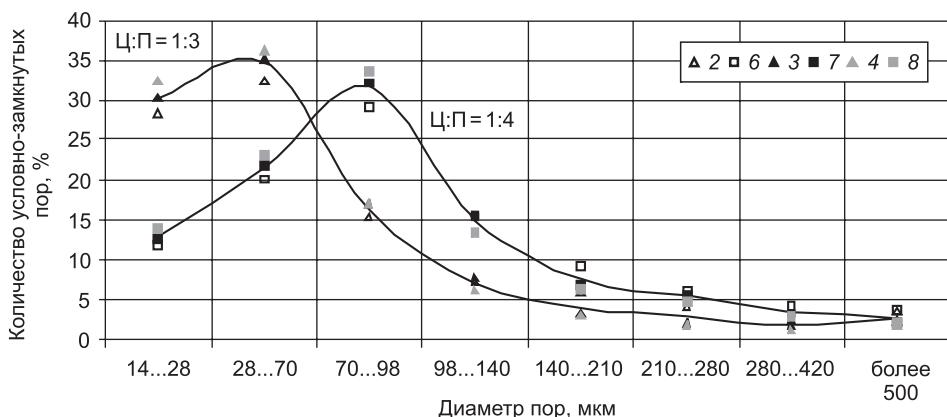


Рис. 3. Распределение условно-замкнутых пор по размерам в растворах из смесей равной подвижности (П_{к2}):

2, 3, 4 — Ц/П = 1:3; 6, 7, 8 — Ц/П = 1:4; 2, 6 — с добавкой ССМ 0,05 % от массы цемента; 3, 7 — с добавкой С_{МК} 10 % от массы цемента (ССМ 0,05 % и 10 % МК); 4, 8 — с добавкой С_{МК+С-3} 10 % от массы цемента (ССМ 0,05 %, 9,5 % МК и 0,5 % С-3)

(рис. 3), увеличивается их удельная поверхность (на 11,9–12,9 %) и уменьшается значение фактора расстояния между ними (на 9,7–13,4 %). Объем пор диаметром менее 200 мкм для составов с гранулированными добавками составляет 89–95 % от общего объема пор, тогда как для составов с исходными воздухововлекающими добавками это значение колеблется в пределах 86–89 %. Таким образом, вовлеченный воздух в порах более мелких размеров оказывает демпфирующее действие, в меньшей степени влияя на прочность.

Наибольшее отличие в относительном содержании пор одного и того же размера в двух аншлифах одного состава с гранулированными добавками не превышает 13 %, тогда как аналогичное значение для растворов с исходными воздухововлекающими добавками составляет 19 %. Это свидетельствует о большей однородности условно-замкнутых пор при использовании гранулированных добавок. Таким образом, грануляция продуктов сульфатно-целлюлозного производства микрокремнеземом стабилизирует эффект воздухововлечения и уменьшает средний диаметр пор вовлеченного воздуха.

У равноподвижных составов 1, 3 и 8 (табл. 2), имеющих близкие значения прочности на сжатие и различный объем цементного камня, роль В/Ц фактора на морозостойкость снижается, если в структуре создана система условно-замкнутых пор.

Проведенные исследования подтвердили, что растворы с оптимальной структурой условно-замкнутых пор имеют повышенную морозостойкость. Чем меньше фактор расстояния, тем выше морозостойкость у составов с сопоставимыми расходами цемента.

Выводы. При введении в цементно-песчаные смеси состава 1 : 4 гранулированной добавки комплексного действия C_{MK+C_3} получены сухие монтажные смеси с прочностью на сжатие М200 и морозостойкостью F200 при экономии цемента 22–24 %. Использование в гранулированной добавке суперпластификатора С-3 повышает водоредуцирующий эффект

Таблица 2
Свойства растворов из смесей равной подвижности ($\Pi_k 2$)

№ смеси	Вид и количество добавки ¹ , % от массы цемента	Ц/П	В/Ц	Объем вовлеченного воздуха в смесь, %	Предел прочности при сжатии образцов, МПа	Содержание условно-замкнутых пор в единице объема ² , А, %	Удельная поверхность условно-замкнутых пор a_0 , мм^{-1}	Фактор расстояния L , мм	Средний размер открытых капиллярных пор ³ , λ	Марка по морозостойкости ⁴
1	Без добавок	1:3	0,68	2,7	20,1	Не определяли			3,80	F50
2	CCM; 0,05		0,66	7,5	14,4	7,1	21,7	0,247	2,03	F150
3	C_{MK} ; 10		0,68	7,1	19,8	6,9	24,5	0,223	1,96	F150
4	C_{MK+C_3} ; 10		0,59	7,4	26,4	7,2	24,3	0,216	1,59	F250
5	Без добавок	1:4	0,92	4,3	8,1	Не определяли			4,62	F25
6	CCM; 0,05		0,83	9,6	6,9	9,0	18,2	0,261	2,72	F75
7	C_{MK} ; 10		0,86	9,4	10,5	9,1	20,4	0,233	2,43	F100
8	C_{MK+C_3} ; 10		0,71	9,3	20,4	9,0	20,5	0,226	1,84	F200

Примечание. ¹ — воздухововлекающие добавки содержатся в эквивалентном количестве; ² — параметры условно-замкнутой пористости исследовались линейным методом по аншлифам с помощью микроскопа в отраженном свете при увеличении в 57,5 раз, базовая длина измерения 2000 мм; ³ — оценивались по ГОСТ 12730.4–78 с использованием результатов кинетики водопоглощения; ⁴ — оценивались по ГОСТ 10060.1–95.

и в составах с малым содержанием цемента значительно снижает водопотребность растворной смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанова, В.Ф. Современные научные разработки проблемы долговечности зданий и сооружений [Текст] / В.Ф. Степанова // Технологии бетонов. — 2008. — № 2. — С. 64–65.
2. Кудяков, А.И. Сухие растворные смеси с гранулированными органоминеральными воздухововлекающими добавками [Текст] / А.И. Кудяков, С.А. Белых, А.М. Даминова // Вест. ТГАСУ. — 2009. — № 3. — С. 101–110.
3. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика [Текст] / 2-е изд., перераб. и доп. — М., 1998. — 768 с.
4. Кудяков, А.И. Смеси сухие растворные цементные с микрогранулированной воздухововлекающей добавкой [Текст] / А.И. Кудяков, С.А. Белых, А.М. Даминова // Строительные материалы. — 2009. — № 12. — С. 2–3.

КУДЯКОВ А.И., д-р техн. наук, проф.; E-mail: kudyakow@mail.tomsknet.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

БЕЛЫХ С.А., канд. техн. наук, доц.

Братский государственный университет

ДАМИНОВА А.М., аспн.; E-mail: nastyaf_m@mail.ru

Братский государственный университет

Получено 26.10.10

Kudjakow A.I., doctor of technical sciences, professor; E-mail: kudyakow@mail.tomsknet.ru, Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Belykh S.A., candidate of technical sciences, assistant professor, Bratsk State University, Russia

Daminova A.M., post-graduate student; E-mail: nastyaf_m@mail.ru, Bratsk State University, Russia

MANAGEMENT OF STRUCTURE AND FROST RESISTANCE OF MORTARS FROM DRY BUILDING MIXTURES FOR INSTALLATION WORKS WITH MICROGRANULATED AIR-ENTRAINING ADDITIVES

Dry building mixtures for installation works with granulated organomineral additive on the basis of micro-silica, crude sulphatic soap and superplasticizer C-3. Mixtures for installation works with durability on compression M200 and frost resistance F200 are received.

Key words: dry building mixtures for installation works, granulated organomineral additive, products of sulfatic processing of wood, sulphatic soap, micro-silica, superplasticizer, structure, properties of mortar, mobility, air-entrainment, durability at compression, parameters of conditional-closed porosity, frost resistance.

REFERENCES

1. Stepanova, V.F. Modern scientific developments problem of durability of buildings and constructions [Text] / V.F. Stepanova // Technologies of concrete. — 2008. — N 2. — P. 64–65.
2. Kudjakov, A.I. Dry mortar mixtures with granulated organomineral air-entraining additives [Text] / A.I. Kudjakov, S.A. Belykh, A.M. Daminova // J. TSUAB. — 2009. — N 3. — P. 101–110.
3. Batrakov, V.G. Modified concrete. Theory and practice [Text] / 2nd edition, processed and added — M., 1998. — 768 p.
4. Kudjakov, A.I. Dry mortar cement mixtures with microgranulated air-entraining additive [Text] / A.I. Kudjakov, S.A. Belykh, A.M. Daminova // Building materials. — 2009. — N 12. — P. 2–3.

УДК 691.327:666.973:666.64-492.3

В.А. КУЛИКОВ, И.В. КОВКОВ, В.З. АБДРАХИМОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА КЕРАМЗИТА
НА ОСНОВЕ МОНТМОРИЛЛОНИТОВОЙ ГЛИНЫ
И ОТХОДОВ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ
ПРИ ОБОГАЩЕНИИ УГЛЯ**

Введение в состав керамических масс отходов углеобогащения способствует при температуре обжига 1160 °С образованию муллита, который вызывает повышение физико-механических показателей керамзита.

Ключевые слова: анортит, гематит, гранулы, керамзит, муллит, нефелин, отходы углеобогащения, фазовый состав, химический состав.

В работах [1–2] показана принципиальная возможность использования отходов горно-обогатительной фабрики (ГОФ) при обогащении угля в производстве керамзита на основе монтмориллонитовой глины. Химический состав отходов ГОФ при обогащении угля (отходов флотации углеобогащения ГОФ «Томусинская») и монтмориллонитовой глины Смышляевского месторождения представлен в табл. 1, а ее технологические свойства и минералогический состав глинистого сырья приведены в табл. 2 и 3 [1, 3, 4].

Изготовление керамзита осуществлялось в лабораторных условиях по традиционной технологии из оптимального состава (с учетом экологических аспектов, т.е. при максимально возможном содержании в составе

Таблица 1
Химический состав отходов углеобогащения и монтмориллонитовой глины

Компоненты	Содержание оксидов, мас. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	SO ₃	П.п.п.
Отходы углеобогащения	50,40	18,56	6,4	1,51	0,50	4,78	0,90	16,5
Монтмориллонитовая глина	57,5	15,6	4,2	2,1	7,3	3,5	0,5	7,8

Таблица 2
Технологические свойства монтмориллонитовой глины

Число пластичности	Содержание глинистых частиц (размером менее 0,005 мм)	Огнеупорность, °C	По спекаемости	Оптимальная температура вслучивания, °C	Температурный интервал вслучивания, °C
25–45	55–65	1150–1200	Не спекается (вспучивается)	1160	200

Таблица 3
Минералогический состав глины Смышляевского месторождения

Содержание минералов, мас. %					
гидрослюдя	кварц	гипс	полевой шпат	монтмориллонит	оксиды железа
15–20	25–30	3–5	10–20	30–35	5–7

отходов углеобогащения), мас. %: отходы флотации углеобогащения 40, монтмориллонитовая глина Смышляевского месторождения 60. После подсушивания в естественных условиях компоненты измельчались на лабораторных «бегунах» до прохождения сквозь сито с отверстиями 1,2 мм, после чего тщательно перемешивались в соотношении 2 : 3 (отходы углеобогащения : глина). Полученная смесь затворялась водой до формовочной влажности. Подготовленная шихта с целью усреднения ее влажности помещалась на одни сутки в эксикатор, после чего из нее формовались сферические гранулы диаметром около 16 мм. Обжиг образцов проводился в лабораторной печи при температуре 1160 °С. Полученные гранулы имели плотную сплошную корочку и внутреннюю высокопористую структуру (рис. 1). Строение гранулы аналогично керамзитовой, но толщина корочки значительно меньше. Физико-механические показатели керамзита приведены в табл. 4.

Таблица 4
Физико-механические показатели керамзита

Диаметр гранул, мм	Прочность при сжатии, МПа	Средняя плотность в куске, г/см ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Температура обжига, °С
6–8	2,0–2,2	0,5–0,8	450–510	1160

Истинная пористость (общая) исследуемого керамзита находится в пределах 55–65 %, пористость кажущаяся (открытая) 35–55 %, пористость закрытая 12–15 %.

Рентгенофазовый анализ керамзита проводился на дифрактометре ДРОН-6 с использованием CoK_α -излучения при скорости вращения столика с образцом 1 град/мин. ИК-спектры поглощения образцов получены на спектрофотометре Spekord-75JR. Образцы были приготовлены в виде суспензии порошка с вазелиновым маслом. На рис. 2 представлена рент-

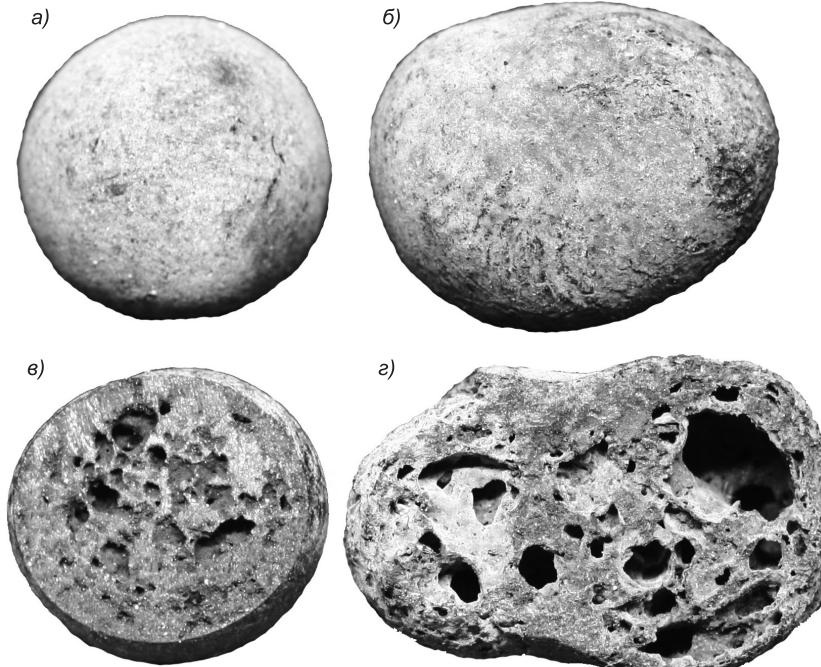


Рис. 1. Фотоснимки керамзита

а, б — внешняя часть; в, г — внутренняя часть керамзита. Температура обжига 1160 °С

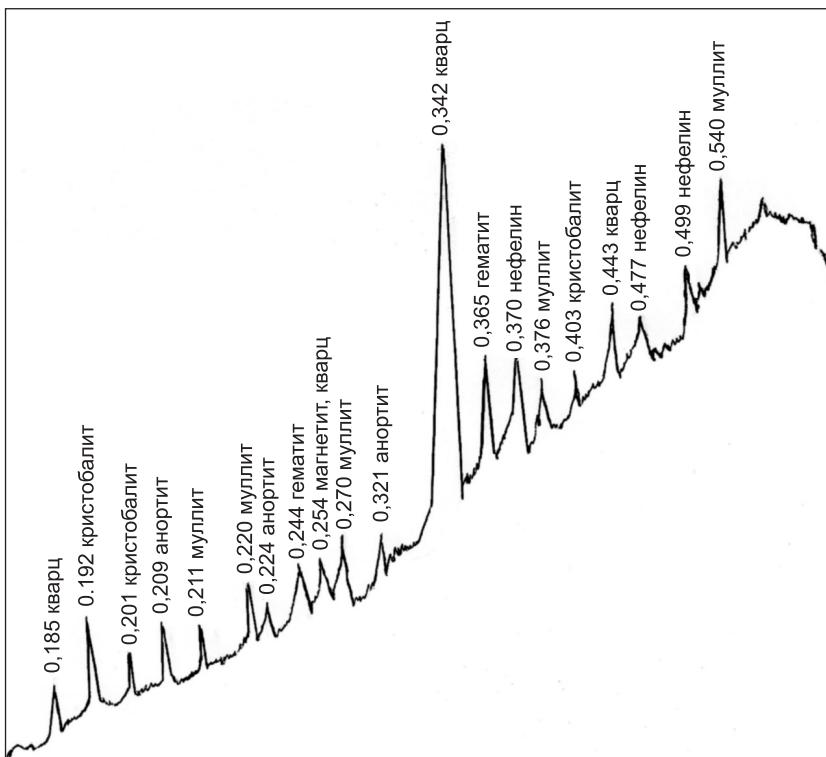


Рис. 2. Рентгенограмма керамзита

генограмма исследуемого керамзита, где отмечаются характерные интенсивные линии, присутствие которых обусловлено следующими химическими элементами:

- $d/n = 0,185; 0,254; 0,342$ и $0,443$ нм — кварцем,
- $d/n = 0,192; 0,201$ и $0,403$ нм — кристобалитом,
- $d/n = 0,211; 0,220; 0,270; 0,376$ и $0,540$ нм — муллитом,
- $d/n = 0,209; 0,224$ и $0,321$ нм — анортитом,
- $d/n = 0,244$ и $0,365$ нм — гематитом,
- $d/n = 0,370; 0,477$ и $0,499$ нм — нефелином,
- $d/n = 0,254$ нм — магнетитом.

О повышенном содержании стеклофазы в исследуемом керамзите свидетельствует соотношение интегральных площадей аморфного гало и дифракционных отражений на рентгенограммах.

Как видно из рентгенограммы, при обжиге керамзита образуются новые минералы: кристобалит, анортит, муллит, гематит, магнетит и нефелин.

Муллит — один из часто встречающихся минералов в обожженных керамических материалах. Высокие показатели по огнеупорности, плотности, химической стойкости и механической прочности привлекли внимание исследователей как к получению синтетического муллита, так и исследованию его структуры¹.

Решетка муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) весьма близка к решетке силлиманита и обладает дефектной структурой последнего. Она возникает путем заполнения мест в решетке силлиманита ионами O^{+2} и Al^{+3} . Поэтому

¹ Павлов В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики. М.: Стройиздат, 1977. 272 с.

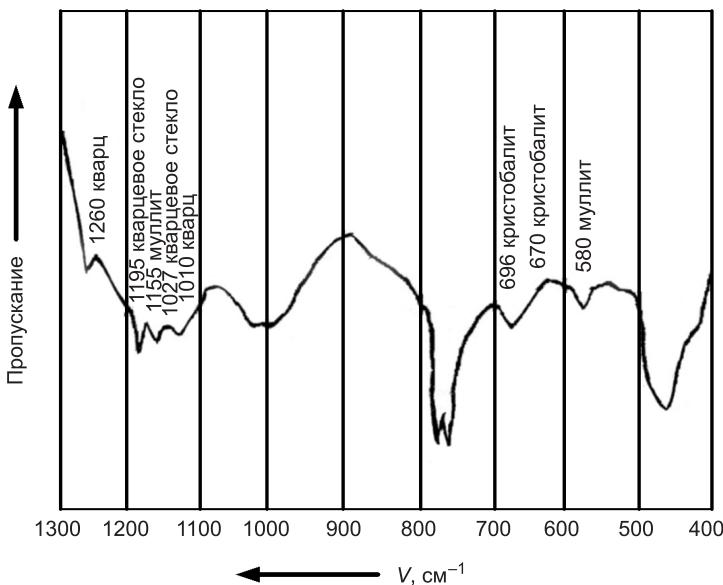


Рис. 3. ИК-спектры керамзита

рентгенограммы муллита и силлиманита весьма близки, тогда как их инфракрасные спектры поглощения, наоборот, весьма различны, что делает спектральный анализ удобным для определения этих минералов².

Характерно незначительное поглощение электромагнитных волн муллита при $\nu = 580 \text{ см}^{-1}$ и резком пике поглощения у силлиманита при $\nu = 691 \text{ см}^{-1}$ ². Начало кристаллизации муллита в исследуемом образце при температуре обжига $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ подтверждается увеличением полосы поглощения $\nu = 580 \text{ см}^{-1}$ на ИК-спектре (рис. 3).

Анортит — полевой шпат ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), является конечным членом плагиоклазов, обладает всеми свойствами, присущими полевошпатовым, и в составе неметаллических материалов встречается только в устойчивой модификации³.

Гематит в керамических материалах способствует образованию железистого стекла, которое инициирует образование муллита⁴.

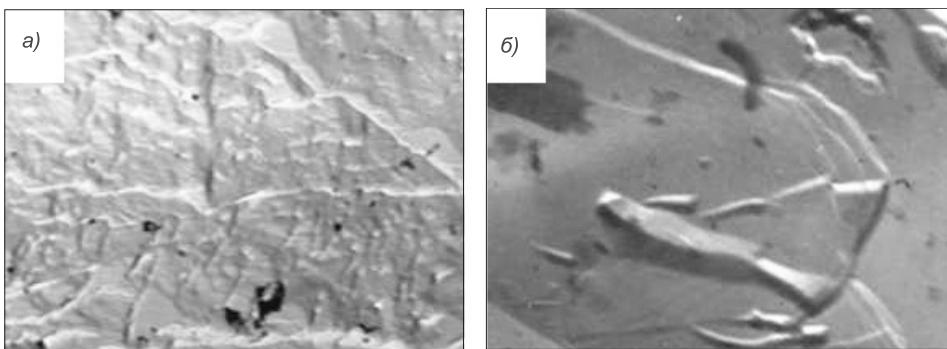


Рис. 4. Микроструктура керамзита

Увеличение: а $\times 5000$, б $\times 6000$

² Куколов Г.В. Химия кремния и физхимия силикатов. М.: Высш. шк., 1966. 250 с.

³ Литвинова Г.И., Пирожкова В.П. Петрография неметаллических включений. М.: Металлургия, 1972. 184 с.

⁴ Абдрахимов В.З. Роль оксида железа в формировании структуры керамических материалов // Изв. вузов. Строительство. 2009. № 2. С. 31–37.

Электронно-микроскопическое исследование керамзита сопряжено со значительными трудностями получения реплик от образцов, обожженных в области температуры ликвации, когда жидкую фазу содержит много не полностью растворенных глинистых частиц (рис. 4, а). Электронно-микроскопическое изучение таких образцов по методу реплик с предварительным протравливанием поверхности свежего скола 3 % HF показало, что стекло претерпело интенсивную ликвацию и разделилось на капельную фазу и матрицу (рис. 4, б). Капли имеют сложную и преимущественно некруглую форму, а размеры их колеблются от долей до 3 мкм.

Случаи, когда капли имеют форму шара и располагаются на значительных расстояниях друг от друга, сравнительно редки⁵. Чаще при электронно-микроскопическом изучении стеклофазы широкого «спектра» составов фиксировали ликвационную структуру с весьма малыми размерами капель (0,03...0,05 мкм) и их тесном расположением.

Таким образом, исследования показали, что введение в состав керамических масс отходов углеобогащения способствует при температуре обжига 1160 °С образованию муллита, который вызывает повышение физико-механических показателей керамзита.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2362749. Российская Федерация, МПК C04B 14 / 24. Композиция для производства пористого заполнителя [Текст] / Д.Ю. Денисов, И.В. Ковков, В.З. Абдрахимов, Л.В. Журавль; заявитель и патентообладатель Самар. гос. ун-т; заявл. 03.12.2007; опубл. 27.07.2009. Бюл. № 21.
2. Денисов, Д.Ю. Использование отходов флотации углеобогащения в производстве керамзита [Текст] / Д.Ю. Денисов, И.В. Ковков, В.З. Абдрахимов // Баш. хим. журн. — 2008. — Т. 15, № 2. — С. 107–109.
3. Абдрахимов, В.З. Изменение фазового состава керамзита из смышляевской глины Самарской области при различных скоростях охлаждения [Текст] / В.З. Абдрахимов // Стройт. вест. Рос. инж. академии. — 2009. — Вып. 10. — С. 18–22.
4. Абдрахимов, В.З. Теоретические и технологические аспекты использования техногенного сырья в производстве теплоизоляционных материалов [Текст] / В.З. Абдрахимов, Д.Ю. Денисов. — Самара, 2010. — 72 с.

КУЛИКОВ В.А., асп.; E-mail: samarastroy@list.ru

*Самарская академия государственного и муниципального управления
КОВКОВ И.В., канд. техн. наук; E-mail: kovkoviv@mail.ru*

ПК (производственный кооператив) «Наука», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

АБДРАХИМОВ В.З., д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru

Самарская академия государственного и муниципального управления

Получено после доработки 30.06.10

Kulikov V.A., post-graduate student; E-mail: samarastroy@list.ru, Samara Academy State and Municipal Management, Russia

Kovkov I.V., candidate of technical sciences; E-mail: kovkoviv@mail.ru, PC (Production cooperative) «Science», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Abdrahimov V.Z., doctor of technical sciences, professor; E-mail: 3375892@mail.ru, Samara Academy State and Municipal Management, Russia

⁵ Грум-Гржимайло О.С., Квятовская К.К. и др. Механизм формирования глушителя в легкоплавких борно-циркониевых глазурях // Тр. НИИстройкерамики. 1979. Вып. 42. С. 127–145.

**STUDY OF PHASE COMPOSITION
OF THE EXPANDED CLAY
ON THE BASIS OF MONTMORILLONITE CLAY
AND WASTE METAL
IS MOUNTAIN-ORE MILL AT THE COAL PREPARATION**

Injection in makeup of ceramic masses of waste metal of a coal washing promotes at temperature of furnacing of 1160 °C to formation of mullit which one promotes raise of physical-mechanical parametres of an expanded clay.

Key words: anorthite, haematite, granules, an expanded clay, mullit, nepheline, coal washing waste metal, phase makeup, an elemental composition.

REFERENCES

1. Patent 2362749. Russian Federation, МПК C04B 14/24. A composition for expanded aggregate production [Text] / D.Yu. Denisov, I.V. Kovkov, V.Z. Abdrahimov, L.V. Ghu-ravel; the applicant and patentee the Samara State University; declaration. 03.12.2007, published. 27.07.2009. Bulletin. — 2009. — N 21.
 2. Denisov, D.Yu. Reclamation of coal preparation floatation in expanded clay production [Text] / D.Yu. Denisov, I.V. Kovkov, V.Z. Abdrahimov // Bashkir Chemical Magazine. — 2008. — Vol. 15, N 2. — P. 107–109.
 3. Abdrahimov, V.Z. Alterations of a phase compound of an expanded clay from montmorillonite clay of the Smyshljaevsky field of the Samara region at various cooling rates [Text] / V.Z. Abdrahimov // Building Bulletin of the Russian Engineering Academy. — 2009. — Pt 10. — P. 18–22.
 4. Abdrahimov, V.Z. Theoretical and technological aspects of use of technogenic raw in production of heat insulating materials [Text] / V.Z. Abdrahimov, D.Yu. Denisov. — Samara, 2010. — 72 p.
-

УДК 691.57.002.3

Б.С. БАТАЛИН, Л.А. ЛЯДОВА, О.В. ЖМЫХОВА

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
КЕРАМИЧЕСКИХ И ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПИГМЕНТОВ
НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ НЕКОТОРЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ
ПРОИЗВОДСТВ**

Описаны эксперименты по синтезу керамических и малярных пигментов из отходов керамических производств. Показано, что отходы заводов, изготавливающих фарфорофаяновую продукцию (электроизоляторы, посуду или художественную керамику), содержащие монтмориллонит или муллит, могут служить носителями цвета. Применение меха-ноактивации сырьевой смеси, включающей эти отходы, позволяет повысить скорость диф-фузии красящих ионов в кристаллическую решетку минерала-носителя и сократить время обжига.

Ключевые слова: керамические пигменты, синтез, кристаллическая решетка, отходы, носитель, красящая способность, наноструктура, таблетка.

Керамические пигменты — жаростойкие окрашенные соединения, имеющие определенный тип кристаллической структуры (шпинели, граната, виллемита и т.д.), получают в результате высокотемпературного синтеза из химически чистых веществ. Такая технология делает керамические пигменты наиболее дорогостоящими материалами в производстве керамических изделий.

Производство керамических пигментов в России в настоящее время осуществляется лишь на двух предприятиях, в связи с чем керамическая промышленность в области как технической, так и художественной керамики в основном использует импортные пигменты. В то же время заводы, выпускающие техническую керамику (например, электроизоляторы), имея практически все оборудование для производства таких пигментов, а также отходы своей собственной технологии, могли бы производить керамические пигменты для собственных нужд и как товарную продукцию, пользующуюся большим спросом на рынке. Попутно из тех же отходов можно производить и малярные пигменты, дефицит которых очевиден. При этом решаются вопросы, связанные с созданием ресурсо- и энергосберегающей технологии, а также утилизации отходов производства. Заводы, изготавливающие бытовую фарфорофаяновую продукцию — посуду и художественную керамику, располагают аналогичным оборудованием и подобными отходами. Использование этих отходов для получения дорогостоящих керамических пигментов представляется экономически целесообразным.

Керамические пигменты являются кристаллическими веществами, и их свойства зависят от свойств кристаллических решеток [1–3]. Рациональным и перспективным для синтеза керамических пигментов считается принцип использования в качестве акцепторов веществ со стабильными кристаллическими решетками.

Синтез керамических пигментов осуществляется в результате твердофазовых реакций [2]. При вхождении в решетку основного кристалла посторонних атомов наблюдается отклонение от его идеальной формы. Это вхождение может осуществляться следующими способами [4]:

- с образованием твердых растворов внедрения;
- с образованием твердых растворов вычитания (вакантные узлы);
- с образованием твердых растворов замещения.

В настоящей статье приведены результаты исследований, выполненных на кафедре строительных материалов и специальных технологий ПГТУ. Целью исследований было определение возможности использования упомянутых выше отходов для синтеза керамических и малярных пигментов. В качестве исходных материалов для исследований были использованы отходы производства Пермского электроизоляторного завода (ЭЛИЗ).

ЭЛИЗ использует в качестве сырья для производства электроизоляторов бентонитовую глину Дружковского месторождения. Бентониты — это минеральные образования, которые относятся к классу алюмосиликатов, имеют высокую дисперсность, т.е. обладают размером кристаллов меньше 1 мкм и вследствие этого имеют большую удельную поверхность. Особенности кристаллохимического строения бентонитов обусловливают наличие на их поверхности ионообменных катионов, достаточно сильно влияющих на физико-химические свойства минералов. Дружковская бентонитовая глина, используемая на ЭЛИЗе, по данным заводской лаборатории, имеет состав, мас. %: SiO_2 — 56,54; Al_2O_3 — 37,06; Fe_2O_3 — 0,89; TiO_2 — 1,14; CaO — 0,81; MgO — 0,37; K_2O — 2,12; Na_2O — 0,51; П.п.п. — 8,60. От типового состава бентонита эта глина отличается высоким содержанием оксида алюминия.

По данным, полученным с помощью петрографического анализа методом осаждения тонкой пленки глины из разведенной суспензии на покровное стекло, глина состоит из монтмориллонита (90 %) и иллита (10 %). Эти минералы имеют стабильную кристаллическую решетку и потому могут оказаться пригодными для синтеза пигментов. Продукты их обжига — муллит и силлиманит — также имеют стабильные кристаллические решетки.

В качестве отходов ЭЛИЗ вывозит на свалки:

- бой глазурованных и неглазурованных фарфоровых изоляторов («череп»);
- бой высушенных необожженных изоляторов («сушё»);
- остатки сырьевой массы («шлам»).

Последний сильно засорен бытовыми отходами и мусором, поэтому для использования не пригоден.

Химический состав отходов приведен в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав отходов

Вид отхода	Содержание компонентов, мас. %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	П.п.п.
Глина	56,54	37,06	0,89	1,14	0,81	0,37	2,12	0,51	8,60
Сушняк	44,24	48,96	0,63	0,49	0,90	0,31	3,36	1,11	нет
Череп	44,30	48,00	0,61	0,51	0,89	0,37	3,31	0,99	нет
Шлам	47,11	41,93	0,56	0,45	0,66	0,51	2,52	1,10	5,16

Получение пигментов осуществляли следующим образом. В качестве источников красящих ионов использовали соединения квалификации х.ч. или технические (табл. 2). Эксперименты были проведены с применением механохимической активации исходных компонентов, осуществляющейся с помощью таблетирования шихты. При этом исходили из предположения, что с помощью механохимической активации можно добиться увеличения скорости диффузии красящих ионов в решетку носителя, а за счет этого — сокращения времени обжига.

Смесь носителя и красящих соединений подвергали сухому помолу в фарфоровой шаровой мельнице до полного прохождения через сито № 0053.

Смесь увлажняли водой (5 %) и подвергали таблетированию с помощью прессования в форме при давлении 50 МПа. Получали таблетки диаметром и высотой 20 мм. Таблетки подвергали обжигу в муфельной печи по режиму: подъем температуры до максимальной, изотермическая выдержка при этой температуре, охлаждение на воздухе. Температура и время обжига конкретных составов приведены в табл. 2. Общее время обжига составляло 6...8 ч. Обожженные спеченные смеси размалывали в фарфоровой шаровой мельнице мокрым способом до получения остатка на сите № 0040 не более 0,5 %. Продукт помола промывали горячей во-

Таблица 2
Результаты испытаний пигментов

Цвет пигмента	Состав смеси, мас. %	Температура, °C / время обжига, ч	Тонкость помола, мкм	Красящая способность, %	
				в керамической эмали	в эмали ПФ-115
Кирпично-красный	Череп — 44,44 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 44,44 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 11,12	1200/8	5,2	25	4
Оливковый	Сушняк — 44,44 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 44,44 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 11,12	800/6	5,3	12	10
Голубой	Череп — 76,53; кобальт — 23,47	1100/8	5,3	5	—
Синий	Сушняк — 76,53; кобальт — 23,47	1100/8	5,2	—	2
Зеленый	Череп — 71,94 CrO_3 — 21,58 Бура — 2,10	1100/8	5,2	5	—
Зеленый	Сушняк — 71,94; CrO_3 — 21,58 Бура — 2,10	1100/6	5,3	—	2
Желтый	Череп — 33,43 SbO_2 — 13,08 SnO_2 — 13,08 KNO_3 — 0,1 Pb_2O_3 — 39,57	1100/8	5,2	5	—
Желтый	Сушняк — 33,43 SbO_2 — 13,08 SnO_2 — 13,08 KNO_3 — 0,1 Pb_2O_3 — 39,57	1100/7	5,3	—	2

дой на фильтре до «чистой воды». Осадок на фильтре высушивали в сушильном шкафу при температуре 105...110 °С. Пригодность пигмента для керамических эмалей или малярных красочных составов, а также красящую способность его определяли, вводя пигмент в глущенную белую эмаль для глазурования изоляторов. Керамическую эмаль с пигментом наносили на фарфоровый бисквит и обжигали по режиму обжига этого изделия при температуре 1300 °С. Пригодным считали пигмент, если после полного обжига изделия цвет эмали сохранялся. При изменении цвета после обжига пигмент испытывали на пригодность для использования в малярных красках. Для этого пигмент добавляли в белую малярную эмаль (пентафталиевую ПФ-115) и производили выкраску до получения нужного оттенка. Результаты испытаний приведены в табл. 2. Как видно из табл. 2, получены пигменты, пригодные для использования как в керамической, так и малярной эмали.

Таким образом, было установлено следующее:

- отходы обожженного фарфора (череп) могут быть использованы в качестве носителя для получения керамических пигментов;
- отходы высушенной керамической массы (сушёй) пригодны для получения малярных пигментов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Седельникова, М.Б. Керамические пигменты на основе природных минералов [Текст] / М.Б. Седельникова, В.М. Погребенков // Стекло и керамика. — 2002. — № 12. — С. 10–13.
2. Третьяков, Ю.Д. Проблемы развития нанотехнологий в России и за рубежом [Текст] / Ю.Д. Третьяков // Вест. РАН. — 2007. — Т. 77, № 1. — С. 3–10.
3. Шевченко, В.Я. Исследования, разработки и инновации в области керамических и стекломатериалов [Текст] / В.Я. Шевченко, Г.Ф. Терещенко // Вест. РАН. — 2000. — Т. 70, № 1. — С. 50–56.
4. Масленникова, Г.Н. Современная классификация керамических силикатных пигментов [Текст] / Г.Н. Масленникова, И.В. Пиш, Е.В. Радион // Стекло и керамика. — 2006. — № 9. — С. 5–8.

БАТАЛИН Б.С., д-р техн. наук, проф.; E-mail: bobata@list.ru

Пермский государственный технический университет

ЛЯДОВА Л.А., инж.; E-mail: lyadova_lubov@km.ru

Пермский государственный технический университет

ЖМЫХОВА О.В., лаборант

Пермский государственный технический университет

Получено 26.04.10

Batalin B.S., doctor of technical sciences, professor; E-mail: bobata@list.ru, Perm State Technical University, Russia

Lyadova L.A., engineer; E-mail: lyadova_lubov@km.ru, Perm State Technical University, Russia

Jmykhova O.V., laboratory assistant, Perm State Technical University, Russia

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF CERAMIC MANUFACTURE AND PAINT AND VARNISH PIGMENTS ON THE BASIS OF A WASTE OF SOME CERAMIC MANUFACTURES

In article experiments on synthesis ceramic and painting pigments from waste products of some ceramic manufactures are described. It is shown, that waste products of the factories making porcelan or faience production (electroisolators, utensils or art ceramics), containing

montmorillonite or mullite can serve as carriers of color. Application mechanical activation the raw mix including, these waste products, and carried out with the help of mix granulation, allows to increase speed of diffusion of painting ions in a crystal lattice of the mineral-carrier and due to it is reduction of time of roasting.

Key words: ceramic pigments, synthesis, crystal lattice, waste products, the carrier, painting ability, nanostructure, tablet.

REFERENCES

1. Sedelnikova, M.B. Ceramic pigments on the basis of natural minerals [Text] / M.B. Sedelnikova, V.M. Pogrebenkov // Glass and ceramics. — 2002. — N 12. — P. 10–13.
 2. Tretyakov, Yu.D. Development problems of nanotechnologies in Russia and abroad [Text] / Yu.D. Tretyakov // Vestnik RAN. — 2007. — T. 77, N 1. — P. 3–10.
 3. Shevchenko, V.Ya. Researches, workings out and innovations in the field of ceramic and glass materials [Text] / V.Ya. Shevchenko, G.F. Tereshenko. — 2000. — T. 70, N 1. — P. 50–56.
 4. Maslennikova, G.N. Modern classification of ceramic silicate pigments [Text] / G.N. Maslennikova, I.V. Pish, E.V. Radion // Glass and ceramics. — 2006. — N 9. — P. 5–8.
-

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.1:725.314

И.В. ЛУГИН, А.Ю. ПЬЯНКОВА

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ГРУНТА ВОКРУГ ПОДЗЕМНОЙ СТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА С НАЧАЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассмотрен процесс изменения температуры грунта вокруг станции метрополитена мелкого заложения за время эксплуатации. Определены времена достижения стационарности теплового процесса годовых колебаний температур грунта, температура в некоторых точках прогретой зоны грунта вокруг станции.

Ключевые слова: подземная станция метрополитена, мелкое заложение, температура грунта.

Формирование микроклимата в подземных служебных помещениях метрополитена имеет отличия по сравнению с подобными наземными помещениями зданий. Следует учитывать, что теплообмен с атмосферным воздухом в них происходит через массив грунта, температурное поле которого меняется за время эксплуатации в результате образования так называемой «тепловой подушки» (прогретой зоны) вокруг станции.

В данной работе проведено исследование процесса изменения температуры грунта вокруг станции метрополитена мелкого заложения (на примере станции «Октябрьская», г. Новосибирск) под влиянием двух основных меняющихся факторов: температуры наружного воздуха (атмосферного) и теплового потока из внутренних помещений станции метрополитена. В результате исследования определены:

— значения температуры в «тепловой подушке» в массиве грунта вокруг станции метрополитена в зависимости от годового цикла колебаний температуры наружного воздуха и воздуха помещений;

— время достижения устойчивого циклического характера колебаний температуры грунта;

— время запаздывания при достижении максимальных и минимальных температур грунта по отношению к температуре атмосферного воздуха.

Для исследования естественного поля температур в массиве окружающего станцию грунта (рис. 1) воспользуемся уравнением Пуассона (процесс нестационарной теплопроводности):

$$\frac{\delta t_{\text{rp}}(x, z)}{\delta z} = \alpha \frac{\delta^2 t_{\text{rp}}(x, z)}{\delta x^2},$$

где t_{rp} — температура грунта, °C;

x — глубина (считаем, что температура меняется в одном направлении), м;

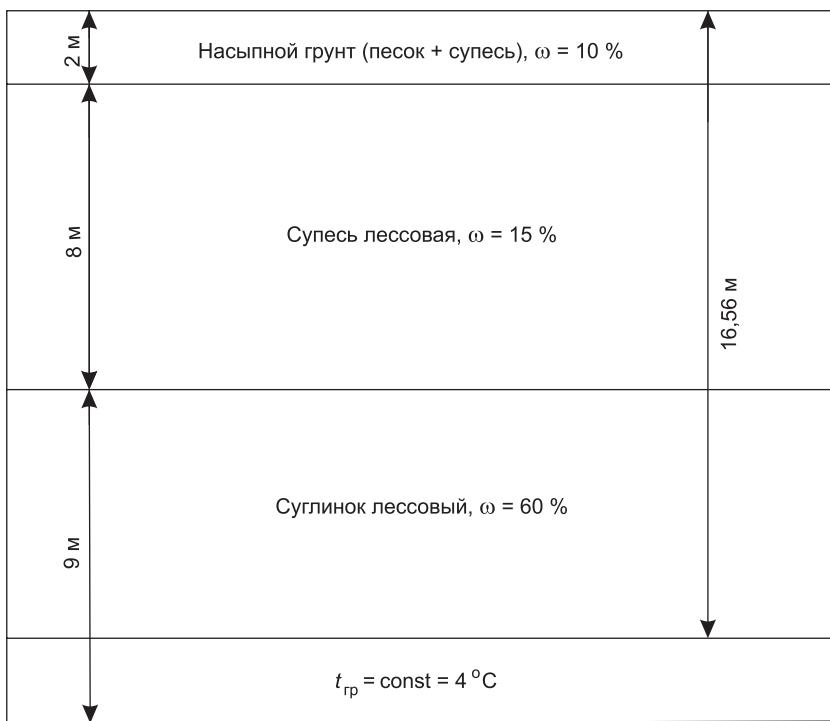


Рис. 1. Разрез ненарушенного массива грунта вокруг станции метрополитена «Октябрьская» (г. Новосибирск); ω — влажность

z — время, сут;

a — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^3/\text{сут}$.

Опишем принятые граничные условия.

По времени:

$z = 0$ сут — начало расчета (июль);

$z = 9131$ сут — конец расчета (25 лет эксплуатации).

По глубине заложения:

$x = 0$ м — поверхность грунта;

$x = 16,56$ м — глубина нейтральной зоны, на которой температура грунта имеет постоянное значение 4 $^{\circ}\text{C}$, не зависящее от колебаний температуры атмосферного воздуха.

По температуре:

на дневной поверхности температура задается зависимостью

$$t_{\text{пов.гр}} = 15 \cos\left(\frac{z}{58,1}\right) + 3,37 \quad [\text{°C}],$$

где z — время, сут.

Зависимость получена на основе данных среднемесячных температур наружного воздуха за год [1] с учетом влияния растительного покрова, толщины и продолжительности стояния снежного покрова земли; поправки на среднюю геодезическую отметку данного места; амплитуды годового колебания температуры на земной поверхности; теплофизических характеристик грунтов.

В объеме рассматриваемого слоя грунта принята начальная температура 6 $^{\circ}\text{C}$, взятая как среднее значение всех температур массива грунта на различных глубинах при естественном распределении в теплый период года [2].

На нижней границе температура принимается равной температуре нейтральной зоны — $t_{\text{р}} = 4$ °C (глубина нейтральной зоны $x = 16,56$ м).

Предложенная модель станции «Октябрьская» Новосибирского метрополитена использована для расчета теплового режима окружающего станцию массива грунта.

Массив грунта вокруг станции имеет три слоя: верхний — насыпной грунт (песок + супесь), средний — супесь лессовая, нижний — суглинок лессовой (рис. 1). Теплофизические свойства таких грунтов в талом и мерзлом состоянии определены в работе [2].

Станция представляет собой трехэтажное сооружение (рис. 2), расположенное под землей. Помещения находятся в трех уровнях: это уровень кассового зала (отметка +7,230), уровень машинного помещения эскалаторов (отметка +4,200) и уровень платформы (отметка +1,080). За нулевую отметку принят уровень головки рельса.

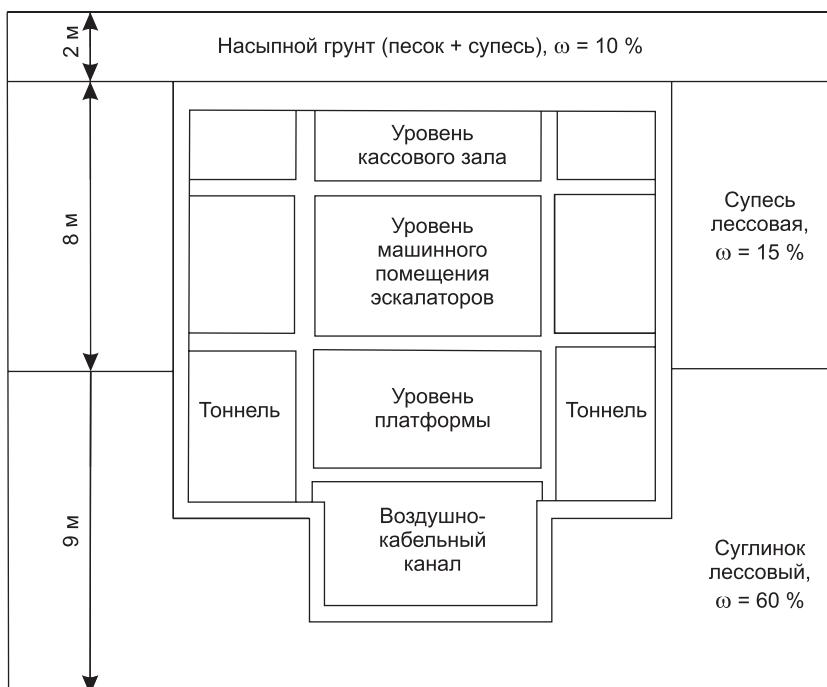


Рис. 2. Разрез массива грунта вокруг станции метрополитена «Октябрьская» с учетом станции; ω — влажность

Для исследования процесса образования «тепловой подушки» вокруг станции метрополитена мелкого заложения были использованы: модель грунта без станции (рис. 1) и модель станции в грунте (рис. 2).

Для расчета модели тепловых процессов в массиве грунта вокруг станции метрополитена «Октябрьская» с учетом теплового потока из помещений станции в грунт приняты следующие исходные данные.

Теплофизические свойства ограждающих конструкций станции:
железобетон

$$\rho = 2500 \text{ кг} / \text{м}^3; c = 0,84 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{°C}); \lambda = 2,04 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{°C});$$

штукатурка

$$\rho = 2100 \text{ кг} / \text{м}^3; c = 0,85 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{°C}); \lambda = 0,78 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{°C}),$$

где ρ — плотность; c — теплоемкость; λ — теплопроводность.

Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции α_b [2].

Функции изменения температуры внутреннего воздуха t_b для служебных помещений и тоннелей станции в зависимости от времени года (по результатам мониторинга микроклимата за 2009–2010 гг.):

- в уровне кассового зала и платформы ($t_b = 20\ldots26^{\circ}\text{C}$)

$$t_b = 3 \cos\left(\frac{z}{58,1}\right) + 23;$$

- в уровне машинного зала эскалаторов ($t_b = 22\ldots26^{\circ}\text{C}$)

$$t_b = 2 \cos\left(\frac{z}{58,1}\right) + 24;$$

- в тоннелях и кабельно-воздушном канале ($t_b = 22\ldots26^{\circ}\text{C}$)

$$t_b = 4 \cos\left(\frac{z}{58,1}\right) + 20.$$

Проверка результатов исследования на модели естественного температурного поля грунта аналитическим и численным (методом конечных элементов) методами показала их достаточную сходимость, что позволило применить ее для расчета температурного поля грунта со станцией методом конечных элементов.

По результатам расчета естественной температуры грунта построены графики зависимости температуры грунта от времени эксплуатации станции на различных глубинах (1; 3,5; 10 м) (рис. 3). Из них видно, что вследствие тепловой инерции грунта наблюдается запаздывание времени достижения максимальных (в теплый период) и минимальных (в холодный период) температур грунта на различных глубинах от соответствующих температур наружного воздуха и на поверхности грунта. Иными сло-

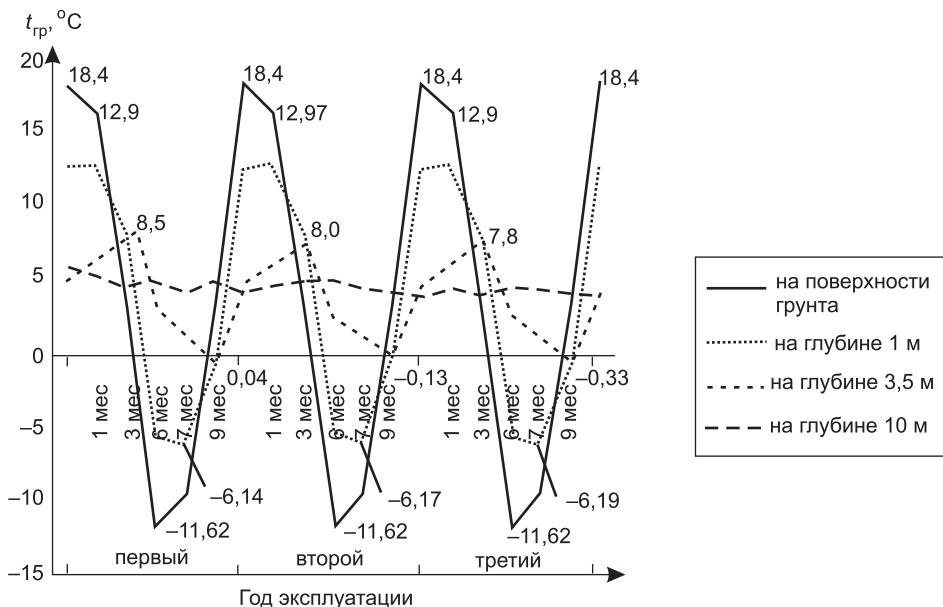


Рис. 3. Зависимости естественной температуры массива грунта от времени эксплуатации станции

вами, смена сезонов (периодов) в массиве грунта отстает от смены сезонов (периодов) атмосферного воздуха.

Установлено, что на глубине 1 м происходят наиболее значительные колебания температуры. На глубине 3,5 м колебания температуры менее резкие при сезонных изменениях наружного воздуха. На глубине 10 м колебания температуры составляют около 1 °C.

Наименьшая температура грунта ($-6,19^{\circ}\text{C}$) достигается на глубине 1 м только в феврале (7-й мес измерений), тогда как наименьшая температура на поверхности грунта ($-11,62^{\circ}\text{C}$) — в январе (6-й мес измерений). Наибольшая температура грунта на глубине в 1 м ($12,97^{\circ}\text{C}$) достигается только в августе (1-й мес измерений), тогда как наибольшая температура на поверхности ($18,36^{\circ}\text{C}$) — в июле. Следовательно, отставание сезонных колебаний температур на глубине 1 м составляет в среднем 1 мес. На глубине 3,5 м отставание температур при сезонных колебаниях еще больше — 3 мес, а на глубине 10 м — почти полгода.

Также на рис. 3 видно, что температуры грунта на различных глубинах в одни и те же периоды времени (сезоны) во второй и третий годы эксплуатации отличаются не более чем на $0,5^{\circ}\text{C}$. Это свидетельствует о достижении стационарности процессом колебаний, т.е. по прошествии двух лет последующие сезонные колебания температур грунта будут повторяться с циклом в один год. Например, температура грунта на глубине 3,5 м в феврале второго года составляет $1,63^{\circ}\text{C}$, в феврале третьего года $1,65^{\circ}\text{C}$, и далее разница температуры между последовательными циклами сокращается.

Рассмотрим графики колебаний температуры грунта t_{rp} в зависимости от глубины x и времени эксплуатации станции (рис. 4). Видно, что отрицательные значения температуры грунта отмечены через 3 года 6 мес эксплуатации станции (январь) и через 3 года 9 мес (апрель). Причем во втором случае (рис. 4, в) глубина промерзания грунта больше, чем в первом (рис. 4, б), и составляет 3,2 м.

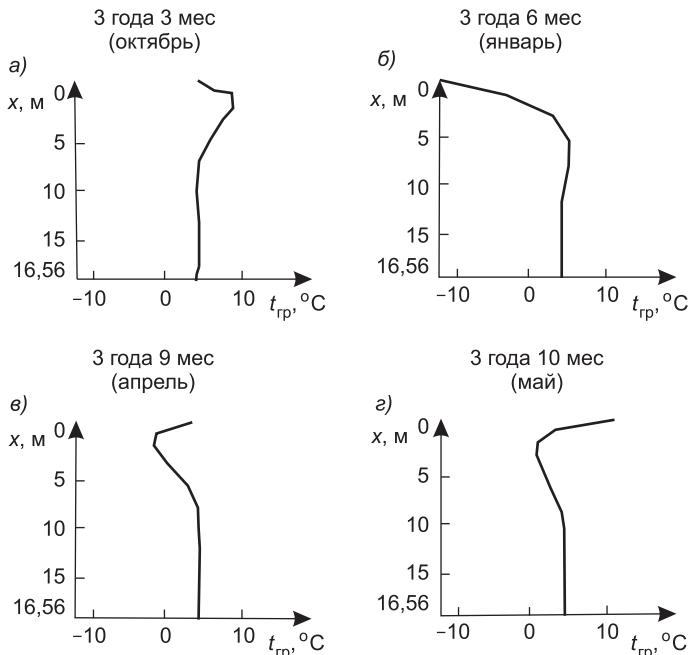


Рис. 4. Зависимости колебаний температуры грунта от времени эксплуатации станции

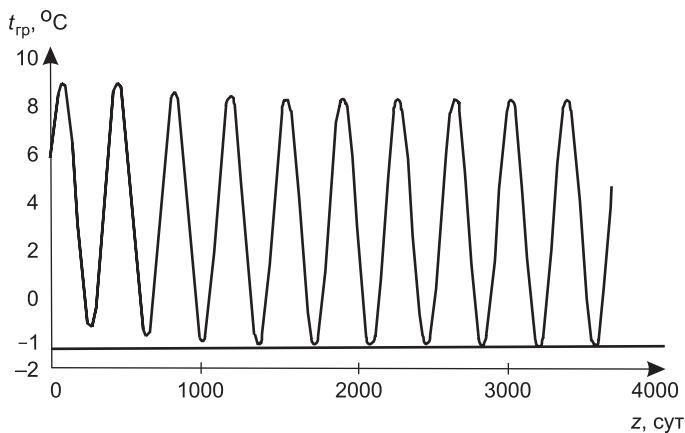


Рис. 5. Зависимость колебаний температуры грунта на глубине промерзания 3,2 м от времени эксплуатации станции

На рис. 5 представлена зависимость колебаний температуры грунта t_{rp} на глубине 3,2 м от времени z .

Видно, что за время примерно 1000 сут (2,5 года) устанавливаются стационарный процесс колебаний температуры грунта под влиянием атмосферного воздуха и постоянная максимальная глубина промерзания грунта 3,2 м (-1°C — температура замерзания влаги для супесей [3]). Необходимо заметить, что максимальная глубина промерзания грунта достигается не в январе (во время самых низких температур наружного воздуха), а в апреле (см. рис. 4), что объясняется тепловой инерцией грунта.

Рассмотрим процесс формирования температурного поля вокруг станции метрополитена мелкого заложения. По результатам моделирования тепловых процессов в массиве грунта вокруг станции построены графики зависимости температуры грунта от времени эксплуатации станции на различных глубинах (рис. 6).

Наибольшему влиянию атмосферного воздуха подвергаются потолок и стены кассового зала. Но вследствие процесса образования «тепловой подушки» температура грунта вокруг станции значительно выше, чем при естественном распределении температур из-за влияния теплового потока из внутренних помещений станции.

Для условий станции «Октябрьская» Новосибирского метрополитена определено, что при заглублении в грунт на 2 м стационарный характер колебаний температур грунта в «тепловой подушке» устанавливается за 1 год.

Из рис. 6 видно, что на глубине от 1 до 3,5 м запаздывание достижения максимальных и минимальных значений температуры грунта от температуры атмосферного воздуха составляет 1 мес, что меньше, чем при ненарушенном состоянии грунта.

Выводы. 1. Стационарный процесс колебаний температуры в массиве грунта вокруг станции под влиянием температуры наружного воздуха и теплового потока из помещений метрополитена устанавливается за 1 год.

2. Глубина промерзания грунта над станцией составляет менее 1 м.
3. Значения температуры грунта на различных глубинах в «тепловой подушке» существенно превышают значения естественного распределения

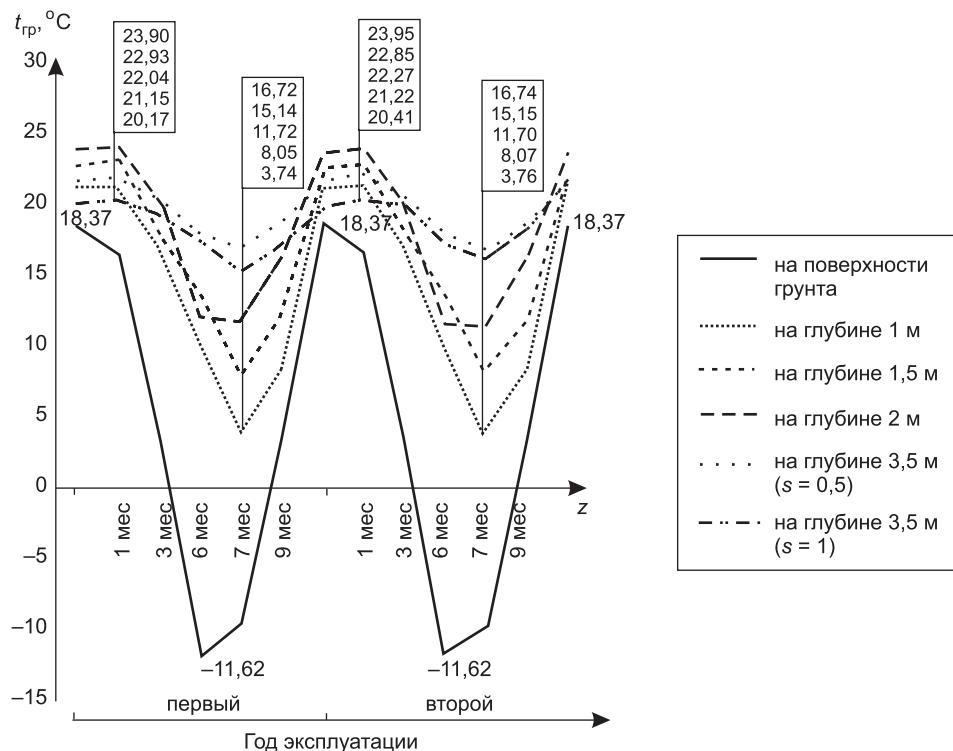


Рис. 6. Зависимость температуры грунта в «тепловой подушке» от времени; s — расстояние от наружной поверхности стены до точки измерения в грунте

ния температуры в массиве грунта (в среднем на 9°C на глубине 1 м, а при больших глубинах эта разница возрастает в два-три раза).

4. Влияние «тепловой подушки» уменьшает время запаздывания смены сезонов (периодов) в массиве грунта от смены сезонов (периодов) атмосферного воздуха по сравнению со временем запаздывания при естественном распределении температуры в грунте.

Помещения станции метрополитена оказывают значительное влияние на распределение температуры в окружающем ее грунте. Тепловой поток из внутренних помещений станции метрополитена способствует прогреву массива грунта и установлению стационарного температурного режима за 1 год, а при естественном распределении температур в грунте — за 2 года. Следовательно, после первого года эксплуатации теплопотери из внутренних помещений станции метрополитена в результате образования вокруг нее «тепловой подушки» существенно сократятся по сравнению с начальным периодом эксплуатации. Соответственно снижаются и затраты тепловой энергии на их компенсацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология [Текст] / Госстрой России. — М., 1999. — 67 с.
2. Лугин, И.В. Изменение теплопотерь в грунт из помещений станции «Октябрьская» Новосибирского метрополитена за 24 года эксплуатации [Текст] / И.В. Лугин, А.Ю. Пьянкова // Сб. докл. Третьей Междунар. науч.-техн. конф. «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». — М. : МГСУ. — 2009. — С. 119–123.
3. Гончаров, С.А. Термодинамика [Текст] / С.А. Гончаров. — М., 2002. — 390 с.
4. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах [Текст] / Госстрой СССР. — М., 1988. — 26 с.

*ЛУГИН И.В., канд. техн. наук., доц.; E-mail: ivlugin@misd.nsc.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*
*ПЬЯНКОВА А.Ю., студ.; E-mail: nusha-nv@yandex.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 06.10.10

Lugin I.V., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: ivlugin@misd.nsc.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Pjankova A.Yu., student; E-mail: nusha-nv@yandex.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

CHANGE OF THE TEMPERATURE FIELD OF THE GROUND ROUND UNDERGROUND STATION OF UNDERGROUND FROM THE OPERATION BEGINNING

Process of change of temperature of a ground round station of underground small deep during operation is considered. Achievement time constantly thermal process of annual fluctuations of temperatures of a ground is defined. Temperatures in some points of a heated-up zone of a ground round station are considered.

Key words: station of underground, shallow-deep, ground temperature.

REFERENCES

1. SNiP 23-01-99*. Building climatology [Text] / State Building in Russia. — M., 1999. — 67 p.
2. Lugin, I.V. Change heattransfer in a ground from premises of station «Octoberskaya» of Novosibirsk underground for 24 years of operation [Text] / I.V. Lugin, A.Yu. Pjankova // Collection of Reports of the Third Intern. Scientific and Technical Conf. «Theoretical Bases Heat-gassupply and Ventilation». — M. : MSCU. — 2009. — P. 119–123.
3. Goncharov, S.A. Thermodynamics [Text] / S.A. Goncharov. — M., 2002. — 390 p.
4. SNiP 2.02.04-88. The bases and the bases of buildings and constructions on hermafrost grounds [Text] / State Building in USSR. — M., 1988. — 26 p.

УДК 628.35

Г.Т. АМБРОСОВА, П.В. СТЕПАНОВА, О.В. КСЕНОФОНТОВА

**НОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ,
ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ И ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ОСАДКОВ
СТОЧНЫХ ВОД**

Проведены исследования по изучению возможности совмещения процессов стабилизации (сбраживания), обеззараживания и обезвоживания осадков хозяйственно-фекальных сточных вод. Разработана установка для комплексной обработки осадков и подобраны оптимальные рабочие параметры. Обработанные осадки могут быть утилизированы в сельском хозяйстве в качестве экологически безопасного эффективного органоминерального удобрения.

Ключевые слова: сырой осадок, избыточный активный ил, стабилизация, сбраживание, обеззараживание, обезвоживание, комплексная обработка осадка, гельминты, овицидный препарат, флокулянт, установка, биогаз, органоминеральное удобрение.

При решении проблем охраны окружающей среды все большую актуальность приобретают вопросы рационального использования природных ресурсов, а именно переработка отходов, образующихся на малых очистных сооружениях канализации (ОСК), для получения биогаза и ценного органоминерального удобрения. Осадки малых ОСК универсальны: помимо биогенных элементов (азота, фосфора и серы) они обогащены микро- и макроэлементами, не содержат ионов тяжелых металлов и других токсичных веществ, так как образуются при очистке только хозяйственно-бытовых сточных вод. Внесение в почву удобрений из осадков ОСК увеличивает урожайность возделываемых культур в 1,5–2,5 раза, повышает производительность пашни на 8–10 %, значительно улучшает водный и воздушный режимы почв [1].

Сырые осадки сточных вод имеют высокую влажность (96–99 %), не стабильны, обсеменены яйцами гельминтов и другими патогенными микроорганизмами, поэтому их можно использовать в качестве удобрения только после комплексной обработки: сбраживания, обеззараживания и обезвоживания. В нашей стране, как правило, осадки подвергаются комплексной обработке на ОСК крупных городов. Причем стабилизация, обеззараживание и обезвоживание осадков осуществляются в несколько стадий. Вначале осадки сгущают, затем подвергают аэробной или анаэробной обработке, после этого обезвоживают и обеззараживают. В крайне редких случаях осадки перед использованием в качестве органоминерального удобрения обезвреживают. Для каждого из перечисленных процессов предусматриваются специальные узлы, в состав которых входят сооружения, оборудование, подводящие и отводящие коммуникации, система КИПиА [2].

В странах Западной Европы в удобрения перерабатывают более 40 % годового объема образующихся осадков сточных вод. В России на ОСК ежегодно образуется более 85 млн м³ осадков, из этого объема перерабатывается в органоминеральные удобрения менее 10 % [2].

© Амбросова Г.Т., Степанова П.В., Ксенофонтова О.В., 2010

На большинстве ОСК в РФ чаще всего решается только одна из указанных технологических задач — обезвоживание, реже осуществляется стабилизация в метантенках, работающих в мезофильном режиме с последующим обезвоживанием. Эффективное обеззараживание осадков практически нигде не производится. Такие осадки складируются на иловых площадках, загрязняя поймы рек и способствуя не только отчуждению территорий сельскохозяйственного назначения, но и повышению рисков возникновения эпидемиологических очагов.

Более сложная ситуация складывается при организации систем водоотведения малых объектов (коттеджей, кемпингов, туристических комплексов и фермерских хозяйств). В лучшем случае для очистки стоков таких объектов применяют компактные установки, в большинстве которых не предусмотрена комплексная обработка осадка. По существу, на сегодня в мировой практике очистки сточных вод от малых объектов отсутствуют компактные сооружения или оборудование, предназначенные для комплексной обработки осадков.

Настоящая работа посвящена изучению процессов стабилизации, обеззараживания и обезвоживания осадка, которые совмещены в одном аппарате. Для достижения поставленной цели была создана и смонтирована экспериментальная установка (рис. 1), проведены большие серии опытов.

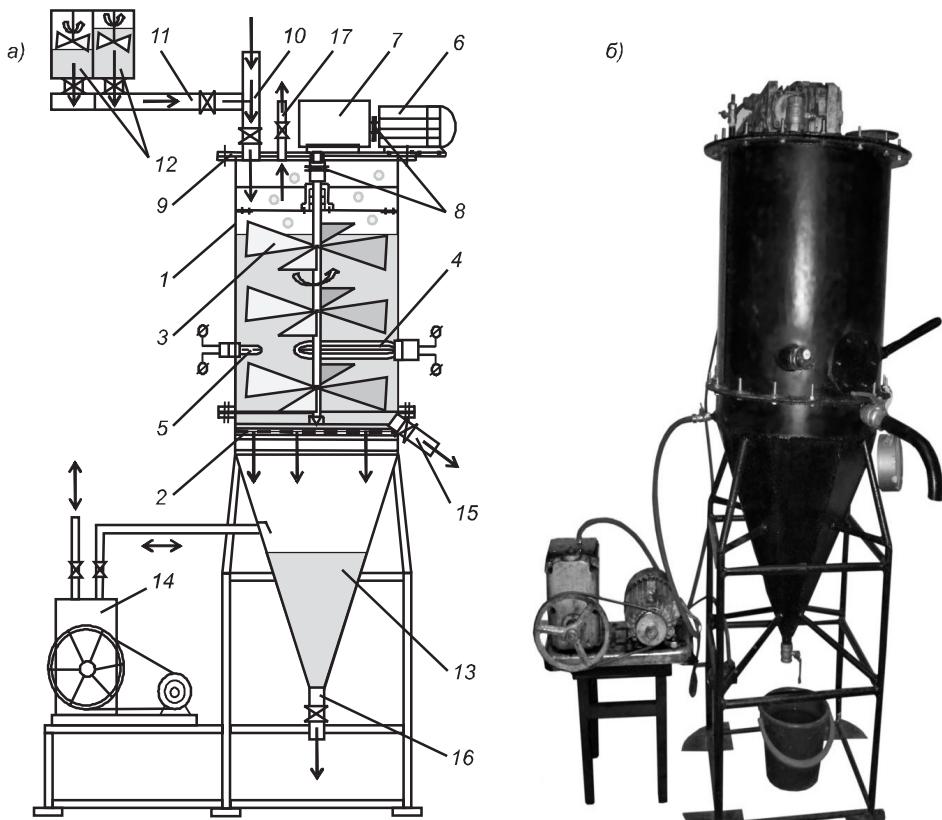


Рис. 1. Рабочая модель установки комплексной обработки осадков:
а) схема; б) фотография

1 — корпус; 2 — фильтрующий элемент; 3 — мешалка; 4 — электрический тэн; 5 — электрический термометр; 6 — электродвигатель; 7 — редуктор; 8 — муфты сцепления; 9 — крышка; 10 — патрубок для загрузки осадка; 11 — патрубок для подачи флокулянта и / или обеззаражающего препарата; 12 — баки приготовления флокулянта и овицидного препарата; 13 — конусообразная накопительная емкость для сбора фильтрата; 14 — вакуум-насос; 15 — патрубок для выгрузки обработанного осадка; 16 — патрубок для отвода фильтрата; 17 — патрубок отвода газа

Малая установка предназначена для комплексной обработки осадков сточных вод малых населенных пунктов и отдельных потребителей для получения осадка с возможностью его утилизации в качестве удобрения. В установке в сравнении с существующими схемами и аппаратами обеспечиваются стабильный мезофильный режим сбраживания и эффективное обеззараживание овицидным препаратом, а также достигается довольно высокая степень обезвоживания осадка.

Установка комплексной обработки осадков (КОО) сточных вод состоит из корпуса 1, на внешней стороне которого возможно устройство теплоизоляционного слоя. Внутри корпуса имеется фильтрующий элемент 2, выполненный из двух слоев металлической сетки, между которыми заключен слой полимерного гидрофобного материала (ткань фильтровальная полиамидная капроновая). Внутри корпуса предусмотрены перемешивающее устройство, выполненное в виде лопастной мешалки 3, и нагревательные элементы 4, предназначенные для поддержания расчетной температуры сбраживания 30...35 °C. Температура осадка в установке контролируется электрическим термометром 5.

Лопастная мешалка соединена с электродвигателем 6 и червячным редуктором 7 через муфты сцепления 8, которые установлены на крышке 9 корпуса. Патрубок подачи осадков сточных вод 10 также размещен на крышке корпуса. В патрубок загрузки осадка 10 встроены патрубки подачи 11 флокулянта и овицидного препарата, соединенные с блоком 12. Флокулянт катионного типа Zetag применяется с целью интенсификации процесса обезвоживания осадка, а овицидный препарат «ПУРОЛАТ-БИНГСТИ» — для его обеззараживания. Ниже фильтрующего элемента расположена конусообразная накопительная емкость для сбора фильтрата 13, соединенная с вакуум-насосом 14. Выше фильтрующего элемента установлен патрубок выгрузки обработанного осадка 15. Вакуум-насос предназначен для создания вакуума под фильтрующим элементом в накопительной емкости 13, что упрощает отделение фильтрата от твердой фазы осадков сточных вод и повышает эффект обезвоживания, а также для регенерации ткани фильтрующего элемента обратным потоком воздуха. Патрубок отвода фильтрата 15 расположен в нижней части накопительной емкости 13. Процесс обезвоживания осадка интенсифицируется подачей флокулянта и созданием вакуума в конической части установки.

Для отвода биогаза брожения в крышке корпуса устроен патрубок отвода газа 17. Биогаз направляется в газгольдер, и в дальнейшем он может использоваться для получения электрической или тепловой энергии.

Суть эксперимента заключалась в следующем. Смесь сырого осадка и уплотненного активного ила, образующуюся при очистке стоков ОСК (г. Барнаул), обрабатывали овицидным препаратом «ПУРОЛАТ-БИНГСТИ». Затем ее помещали в отдельно стоящую камеру предварительного сбраживания (КПС), где протекала кислая стадия брожения в течение 8...10 сут. Первые 3–4 сут осуществлялся постепенный нагрев осадка до температуры 32...35 °C, которую далее поддерживали постоянной. После завершения кислой стадии брожения смесь обрабатывали флокулянтом Zetag (доза 6–7 г на килограмм сухого вещества) и перегружали в установку КОО, где осуществлялась щелочная стадия брожения (7...15 сут). Установка КОО работала в двух режимах: при создании вакуума под фильтрующим элементом (250...450 мм рт. ст.) и без него. В ходе всего эксперимента проводился замер образующе-

гося газа, по объему которого судили об интенсивности процесса сбраживания.

Анализу подвергались как сбраживаемая смесь, так и образующийся фильтрат. В качестве основных контролируемых показателей были приняты влажность, зольность, удельное сопротивление, наличие яиц гельминтов, их видовой состав и жизнеспособность. Качество фильтрата оценивалось по ХПК, БПК, рН, перманганатной окисляемости, ЛЖК, щелочности, концентрации азота аммонийного, фосфора, сульфатов, плотного и прокаленного остатков, взвешенным веществам. Все анализы проведены по стандартным методикам, применяемым в лабораториях ОСК Российской Федерации. Выполнено четыре серии экспериментов при разных условиях обработки осадка.

В первой серии экспериментов смесь осадков влажностью 97,6 % обрабатывали «ПУРОЛАТ-БИНГСТИ» при дозе 5 мл препарата на метр кубический осадка, что соответствует 0,02 г препарата на килограмм сухого вещества осадка. Во второй — смесь влажностью 96,6 % предварительно обрабатывали дозой 10 мл/м³ (0,03 г препарата на килограмм сухого вещества осадка). В первой и второй сериях экспериментов разряжение под фильтрующим элементом не создавалось. Введение в осадок 0,02...0,03 г/кг препарата «ПУРОЛАТ-БИНГСТИ» не обеспечило его полную дегельминтизацию, поэтому в следующих сериях экспериментов дозы препарата были увеличены.

В третьей серии экспериментов работали со смесью влажностью 95,2 %, которая обрабатывалась препаратом с дозой 20 мл/м³ (0,042 г на килограмм сухого вещества осадка). Процесс обезвоживания в установке КОО интенсифицирован созданием разряжения (230...270 мм рт. ст.) под фильтрующим элементом. В четвертой серии в установку загружали осадок влажностью 96,1 %, при этом доза овицидного препарата составляла 20 мл/м³ (0,051 г на килограмм сухого вещества осадка). Под фильтровальным элементом создавалось разряжение (400...450 мм рт. ст.).

Продолжительность проведения каждой серии экспериментов составляла 16...23 сут. Результаты основных экспериментальных данных приведены на рис. 2 и 3, где приняты следующие условные обозначения: Э1 — первая серия экспериментов; Э2 — вторая; Э3 — третья; Э4 — четвертая.

Процесс анаэробного сбраживания, судя по рН, ЛЖК, азоту аммонийному, щелочности (см. рис. 2), завершался на 16–20-е сут. Распад органических веществ при этом достигал 40...42 %, а влажность обработанного и обезвоженного осадка снижалась до 80...82 %. Для сравнения при проектировании цеха механического обезвоживания осадка с вакуум-фильтрами расчетная влажность осадка принималась согласно СНиП 02.04.03–85 (п. 6.378, табл. 62) 72...87 %. После обработки осадка препаратом «ПУРОЛАТ-БИНГСТИ» концентрация азота аммонийного увеличивалась в среднем в 2,5–4,5 раза по сравнению со значением этого показателя в загружаемом осадке и достигала в отдельных экспериментах почти 1200 мг/л.

Во всех четырех сериях экспериментов в загружаемом осадке были обнаружены яйца гельминтов (75...95 шт. на грамм сухого вещества осадка), причем они были представлены в основном аскаридой собачьей (таксокарой), аскаридой человеческой, остирицей. Периодически встречались отдельные яйца власоглава, карликового цепня, лентеца широкого, анкилостомы и хлыстовика. В третьей и четвертой сериях экспериментов в

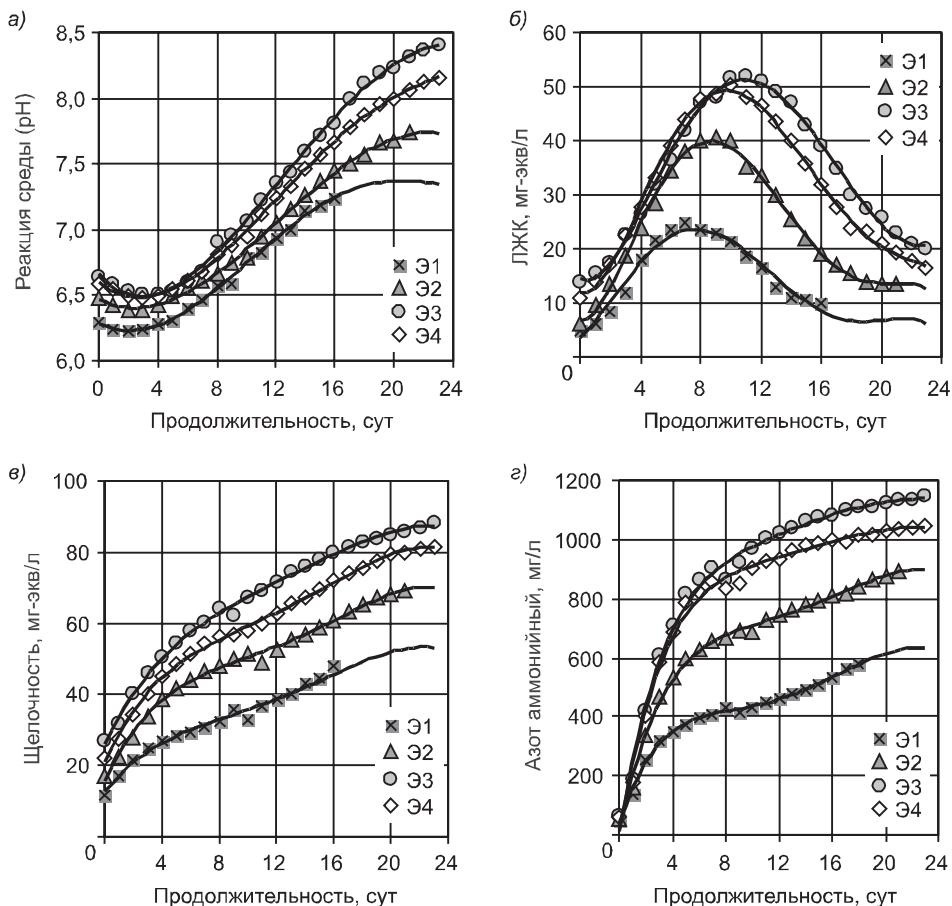


Рис. 2. Влияние продолжительности обработки смеси в установке КОО на изменение исследуемых параметров:

а) реакция среды; б) щелочность; в) ЛЖК; г) азот аммонийный

сброженных, обезвоженных и обеззараженных осадках жизнеспособные яйца гельминтов отсутствовали (см. рис. 3).

Таким образом, результаты исследований показали, что обработку осадка можно осуществлять в анаэробных условиях при мезофильном режиме, т.е. при температуре 33 °C. Процесс обезвоживания осадка наиболее интенсивно протекает при создании вакуума в конической части установки 250...450 мм рт. ст. и оптимальной дозе флокулянта Zetag 6...7 г / кг. Оптимальная доза овицидного препарата «ПУРОЛАТ-БИНГСТИ» значительно ниже и составляет 0,04...0,05 г / кг. В обоих случаях доза приведена в граммах флокулянта или овицидного препарата на килограмм сухого вещества обрабатываемого осадка.

Габаритные размеры описываемой экспериментальной установки позволяют принять и обработать осадок в количестве 30...40 л / сут. Размеры производственных установок в сравнении с экспериментальной установкой будут значительно больше, что позволит принимать осадок в количестве 3...4 м³ / сут. Такое количество осадка образуется на очистных сооружениях канализации производительностью до 5000 м³ / сут.

Эксплуатация экспериментальной установки в течение длительного периода (восемь месяцев) показала устойчивость ее работы, что подтверждается стабильными результатами, оцениваемыми качеством обрабо-

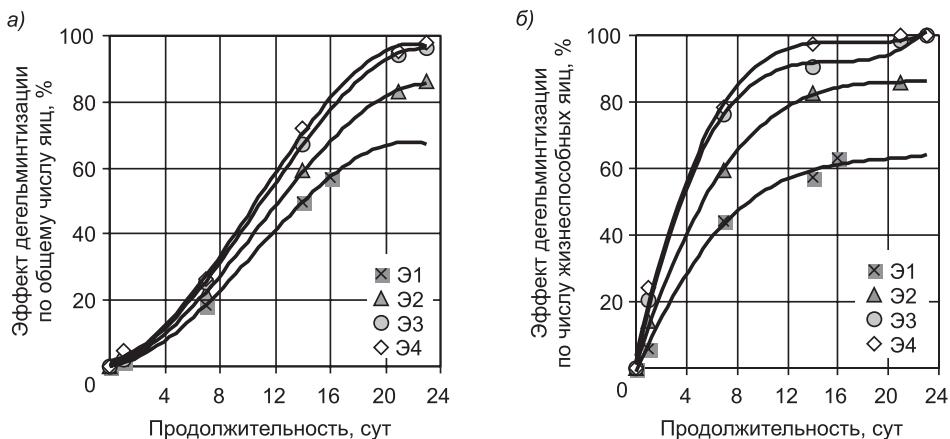


Рис. 3. Влияние продолжительности обработки смеси в установке КОО и дозы препарата «ПУРОЛАТ-БИНГСТИ» на изменение исследуемых параметров эффекта дегельминтизации по общему числу яиц гельминтов (а) и по числу жизнеспособных яиц гельминтов (б)

танного осадка. В анаэробно сброшенном осадке концентрация азота аммонийного находилась в пределах 600...900 мг/л, щелочность — более 40...60 мг-экв/л, ЛЖК — менее 8...16 мг-экв/л, pH — 7,2...8,2, запах асфальта, цвет — черный, что соответствует показателям при обработке осадка классическим методом в метантенках.

Выводы. 1. Исследуемые осадки очистных сооружений канализации г. Барнаула были обсеменены яйцами гельминтов (75...95 шт. на грамм сухого вещества осадка).

2. Исследования показали возможность совмещения в одном аппарате трех процессов: стабилизации, обеззараживания и обезвоживания. Обработку осадка необходимо осуществлять в анаэробных условиях при мезофильном режиме. Процесс обезвоживания наиболее интенсивно протекает при создании вакуума в конической части установки 250...450 мм рт. ст.

3. Подобраны оптимальные дозы флокулянта Zetag (6...7 г на килограмм сухого вещества осадка) и овицидного препарата «ПУРОЛАТ-БИНГСТИ» (0,04...0,05 г на килограмм сухого вещества осадка), обеспечивающие получение после комплексной обработки стабильного, безопасного в санитарно-паразитологическом отношении органоминерального удобрения.

4. Предлагаемая конструкция аппарата, предназначенная для комплексной обработки осадков, предусматривает сбраживание, обезвоживание и обеззараживание осадков хозяйствственно-фекальных сточных вод очистных сооружений канализации (производительность до 5000 м³/сут).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Шааф, Г. О длительном применении в сельском хозяйстве осадков сточных вод и компостов [Текст] : пер. с нем. / Г. Шааф // Обработка органоминеральных отходов: биологическая, механическая и термическая : Матер. VIII конф. — Витценхаузенский ин-т отходов, охраны окружающей среды и энергетики. — Витценхаузен, 2004. — С. 319–340.
- Мирный, А.Н. Коммунальная экология: Энциклопедический справочник [Текст] / А.Н. Мирный, Л.С. Скворцов, Е.И. Пупырев, В.Е. Корецкий. — М. : Изд-во Прима-Пресс-М, 2007. — С. 213–250.

АМБРОСОВА Г.Т., канд. техн. наук, доц.; E-mail: galina-ambrosova@yandex.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)
СТЕПАНОВА П.В., асп.; E-mail: po13@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)
КСЕНОФОНТОВА О.В., канд. техн. наук., доц.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

Получено после доработки 27.07.10

Ambrosova G.T., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: galina-ambrosova@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Stepanova P.V., post-graduate student; E-mail: po13@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Ksenofontova O.V., candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

FRESH INSTALLATION FOR STABILIZATION, DECONTAMINATION AND DEHYDRATION SLUDGE

The studies on the feasibility of combining the processes of stabilization, decontamination and dehydration of precipitation fecal sewage. A plant for complex processing of precipitation and selected the optimal operating parameters. Treated sediments can be recycled in agriculture as environmentally effective organic manure.

Key words: raw sludge, excess activated sludge, stabilization, digestion, decontamination, dewatering, complex treatment sludge, worms, ovicid preparation, flocculant, installation, biogas, organic manure.

REFERENCES

1. Schaaf, H. On the long-term use in agriculture of sewage sludge and compost [Text] / H. Schaaf // Proc. of organic waste: biological, mechanical and thermal: Materials VIII Conf. — Vitzenhauzen Institute of Waste, Environment and Energy. — Vitzenhauzen, 2004. — P. 319–340.
 2. Mirnyi, A.N. Municipal ecology: the Encyclopaedic directory [Text] / A.N. Mirnyi, L.S. Skvortsov, E.I. Pupyrev, V.E. Koretsky. — M. : Publ. House the Prima-Press-M, 2007. — P. 213–250.
-

СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

УДК 624.21.093.012.45

С. А. БОКАРЕВ, Д. Н. СМЕРДОВ, А. А. НЕРОВНЫХ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПО ПРОЧНОСТИ СЕЧЕНИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ, УСИЛЕННЫХ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Методика расчета, предназначенная для проектирования железобетонных пролетных строений мостов, адаптирована к расчету эксплуатируемых железобетонных пролетных строений мостов, усиленных композитными материалами. Разработана в Сибирском государственном университете путей сообщения, учитывает эффективность работы усиления при различных способах производства работ.

Ключевые слова: углеродное волокно, композитный материал, несущая способность, метод конечных элементов, железобетонный элемент, напряженно-деформированное состояние.

Использование композитных материалов при усилении железобетонных пролетных строений мостов — перспективная технология, нашедшая широкое применение за рубежом [1]. По сравнению с другими существующими технологиями усиления она имеет ряд достоинств, основными из которых являются существенное снижение трудозатрат на выполнение усиления и относительно низкая общая стоимость применяемых материалов.

В Сибирском государственном университете путей сообщения (СГУПС) начиная с 2006 г. проводят широкомасштабные исследования работы железобетонных конструкций, усиленных композитами, выполняя испытания железобетонных образцов [2], моделируя их работу и работу пролетных строений в рамках численных экспериментов с использованием метода конечных элементов (пакет ANSYS) и метода упругих решений [3]. Следующая задача, которую необходимо решить в рамках проводимых исследований, это адаптация существующей инженерной методики расчета железобетонных элементов для расчета пролетных строений, усиленных композитными материалами.

В соответствии с действующими нормативными документами [4] несущие конструкции железобетонных пролетных строений мостов рассчитывают на действие постоянных и временных нагрузок по методу предельных состояний. Эксплуатируемые конструкции рассчитывают только по предельным состояниям первой группы, что соответствует потере ими их несущей способности. Стоит отметить, что в конце 2009 г. ОАО «ЦНИИС» взамен СНиП 2.05.03–84* подготовил проект Свода Правил «Мосты и трубы», который в настоящее время передан на утверждение в

Минрегион РФ. Данный документ допускает применение при проектировании пешеходных мостов, а также при реконструкции и усилении мостов полимерно-композиционных материалов. Также в качестве арматуры в железобетонных конструкциях могут применяться композитные материалы на основе стеклянных, углеродных и минеральных волокон. В соответствии с п. 3.56 расчет сечений, нормальных к продольной оси железобетонного элемента, на действие изгибающего момента допускается производить по предельным деформациям с использованием фактических диаграмм деформирования бетона и арматуры. В СНиП 2.05.03–84* [4] при проектировании железобетонных пролетных строений предусмотрены расчеты по прочности следующих сечений:

- нормальных к продольной оси элемента на действие изгибающего момента;
- между наклонными трещинами сжатого бетона по прочности;
- наклонных к продольной оси элемента на действие поперечной силы;
- наклонных к продольной оси элемента на действие изгибающего момента.

Разрушение изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами, от совместного действия изгибающего момента и поперечной силы может происходить по одному из возможных вариантов: разрушение нормального сечения; разрушение сжатого бетона между трещинами от главных сжимающих напряжений; разрушение по наклонной трещине от действия поперечной силы; излом по наклонному сечению от преобладающего действия изгибающего момента в результате разрушения слоя бетона, расположенного между рабочей арматурой и композитным материалом [2]. Последовательно рассмотрим перечисленные расчеты, адаптируя их к особенностям работы эксплуатируемых железобетонных пролетных строений, усиленных композитными материалами.

Расчет по прочности нормального к продольной оси элемента сечения на действие изгибающего момента. При проектировании и расчете усиления следует учитывать ряд особенностей работы конструкции, связанных с производством работ. Усиление элементов пролетных строений мостов можно проводить с разгрузкой от действия собственного веса и без разгрузки. В первом случае расчет нормального сечения на действие изгибающего момента можно выполнить исходя из следующих допущений:

- расчетное сопротивление бетона растяжению принимается равным нулю;
- сопротивление бетона сжатию ограничивается напряжениями, равными расчетному сопротивлению бетона осевому сжатию R_b и равномерно распределенными в пределах условной сжатой зоны;
- растягивающие напряжения в арматуре ограничиваются расчетным сопротивлением растяжению R_s арматуры;
- сжимающие напряжения в арматуре ограничиваются расчетным сопротивлением сжатию R_{sc} ;
- растягивающие напряжения в композитном материале ограничиваются напряжением σ_c при отсутствии его закрепления по концам и расчетным сопротивлением волокон растяжению R_f при его закреплении U-образными хомутами.

Последнее допущение основано на рекомендациях итальянских норм проектирования [1] и результатах, полученных в ходе проведенных авторами экспериментальных исследований [2]. При расчете по прочности сечения

чения, нормального к продольной оси пролетного строения, на действие изгибающего момента исходим из предположения, что предельные напряжения в композитном материале достигают расчетного значения напряжений растяжения. При этом расчетная величина напряжений в композитном материале зависит от способа его закрепления. На рис. 1 показано два способа закрепления композита на конструкции. В первом случае (a) композит просто наклеивают на нижнюю поверхность балок пролетного строения, а во втором по концам его еще закрепляют, например, U-образными хомутами (б).

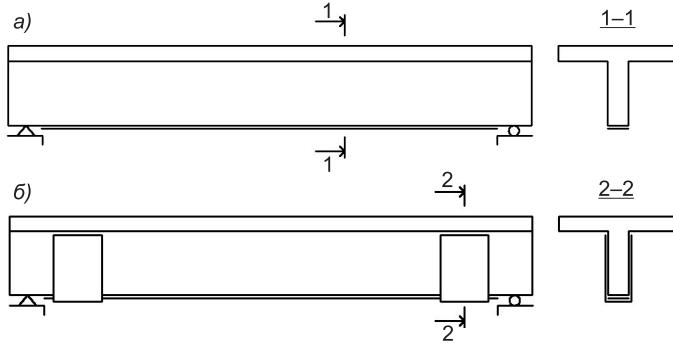


Рис. 1. Способы закрепления композита

Разрушение усиленных железобетонных элементов от действия изгибающего момента может происходить вследствие отслоения композитного материала по клею от поверхности бетона по концам композита или в области вертикальных трещин при напряжениях в композите:

$$\sigma_c = \varepsilon_c E_f, \quad (1)$$

где ε_c — относительная деформация композита в момент отслоения; E_f — модуль упругости волокон композитного материала.

При устройстве закреплений композитного материала в виде U-образных хомутов разрушение усиленных элементов происходит вследствие разрыва композитного материала при напряжениях, равных расчетному сопротивлению волокон композитного материала растяжению:

$$\sigma_c = R_f. \quad (2)$$

На рис. 2 приведена схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси изгибаемого железобетонного элемента, усиленного композитным материалом, при определении внутреннего предельного момента M^y . Расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, производят в зависимости от значения относительной высоты сжатой зоны $\xi = x / h_{0I}$ (рис. 2), определяемой из соответствующих условий равновесия. Значение ξ не должно превышать относительной высоты сжатой зоны бетона ξ_y , определяемой в соответствии с п. 3.61* [4] как для неусиленного сечения.

Несущую способность усиленных элементов прямоугольного поперечного сечения по изгибающему моменту рассчитывают по формуле

$$M^y = R_b x b (h_{0I} - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_{0I} - a'_s) + \sigma_c A_f a_c, \quad (3)$$

где высоту сжатой зоны x определяют из уравнения

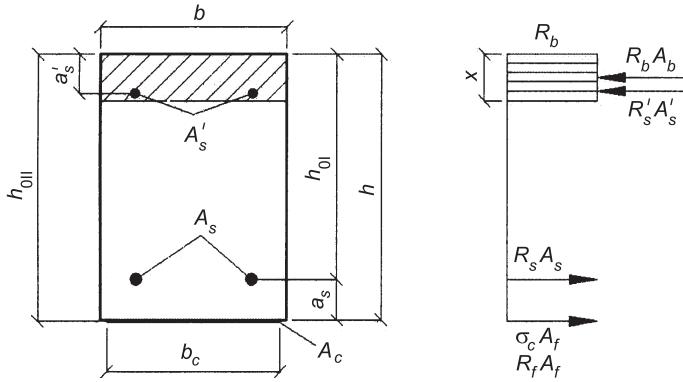


Рис. 2. Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси изгибающегося элемента, усиленного композитным материалом

$$x = \frac{R_s A_s + \sigma_c A_f - R_{sc} A'_s}{R_b x b}, \quad (4)$$

в котором R_b , R_{sc} , R_s — расчетные сопротивления бетона сжатию и арматурной стали растяжению соответственно;

σ_c — напряжение в композитном материале, при котором происходит его отслоение или разрыв;

A'_s , A_s — площади поперечного сечения сжатой и растянутой арматуры;

A_f — площадь поперечного сечения волокон композитного материала; b — ширина поперечного сечения элемента (ребра);

a'_s , a_s и a_c — расстояние от верхней грани элемента до центра тяжести сжатой арматуры, от нижней грани элемента до центра тяжести растянутой арматуры и композитного материала соответственно;

h_{0l} — рабочая высота сечения,

$$h_{0l} = h - a_s, \quad (5)$$

h — высота поперечного сечения элемента.

На рис. 3 приведена форма сжатой зоны бетона в сечениях тавровых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами.

Несущая способность усиленных элементов таврового поперечного сечения по изгибающему моменту при $\xi = x / h_{0l} \leq \xi_y$ определяется в зависимости от положения границы сжатой зоны по формулам:

а) если граница сжатой зоны проходит в плите (рис. 3, а)

$$M^y = R_b x b'_f (h_{0l} - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_{0l} - a'_s) + \sigma_c A_f a_c, \quad (6)$$

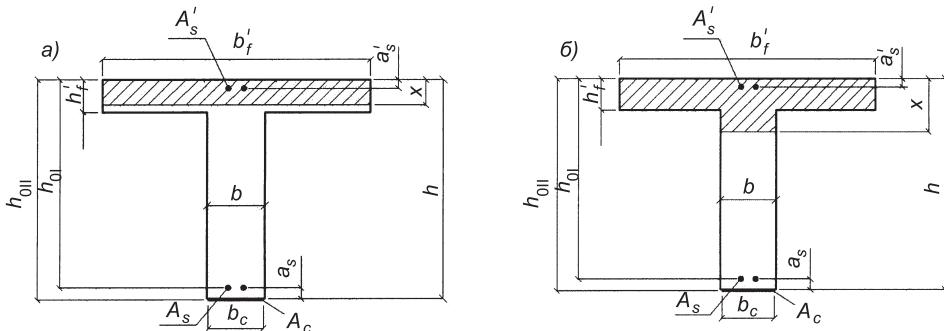


Рис. 3. Расчетное сечение тавровой балки при расположении границы сжатой зоны в плите (а), то же, в ребре (б)

высота сжатой зоны x определяется из уравнения

$$x = \frac{R_s A_s + \sigma_c A_f - R_{sc} A'_s}{R_b b'_f}; \quad (7)$$

б) если граница сжатой зоны проходит в ребре (рис. 3, б)

$$M^y = R_b b x (h_{0l} - 0,5x) + R_b (b'_f - b) h'_f (h_{0l} - 0,5h'_f) + \\ + R_{sc} A'_s (h_{0l} - a'_s) + \sigma_c A_f a_c, \quad (8)$$

высота сжатой зоны x определяется из уравнения

$$x = \frac{R_s A_s + \sigma_c A_f - R_b h'_f (b'_f - b) - R_{sc} A'_s}{R_b b}, \quad (9)$$

где b'_f — ширина плиты;

h'_f — высота плиты.

Расчет по прочности сжатого бетона между наклонными трещинами. Вследствие неупругих свойств бетона касательные напряжения равномерно распределяются по сечению и наклонная трещина раскрывается примерно одинаково по всей длине. Происходит взаимное смещение частей элемента по вертикали, в результате совместного действия сжимающих и сдвигающих усилий разрушается бетон сжатой зоны. Разрушение сжатого бетона между наклонными трещинами возможно только для элементов с малой величиной b или при использовании бетонов низкой прочности. В данном случае увеличить несущую способность возможно только путем изменения геометрических характеристик элемента в соответствии с рекомендациями СНиП 2.05.03-84* [4].

Для железобетонных элементов с поперечной арматурой несущая способность по прочности сжатого бетона между наклонными трещинами определяется по формуле

$$Q_b = 0,3\varphi_{w1}\varphi_{b1}R_b b h_{0l}, \quad (10)$$

$$\varphi_{w1} = 1 + \eta n_1 \mu_w, \quad (11)$$

где $\varphi_{w1} \leq 1,3$ при расположении хомутов нормально к продольной оси;

$\eta = 5$ — при хомутах, нормальных к продольной оси элемента;

$\eta = 10$ — то же, наклонных под углом 45° ;

n_1 — отношение модулей упругости арматуры и бетона, определяемое согласно п. 3.48* [4].

$$\mu_w = \frac{A_{sw}}{b S_w}, \quad (12)$$

где A_{sw} — площадь сечения ветвей хомутов, расположенных в одной плоскости;

S_w — расстояние между хомутами по нормали к ним.

Коэффициент φ_{b1} определяется по формуле

$$\varphi_{b1} = 1 - 0,01R_b, \quad (13)$$

где расчетное сопротивление R_b принимается в мегапаскалях.

Образование наклонной трещины начинается в середине боковых граней элементов, так как в этом месте касательные напряжения τ от поперечной силы достигают максимального значения:

$$\tau_{max} = \sigma_{mt} = \frac{Q}{b h_{0l}} \geq 2,5R_{bt}, \quad (14)$$

где R_{bt} — расчетное сопротивление бетона растяжению.

Расчет по прочности наклонного к продольной оси элемента сечения на действие поперечной силы. В соответствии п. 3.79* [4] наиболее невыгодное наклонное сечение и соответствующую ему проекцию на продольную ось элемента следует определять посредством сравнительных расчетов из условия минимума поперечной силы, воспринимаемой бетоном и арматурой. При этом на участках длиной $2h_0$ от опорного сечения следует выполнять проверку наклонных сечений с углом наклона к опорному (вертикальному) сечению 45° для конструкций с ненапрягаемой арматурой. В ходе экспериментальных исследований [2] было установлено, что наклонные трещины в экспериментальных образцах, усиленных композитными материалами, развивались под углом 30° к продольной оси элемента.

На рис. 4, а представлена схема усилий в сечении, наклонном к продольной оси элемента, при его расчете по прочности на действие попечерной силы.

Несущая способность элементов по прочности наклонного сечения на действие поперечной силы определяется по формуле

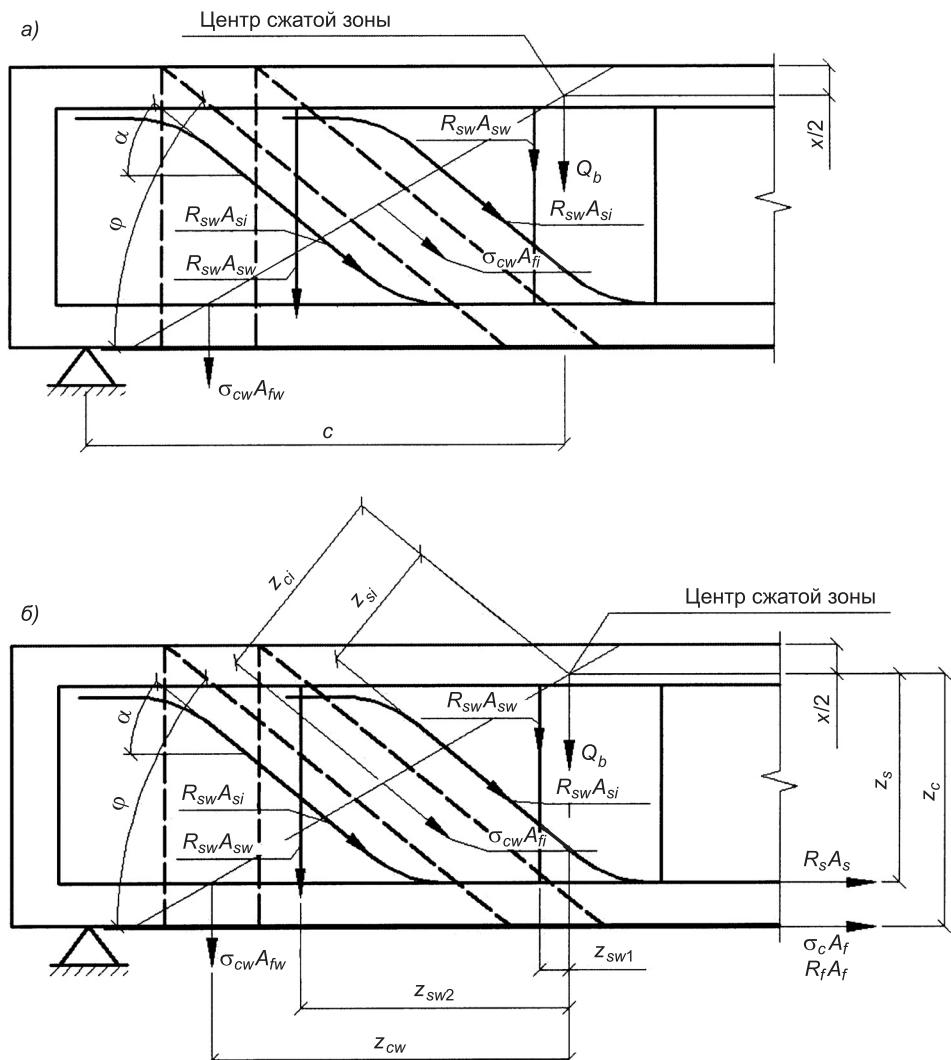


Рис. 4. Схема усилий в сечении, наклонном к продольной оси железобетонного элемента, усиленного композитным материалом, при расчете его по прочности на действие поперечной силы (а) и на действие изгибающего момента (б)

$$Q^y = \sum R_{sw} A_{si} \sin\alpha + \sum R_{sw} A_{sw} + Q_b + Q_w^r + \sum \sigma_c A_{fi} \sin\phi + \sum \sigma_c A_{fw}, \quad (15)$$

где

$$\sum R_{sw} A_{si} \sin\alpha, \sum R_{sw} A_{sw}, \sum \sigma_c A_{fi} \sin\phi \text{ и } \sum \sigma_c A_{fw}$$

— суммы проекций усилий всех пересекаемых отгибов, хомутов и композита соответственно при длине проекции сечения, не превышающей $2h_{0i}$;

R_{sw} — расчетное сопротивление арматуры растяжению с учетом коэффициента условий работы m_{a4} , определяемого по п. 3.40 [4];

σ_c — напряжение в композитном материале, определяемое по формуле (1) или (2).

Поперечное усилие, воспринимаемое бетоном сжатой зоны над концом наклонного сечения, определяется по формуле

$$Q_b = \frac{2R_{bt}bh_{0i}^2}{c} \leq mR_{bt}bh_{0i}, \quad (16)$$

где c — длина проекции наклонного сечения на продольную ось элемента, определяемая сравнительным расчетом согласно требованиям п. 3.79* [4];

m — коэффициент условий работы, равный

$$m = 1,3 + 0,4 \left(\frac{R_{b,sh}}{\tau_q} - 1 \right), \quad (17)$$

где $R_{b,sh}$ — расчетное сопротивление на скальвание при изгибе;

τ_q — наибольшее скальвающее напряжение от нормативной нагрузки.

Поперечное усилие, воспринимаемое горизонтальной арматурой, определяется по формуле

$$Q_w^r = 1000A_w^r K, \quad (18)$$

где A_w^r — площадь горизонтальной арматуры, см^2 , пересекаемой наклонным сечением под углом β , град.

Значение коэффициента K определяется условием

$$0 \leq \left(K = \frac{\beta - 50^\circ}{40^\circ} \right) \leq 1. \quad (19)$$

Расчет по прочности наклонного к продольной оси элемента сечения на действие момента. На рис. 4, б представлена схема усилий в сечении, наклонном к продольной оси элемента, при его расчете на действие изгибающего момента. Несущая способность элементов по прочности наклонного сечения на действие изгибающего момента определяется по формуле

$$M^y = R_s A_s z_s + \sum R_{sw} A_{sw} z_{sw} + \sum R_s A_{si} z_{si} + \sigma_c A_f z_c + \\ + \sum \sigma_c A_{fw} z_{cw} + \sum \sigma_c A_{fi} z_{ci}, \quad (20)$$

где $z_s, z_{sw}, z_{si}, z_c, z_{ci}$ и z_{cw} — расстояния от точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне бетона до усилий в рабочей арматуре, хомутах, отгибах, горизонтальном слое композитного материала, на-

клонных или вертикальных хомутах из композитного материала соответственно;

A_s , A_{sw} , A_{si} , A_f , A_{fi} и A_{fw} — площади горизонтальной арматуры, поперечной арматуры, отогнутой арматуры, волокон горизонтального слоя композитного материала, волокон наклонных и вертикальных хомутов из композитного материала, попадающие в сечение.

Для случая усиления элемента без разгрузки от собственного веса необходимо учитывать то обстоятельство, что элемент усиления оказывается не включен в работу на восприятие собственного веса конструкции и работает только на восприятие временной нагрузки. Очевидно, что эффективность работы усиления связана с долей усилия, возникающего в сечении под действием собственного веса, от общего момента, действующего в этом сечении ($M_p/(M_p + M_k)$). В предельном состоянии этот суммарный момент равен несущей способности сечения (M). На рис. 5 по горизонтальной оси отложен момент, возникающий в сечении от постоянных нагрузок, отнесенный к предельному моменту, который может воспринимать неусиленное сечение (M_p/M), а по вертикальной оси — момент, возникающий в сечении от временных нагрузок, отнесенный к тому же предельному моменту (M_k/M).

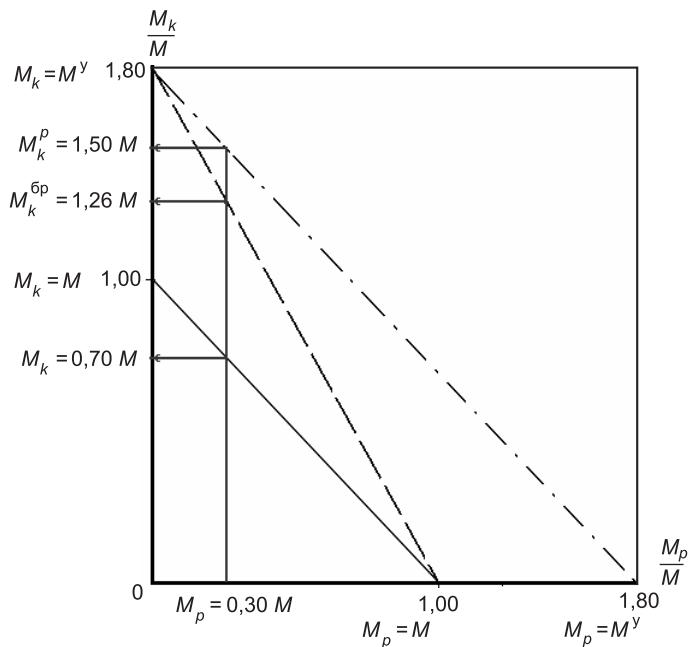


Рис. 5. К определению эффективности включения усиления в работу элемента

Сплошной линией на рис. 5 показано геометрическое место точек, характеризующих работу сечения в предельном состоянии для неусиленного элемента, в зависимости от соотношения величин постоянной M_p и временной M_k нагрузок. При величине момента, возникающего в сечении от постоянных нагрузок, равном 0,3 от его несущей способности ($M_p = 0,3M$), момент от временных нагрузок составит 0,7 от несущей способности сечения ($M_k = 0,7M$) в предельном состоянии ($M = M_p + M_k$). Штрихпунктирной линией показано геометрическое место точек, характеризующих работу сечения в предельном состоянии для элемента, усиленного на 80 % с разгрузкой от собственного веса, где M^y — несущая способность нормального сечения такого элемента по моменту.

Если доля собственного веса составляет незначительную часть (до 5 %) от суммарной нагрузки, воспринимаемой пролетом, то можно для расчетов несущей способности с небольшой долей погрешности использовать вышеприведенные формулы. Если доля собственного веса значима, то необходимо учитывать неэффективность работы композитного материала при усилении без разгрузки от собственного веса. С незначительной погрешностью, идущей в запас прочности, снижение эффективности материала усиления, связанного с таким способом производства работ, на рис. 5 показано штриховой линией.

При известной доле временной нагрузки до усиления (M_k / M) по следующей формуле может быть определена несущая способность сечения элемента, усиленного без разгрузки от собственного веса:

$$M^{y^b} = M + (M^y - M) \frac{M_k}{M}. \quad (21)$$

Например, для доли постоянных нагрузок в 30 %, а временных — соответственно 70 % и при увеличении несущей способности сечения на 80 % при усилении с разгрузкой от собственного веса по сравнению с несущей способностью неусиленного сечения увеличение несущей способности при таком же усилении, но без разгрузки от собственного веса составит 56 % (рис. 5).

По аналогичным формулам с заменой соответствующих усилий может быть уточнена несущая способность элементов, усиленных без разгрузки от собственного веса, для расчетов наклонного сечения по попечной силе, моменту и пр.

Учет коррозии стержней рабочей арматуры осуществляется путем введения в расчетные формулы фактической площади сечения стержней или относительного изменения площади сечения арматуры. При наличии участков с продольной арматурой, потерявшей сцепление с бетоном, рассчитывается сечение без учета выключенных из работы стержней. При расчете элементов с раковинами и сколами бетона в расчетные формулы высоты сжатой зоны и предельного момента необходимо ввести слагаемые, учитывающие ослабление сечения. При наличии трещин в бетоне, заходящих в сжатую зону, расчет несущей способности выполняется с учетом фактической и расчетной высот сжатой зоны бетона.

Для оценки погрешности методики, адаптированной к расчету железобетонных элементов, усиленных композитами, были определены расчетные значения несущей способности балок, испытанных в НИЛ «Мосты» СГУПС [2]. Конструкции усиления экспериментальных образцов приведены на рис. 6, а в табл. 1 приведены экспериментальные (P) и рас-

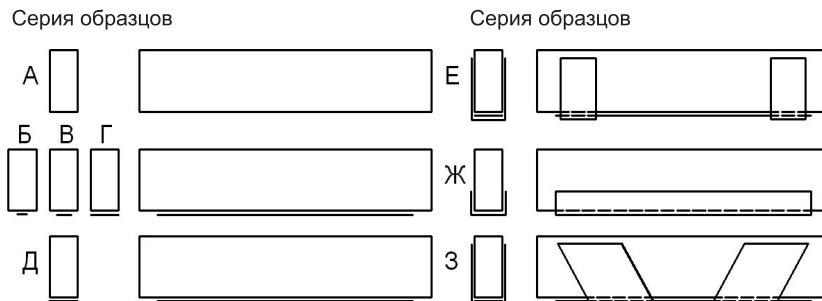


Рис. 6. Обозначения серий испытанных образцов

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные значения несущей способности балок

Серия	A_f , см ²	Несущая способность P , тс					Отклонение экспериментальных данных от результатов расчета, %	
		предлагаемая методика						
		M_1	M_2	Q_b	Q_q	M_q		
А	0,0000	6,43	—	28,77	35,89	17,01	7,03	8,53
Б	0,1465	9,02	—	28,77	21,79	10,92	9,55	5,55
В	0,2930	11,46	—	28,77	22,17	12,22	10,87	-5,43
Г	0,4395	13,75	—	28,77	22,56	13,44	13,03	-3,15
Д	0,8790	19,72	—	28,77	24,12	16,44	13,25	-24,08
Е	0,4395	—	14,46	28,77	39,15	27,11	13,29	-8,80
Ж	0,8790	19,01	—	28,77	24,12	15,53	15,44	-0,58
З	0,4395	—	14,46	28,77	47,43	22,83	14,07	2,27
						Среднее отклонение	-3,21	

Причина. A_f — площадь волокон композитного материала в середине пролета балок; P_{M_1} , P_{M_2} , P_{Q_b} , P_{Q_q} и P_{M_q} определены по формулам (3), (10), (15) и (20) соответственно.

четные (P_{M_1} , P_{M_2} , P_{Q_b} , P_{Q_q} , P_{M_q}) значения предельных вертикальных усилий на балки, определенные по каждому из пяти приведенных выше видов расчета нормального и наклонных сечений. Наименьшее значение вертикального усилия (выделено жирным шрифтом) определяет несущую способность балки в целом.

В работе [3] приведены данные исследования, обосновывающие возможность применения программного комплекса ANSYS, реализующего метод конечных элементов (МКЭ), при оценке несущей способности железобетонных изгибающихся элементов, усиленных композитными материалами. Для моделирования схем разрушения, не проявившихся при проведении экспериментальных исследований, был использован именно этот комплекс. Реализованная в нем схема нагружения образцов приведена на рис. 7.

В табл. 2 приведены значения несущей способности образцов, полученные в результате расчетов по предлагаемой методике и при моделировании методом конечных элементов.

Как видно из табл. 1 и 2, среднее отклонение расчетных значений несущей способности образцов, полученных по предлагаемой методике, от экспериментальных составляет 3,21 % и численного моделирования — 5,93 %. Сопоставляя полученные результаты расчетов с эксперименталь-

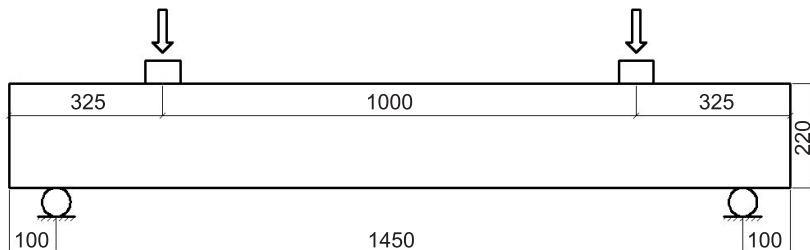


Рис. 7. Виртуальная схема нагружения образцов, реализованная при моделировании их разрушения МКЭ

Таблица 2

**Расчетные значения несущей способности балок
по предлагаемой методике и методу конечных элементов**

Серия	A_f , см ²	Несущая способность P , тс			МКЭ	Отклонение результатов расчета по МКЭ от ПМ, %		
		предлагаемая методика						
		Q_b	Q_q	M_q				
А	0,0000	28,77	35,89	17,01	16,5	-3,09		
Б	0,1465	28,77	40,50	21,04	19,54	-7,66		
В	0,2930	28,77	41,38	24,70	21,76	-13,53		
Г	0,4395	28,77	42,30	28,16	25,96	-8,47		
Д	0,8790	28,77	45,37	37,01	29,84	3,59		
Е	0,4395	28,77	70,97	55,25	25,72	-11,86		
Ж	0,8790	28,77	45,37	34,46	27,69	-3,90		
З	0,4395	28,77	42,30	28,16	27,48	-2,47		
Среднее отклонение						-5,93		

П р и м е ч а н и е. A_f — площадь волокон композитного материала в середине пролета балок; P_{Q_b} , P_{Q_q} и P_{M_q} — определены по формулам (10), (15) и (20) соответственно.

ными данными и численным моделированием, можно сделать вывод, что предлагаемая методика достаточно точно отражает действительную работу усиленных конструкций и может быть применена при выполнении инженерных расчетов железобетонных пролетных строений мостов, усиленных композитными материалами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. — Rome, 2004. — 144 р.
2. Бокарев, С.А. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами [Текст] / С.А. Бокарев, Д.Н. Смердов // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 2. — С. 112–124.
3. Бокарев, С.А. Нелинейный анализ железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных композитными материалами [Текст] / С.А. Бокарев, Д.Н. Смердов // Вест. ТГАСУ. — 2010. — № 2. — С. 113–125.
4. СНиП 2.05.03–84*. Мосты и трубы [Текст] / Минстрой России. — М. : ГП ЦПП, 1996. — 214 с.

БОКАРЕВ С.А., д-р техн. наук, проф.; E-mail: bokarevs@stu.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
СМЕРДОВ Д.Н., асп.; E-mail: smerdovdn@stu.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
НЕРОВНЫХ А.А., асп.; E-mail: alenero@yandex.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 22.10.10

Bokarev S.A., doctor of technical sciences, professor; E-mail: bokarevs@stu.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Smerdov D.N., post-graduate student; E-mail: smerdovdn@stu.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Nerovnyh A.A., post-graduate student; E-mail: alenero@yandex.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

THE METHOD OF AN CALCULATION BY STRENGTH SECTIONS EXPLOITATIONS REINFORCED CONCRETE SUPERSTRUCTURE FOR STRENGTHENING BY COMPOSITE MATERIALS

Relevant the method of an calculation, destination for projections reinforced concrete superstructure bridges, to adapted by calculations exploitations reinforced concrete superstructure bridges for strengthening by composite materials. Designed in the Siberian Transport University, take into account effectiveness works strength to variants methods productions works.

Key words: carbon fiber, composite material, bearing strength, finite element method, reinforced concrete element, stress-strain relationship.

REFERENCES

1. CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures [Text]. — Rome, 2004. — 144 p.
2. Bokarev, S.A. The experimental analysis of bending reinforced concrete elements for strengthening by composite materials [Text] / S.A. Bokarev, D.N. Smerdov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 2. — P. 112–124.
3. Bokarev, S.A. The nonlinear analysis of bending reinforced concrete constructions for strengthening by composite materials [Text] / S.A. Bokarev, D.N. Smerdov // Herald TGASU. — 2010. — N 2. — P. 113–125.
4. Building Code 2.05.03–84*. Bridges and pipes [Text]. — M. : Minstroy of the Russia, 1996. — 214 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ, Г.В. ГЛАДЫШЕВ,
П.В. ЧУБАРОВ

ДРОССЕЛЬНЫЕ ПНЕВМОУДАРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ПРОТОЧНЫМИ КАМЕРАМИ ПРИСОЕДИНЕННЫХ ОБЪЕМОВ С РАЗДЕЛЬНЫМ ВПУСКОМ СЕТЕВОГО ВОЗДУХА

Рассматриваются принципиальные схемы и физико-математические модели дроссельных пневмоударных механизмов с управляемыми проточными камерами присоединенных объемов с раздельным впуском сетевого воздуха со стороны камеры рабочего и холостого хода.

Ключевые слова: пневмоударный механизм, ударник, управляемая проточная камера присоединенного объема, предкамера, сжатый воздух, выпуск, камера рабочего хода, камера холостого хода.

Схема дроссельного пневмоударного механизма (ДПУМ) с управляемыми проточными камерами присоединенных объемов с раздельным впуском сетевого воздуха со стороны рабочего и холостого хода изображена на рис. 1.

Рассмотрим процесс распределения воздуха в пневмоударном механизме. Впуск сетевого сжатого воздуха происходит через выпускные каналы 11 и 13. Предкамеры 10 и 12 выполняют функцию ресивера для накопления сжатого воздуха и сглаживания импульсов подачи сжатого воздуха. Предкамеры разделены между собой жесткими сплошными перегородками и в процессе работы ДПУМ не сообщаются друг с другом.

Из предкамеры 10 сжатый воздух через дроссельный калибранный канал 9 поступает в управляемую проточную камеру 7, которая сообщается с камерой 5 рабочего хода через фигурный перепускной канал 8 в случае, когда этот канал не перекрыт боковой поверхностью ударника.

Из основной предкамеры 12 сжатый воздух через выпускной канал 16 поступает в камеру рабочего хода, затем в управляемую проточную камеру 19 присоединенного объема. Сжатый воздух из предкамеры 12 поступает в камеру холостого хода через выпускной канал 14 и канал запуска 20.

При осуществлении холостого хода ударником, когда последний под давлением воздуха начинает движение в сторону предкамеры 12, камера рабочего хода сообщается с атмосферой через выпускной канал 4. Воздух под давлением поступает в камеру 2 холостого хода одновременно из предкамеры 12 через каналы 14 и 20 и в управляемую проточную камеру 19 присоединенного объема через каналы 16 и 17. Импульс давлений воздуха камеры холостого хода возрастает и, достигнув определенного значения, обеспечивает начальное движение ударника в сторону предкамеры 12. При этом фигурный перепускной канал 18 открывается последо-

вательно при перемещении ударника в сторону предкамеры 12. При движении ударник своей боковой поверхностью открывает выпускной канал 4. В данный момент камера холостого хода сообщается с атмосферой и давление в последней начинает постепенно уменьшаться. Когда ударник окажется в крайней точке своего движения при холостом ходе, он своей боковой поверхностью полностью закроет фигурный перепускной канал 8. Начинается рабочий ход.

При осуществлении рабочего хода ударником, когда последний ускорено движется в сторону рабочего инструмента, камера холостого хода сообщается с атмосферой через выпускной канал 4. Воздух под давлением поступает по каналу 15 в камеру рабочего хода и одновременно из предкамеры 10 через выпускной канал 9 и управляемую проточную камеру 7 присоединенного объема рабочего хода и далее через канал 8, который открывается последовательно в соответствии с перемещением ударника в камеру рабочего хода. Разница импульсов давлений между камерами рабочего и холостого хода возрастает. Ударник, преодолевая со противление импульса давления со стороны камеры холостого хода, ускорено движется в сторону рабочего инструмента. Достигая хвостовика рабочего инструмента, ударник своей боковой поверхностью постепенно закрывает фигурный перепускной канал 18 камеры холостого хода. Закрыв его полностью, ударник передает свою кинетическую энергию рабочему инструменту. После соударения с рабочим инструментом ударник отскакивает от него. Под действием импульса отскока и давления воздуха со стороны камеры холостого хода ударник начинает движение в сторону камеры рабочего хода. Начинается холостой ход ударника.

Рассмотрим физико-математическую модель ДПУМ (рис. 1 и 2) с управляемыми проточными камерами присоединенных объемов с впуском сетевого воздуха со стороны камер рабочего и холостого хода в виде бародинамического описания.

Приведем обозначения параметров бародинамических функций, участвующих в процессе функционирования средств стабилизации параметров энергоносителя:

p_0, p_p, p_x — давление воздуха соответственно в сетевой камере (в сети сжатого воздуха), камерах рабочего и холостого хода;

p_{pr}, p_{px}, p_{pp} — давление воздуха в предкамерах со стороны рабочего и холостого хода ударника, а также в основной предкамере соответственно;

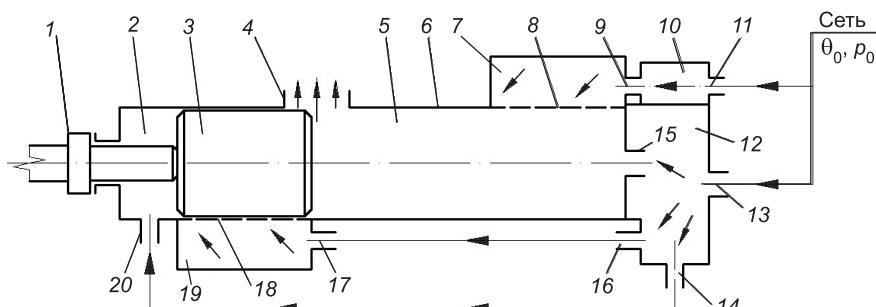


Рис. 1. Схема ДПУМ с управляемыми проточными камерами присоединенных объемов со стороны рабочего и холостого хода

1 — рабочий инструмент; 2 — камера холостого хода; 3 — ударник; 4 — выпускной канал; 5 — камера рабочего хода; 6 — цилиндр; 7 — управляемая проточная камера присоединенного объема; 8 и 18 — фигурные перепускные каналы; 9 — дроссельный калибратор; 10 — предкамера рабочего хода; 12 — предкамера; 11, 13, 15 и 17 — впускные каналы предкамеры; 14 и 16 — выпускные каналы; 19 — управляемая проточная камера присоединенного объема; 20 — канал запуска камеры холостого хода

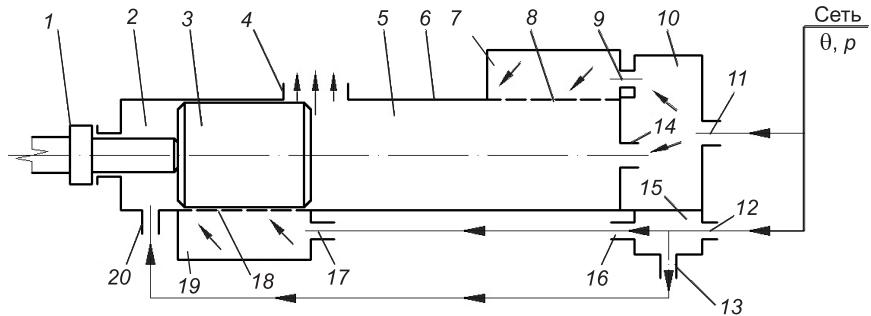


Рис. 2. Схема ДПУМ с управляемыми проточными камерами присоединенных объемов со стороны рабочего и холостого хода

1 — рабочий инструмент; 2 — камера холостого хода; 3 — ударник; 4 — выпускной канал; 5 — камера рабочего хода; 6 — цилиндр; 7 — управляемая проточная камера присоединенного объема; 8 и 18 — фигурные перепускные каналы; 9 — дроссельный калиброванный канал; 10 — предкамера рабочего хода; 11, 12, 14, 17 — впускные каналы предкамеры; 13 и 16 — выпускные каналы; 15 — предкамера холостого хода; 19 — управляемая проточная камера присоединенного объема; 20 — канал запуска камеры холостого хода

$p_{\text{дру}}$, $p_{\text{дху}}$, $p_{\text{зр}}$, $p_{\text{зх}}$ — давление воздуха в управляемых проточных камерах присоединенных объемов и канале запуска.

Функции сечений каналов:

$\omega_{\text{рпп}}$, $\omega_{\text{хпх}}$, $\omega_{\text{друпр}}$, $\omega_{\text{друпп}}$, $\omega_{\text{дхупп}}$, $\omega_{\text{зрпп}}$, $\omega_{\text{зхпп}}$, $\omega_{\text{зхпх}}$ — проходные сечения каналов впуска из предкамер в управляемые проточные камеры присоединенных объемов рабочего и холостого хода и канала запуска при $\omega_{\text{зрпп}} \equiv \omega_{\text{рпп}}$, $\omega_{\text{зхпп}} \equiv \omega_{\text{пхзх}}$;

$\omega_{\text{ппр}}$, $\omega_{\text{пхх}}$, $\omega_{\text{пдрд}}$, $\omega_{\text{ппдру}}$, $\omega_{\text{пхдху}}$, $\omega_{\text{ппзр}}$, $\omega_{\text{ппзх}}$ — проходные сечения каналов перетечек в предкамеры из управляемых проточных камер присоединенных объемов рабочего и холостого хода и канала запуска при $\omega_{\text{ппзр}} \equiv \omega_{\text{ппр}}$, $\omega_{\text{пхзх}} \equiv \omega_{\text{зхпх}}$;

$\omega_{\text{пп0}}$, $\omega_{\text{пр0}}$, $\omega_{\text{пх0}}$ — проходные сечения канала впуска из сети в предкамеры (основную, рабочего и холостого хода);

$\omega_{\text{опр}}$, $\omega_{\text{опх}}$, $\omega_{\text{опп}}$ — проходные сечения каналов перетечек воздуха в сеть из предкамер;

$\omega_{\text{ар}}$, $\omega_{\text{ах}}$, $\omega_{\text{па}}$, $\omega_{\text{ха}}$ — проходные сечения каналов выпуска отработавшего воздуха из камер рабочего и холостого хода в атмосферу (окружающее пространство) и обратных перетечек из атмосферы (окружающего пространства) в камеры рабочего и холостого хода;

$\Phi_{\text{опп}}$, $\Phi_{\text{опр}}$, $\Phi_{\text{опх}}$ — бародинамические функции для каналов перетечек из предкамер в сеть;

$\Phi_{\text{рпп}}$, $\Phi_{\text{хпх}}$, $\Phi_{\text{друпр}}$, $\Phi_{\text{друпп}}$, $\Phi_{\text{дхупп}}$, $\Phi_{\text{зрпп}}$, $\Phi_{\text{зхпп}}$, $\Phi_{\text{зхпх}}$ — бародинамические функции для каналов впуска из предкамер в управляемые проточные камеры присоединенных объемов рабочего и холостого хода и канала запуска при $\Phi_{\text{зрпп}} \equiv \Phi_{\text{рпп}}$, $\Phi_{\text{зхпп}} \equiv \Phi_{\text{пхзх}}$;

$\Phi_{\text{ппр}}$, $\Phi_{\text{пхх}}$, $\Phi_{\text{пдрд}}$, $\Phi_{\text{ппдру}}$, $\Phi_{\text{пхдху}}$, $\Phi_{\text{ппзр}}$, $\Phi_{\text{пхзх}}$ — бародинамические функции для каналов перетечек в предкамеры из управляемых проточных камер присоединенных объемов рабочего и холостого хода и канала запуска при $\Phi_{\text{ппзр}} \equiv \Phi_{\text{ппр}}$, $\Phi_{\text{пхзх}} \equiv \Phi_{\text{зхпх}}$;

$\Phi_{\text{ар}}$, $\Phi_{\text{ах}}$, $\Phi_{\text{па}}$, $\Phi_{\text{ха}}$ — бародинамические функции для каналов выпуска из камер рабочего и холостого хода в атмосферу и перетечек из атмосферы в эти камеры;

$\Phi_{\text{пп0}}$, $\Phi_{\text{пр0}}$, $\Phi_{\text{пх0}}$ — бародинамические функции каналов впуска в предкамеры из сети;

$V_{\text{пр}}$, $V_{\text{пх}}$, $V_{\text{пп}}$, V_p , V_x , $V_{\text{дру}}$, $V_{\text{дху}}$, $V_{\text{зрп}}$, $V_{\text{зхп}}$ — соответственно объемы предкамер и управляемых проточных камер присоединенных объемов рабочего и холостого хода и канала запуска.

$$W = \sqrt{\frac{2kR}{k-1}}, \quad (1)$$

где k — показатель баро- и термодинамического процесса; R — газовая постоянная.

Кроме того, в физико-математическом описании работы ДПУМ использовались следующие обозначения: t, dt — время и его производная; S_y и x_y — площадь диаметрального сечения и ход ударника; $\omega_i(x_y), \varphi_i$ — функции, зависящие от положения ударника. Уравнения движения ударника здесь опущены, поскольку широко известны (см., например в [1]).

Применив классификацию признаков [2] для средств стабилизации параметров энергоносителя, уравнения изменения температуры воздуха для предкамер, камер рабочего и холостого хода с учетом средств формирования силового импульса, а также возможных перетечек между камерами для схемы на рис. 1 запишем в виде цепочек.

Цепочка для предкамер 10, 12:

$$\begin{aligned} \frac{dp_{np}}{dt} = & \frac{k}{V_{np}} [W(\omega_{npo}\varphi_{np0} - \omega_{drupnp}\varphi_{drupnp} + \\ & + \operatorname{sgn}(\omega_{0np}\varphi_{0np}) + \operatorname{sgn}(\omega_{prdrp}\varphi_{prdrp}))]; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_{nn}}{dt} = & \frac{k}{V_{nn}} [W(\omega_{nn0}\varphi_{nn0} - \omega_{prpp}\varphi_{prpp} - \omega_{dchupp}\varphi_{dchupp} - \omega_{zchpp}\varphi_{zchpp} + \\ & + \operatorname{sgn}(\omega_{npp}\varphi_{npp}) + \operatorname{sgn}(\omega_{0nn}\varphi_{0nn}))]. \end{aligned} \quad (3)$$

Цепочка для камер 5, 2:

$$\begin{aligned} \frac{dp_p}{dt} = & \frac{k}{V_p - x_y S_y} \left[W(\omega_{ppn}\varphi_{ppn} - \omega_{ap}\varphi_{ap} + \omega_{prdy}(x_y)\varphi_{prdy} + \right. \\ & \left. + \operatorname{sgn}(\omega_{npp}\varphi_{npp}) + \operatorname{sgn}(\omega_{pa}\varphi_{pa}) + \operatorname{sgn}(\omega_{drup}(x_y)\varphi_{drup})) + p_p \frac{dx_y}{dt} S_y \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_x}{dt} = & \frac{k}{V_x + x_y S_y} \left[W(\omega_{zchpp}\varphi_{zchpp} - \omega_{ax}\varphi_{ax} + \omega_{xdxy}(x_y)\varphi_{xdxy} + \right. \\ & \left. + \operatorname{sgn}(\omega_{ppx}\varphi_{ppx}) + \operatorname{sgn}(\omega_{xa}\varphi_{xa}) + \operatorname{sgn}(\omega_{dchux}(x_y)\varphi_{dchux})) - p_p \frac{dx_y}{dt} S_y \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Цепочка для управляемых проточных камер 7, 19:

$$\begin{aligned} \frac{dp_{dry}}{dt} = & \frac{k}{V_{dry}} [W(\omega_{drupnp}\varphi_{drupnp} - \omega_{prdry}(x_y)\varphi_{prdry} + \\ & + \operatorname{sgn}(\omega_{prdry}\varphi_{prdry}) + \operatorname{sgn}(\omega_{drup}(x_y)\varphi_{drup}))]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_{dxy}}{dt} = & \frac{k}{V_{dxy}} [W(\omega_{dchupp}\varphi_{dchupp} - \omega_{xdxy}(x_y)\varphi_{xdxy} + \\ & + \operatorname{sgn}(\omega_{pdxy}\varphi_{pdxy}) + \operatorname{sgn}(\omega_{dchux}(x_y)\varphi_{dchux}))]. \end{aligned} \quad (7)$$

В этом случае при $\omega_{dry} \neq \text{const}$, $\omega_{dxy} \neq \text{const}$ и $\omega_{dry} \geq \omega_{ap}$, $\omega_{dxy} \geq \omega_{ax}$ изменение давления воздуха в камерах определяется с учетом $\omega_{dry} \equiv \omega_{dry}(x_y)$ и $\omega_{dxy} \equiv \omega_{dxy}(x_y)$. В конце выпуска отработавшего воздуха из ка-

мер давление воздуха в них выравнивается. Если этого не происходит при $p_{\text{дру}} > p_p$ и $p_{\text{дху}} > p_x$, то управляемые проточными камеры присоединенных объемов функционально становятся камерами задержки.

В случае $p_{\text{дру}} \geq p_p$ и $p_{\text{дху}} \geq p_x$ при $\omega_{\text{дру}} \equiv \omega_{\text{дру}}(x_y)$ и $\omega_{\text{дху}} \equiv \omega_{\text{дху}}(x_y)$ текущий расход воздуха при перетечках между камерами, а следовательно, и текущее давление воздуха в камерах будут зависеть от геометрической формы фигурных перепускных каналов и перепада давлений воздуха в рабочих камерах.

Для управляемых проточных камер присоединенных объемов изменение давления (p_1, p_2) воздуха будет следовать изменению его плотности (ρ_1, ρ_2):

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (8)$$

Здесь индексы «1» и «2» указывают направление впуска воздуха «откуда куда».

Как указывалось в [3, 4], имеет место $\omega_{\text{дру}}(x_y) \varphi_{\text{дру}}$. Кроме того, отмечается незначительное запаздывание перетекания: при рабочем ходе ударника из камеры 7 в камеру 5 следует $p_p \geq p_{\text{дру}}$. В случае рабочего хода ударника при $\omega_{\text{дху}}(x_y) \varphi_{\text{дху}}$ и перетекании воздуха из камеры 2 в камеру 19 усиливается зависимость $p_{\text{дху}} \geq p_x$.

Периодичность силовых импульсов обеспечивается средствами управления впуском в камеры, а также выпуском из них.

Чтобы учесть изменение температуры воздуха в камерах ДПУМ, вводятся обозначения баро- и термодинамических параметров:

$\theta_0, \theta_p, \theta_x$ — температура воздуха соответственно в сети сжатого воздуха, камерах рабочего и холостого хода ударника;

$\theta_{\text{пп}}, \theta_{\text{пр}}, \theta_{\text{пх}}$ — температура воздуха в предкамерах — основной и со стороны рабочего и холостого хода;

$\theta_{\text{дру}}, \theta_{\text{дху}}, \theta_{\text{зрпп}}, \theta_{\text{зхпх}}, \theta_{\text{зхпп}}$ — температура воздуха в предкамерах управляемых проточных камер присоединенных объемов и канале запуска при $\theta_{\text{зрпп}} \equiv \theta_{\text{ппзр}}, \theta_{\text{зхпх}} \equiv \theta_{\text{пхзх}}$;

$\Omega_{\text{рпп}}, \Omega_{\text{хпх}}, \Omega_{\text{друпп}}, \Omega_{\text{дхупх}}, \Omega_{\text{зрпп}}, \Omega_{\text{зхпх}}$ — термодинамические функции для каналов впуска из предкамер в камеры присоединенных объемов рабочего и холостого хода и канала запуска при $\Omega_{\text{зрпп}} \equiv \Omega_{\text{рпп}}, \Omega_{\text{зхпх}} \equiv \Omega_{\text{пхзх}} \equiv \Omega_{\text{хпх}}$;

$\Omega_{\text{ппр}}, \Omega_{\text{пхп}}, \Omega_{\text{пхх}}, \Omega_{\text{пдр}}, \Omega_{\text{пхдху}}, \Omega_{\text{ппзр}}, \Omega_{\text{пхзх}}, \Omega_{\text{ппзх}}$ — термодинамические функции для каналов перетечек из камер присоединенных объемов рабочего и холостого хода и канала запуска при $\Omega_{\text{ппзр}} \equiv \Omega_{\text{ппр}}, \Omega_{\text{пхзх}} \equiv \Omega_{\text{зхпх}} \equiv \Omega_{\text{пхх}}$;

$\Omega_{\text{пп0}}, \Omega_{\text{пр0}}, \Omega_{\text{пх0}}$ — термодинамические функции для каналов впуска из сети в предкамеры (основную, рабочего и холостого хода);

$\Omega_{\text{0пп}}, \Omega_{\text{0пр}}, \Omega_{\text{0пх}}$ — термодинамические функции для каналов перетечек воздуха из предкамер в сеть;

$\Omega_{\text{ap}}, \Omega_{\text{ax}}, \Omega_{\text{pa}}, \Omega_{\text{xa}}$ — термодинамические функции для каналов выпуска из камер рабочего и холостого хода в атмосферу и обратных перетечек из атмосферы в эти камеры.

Применив классификацию признаков [2] для средств стабилизации параметров энергоносителя, уравнения изменения температуры воздуха для предкамер, камер рабочего и холостого хода с учетом средств форми-

рования силового импульса, а также возможных перетечек между камераами для схемы на рис. 1 запишем в виде цепочек.

Цепочка для предкамер 10 и 12:

$$\frac{d\theta_{\text{пп}}}{dt} = \frac{\theta_{\text{пп}}}{V_{\text{пп}} p_{\text{пп}}} [W(\omega_{\text{пп0}} \varphi_{\text{пп0}} \Omega_{\text{пп0}} - \omega_{\text{друп}} \varphi_{\text{друп}} \Omega_{\text{друп}} + \text{sgn}(\omega_{\text{0пп}} \varphi_{\text{0пп}} \Omega_{\text{0пп}}) + \text{sgn}(\omega_{\text{предр}} \varphi_{\text{предр}} \Omega_{\text{предр}}))]; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_{\text{пп}}}{dt} &= \frac{\theta_{\text{пп}}}{V_{\text{пп}} p_{\text{пп}}} [W(\omega_{\text{пп0}} \varphi_{\text{пп0}} \Omega_{\text{пп0}} - \omega_{\text{ппп}} \varphi_{\text{ппп}} \Omega_{\text{ппп}} + \\ &+ \text{sgn}(\omega_{\text{пндху}} \varphi_{\text{пндху}} \Omega_{\text{пндху}}) - \omega_{\text{дхупп}} \varphi_{\text{дхупп}} \Omega_{\text{дхупп}} + \text{sgn}(\omega_{\text{ппзх}} \varphi_{\text{ппзх}} \Omega_{\text{ппзх}}) - \\ &- \omega_{\text{зхпп}} \varphi_{\text{зхпп}} \Omega_{\text{зхпп}} + \text{sgn}(\omega_{\text{0пп}} \varphi_{\text{0пп}} \Omega_{\text{0пп}}) + \text{sgn}(\omega_{\text{ппп}} \varphi_{\text{ппп}} \Omega_{\text{ппп}}))]; \end{aligned} \quad (10)$$

Цепочка для камер 5 и 2:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_p}{dt} &= \frac{\theta_p}{V_p p_p} \left[W(\omega_{\text{ппп}} \varphi_{\text{ппп}} \Omega_{\text{ппп}} - \omega_{\text{ап}} \varphi_{\text{ап}} \Omega_{\text{ап}} + \right. \\ &+ \omega_{\text{пдр}}(x_y) \varphi_{\text{пдр}} \Omega_{\text{пдр}} + \text{sgn}(\omega_{\text{ппр}} \varphi_{\text{ппр}} \Omega_{\text{ппр}}) + \text{sgn}(\omega_{\text{па}} \varphi_{\text{па}} \Omega_{\text{па}}) + \\ &\left. + \text{sgn}(\omega_{\text{друп}}(x_y) \varphi_{\text{друп}} \Omega_{\text{друп}})) + (k-1) p_p \frac{dx_y}{dt} S_y \right]; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_x}{dt} &= \frac{\theta_x}{V_x p_x} \left[W(\omega_{\text{зхпп}} \varphi_{\text{зхпп}} \Omega_{\text{зхпп}} - \omega_{\text{ax}} \varphi_{\text{ax}} \Omega_{\text{ax}} + \right. \\ &+ \omega_{\text{хдху}}(x_y) \varphi_{\text{хдху}} \Omega_{\text{хдху}} + \text{sgn}(\omega_{\text{ппзх}} \varphi_{\text{ппзх}} \Omega_{\text{ппзх}}) + \text{sgn}(\omega_{\text{xa}} \varphi_{\text{xa}} \Omega_{\text{xa}}) + \\ &\left. + \text{sgn}(\omega_{\text{дхух}}(x_y) \varphi_{\text{дхух}} \Omega_{\text{дхух}})) - (k-1) p_x \frac{dx_y}{dt} S_y \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Цепочка для управляемых проточных камер 7 и 19:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_{\text{пдр}}}{dt} &= \frac{\theta_{\text{пдр}}}{V_{\text{пдр}} p_{\text{пдр}}} [W(\omega_{\text{друп}} \varphi_{\text{друп}} \Omega_{\text{друп}} - \omega_{\text{пдр}}(x_y) \varphi_{\text{пдр}} \Omega_{\text{пдр}} + \\ &+ \text{sgn}(\omega_{\text{предр}} \varphi_{\text{предр}} \Omega_{\text{предр}}) + \text{sgn}(\omega_{\text{друп}}(x_y) \varphi_{\text{друп}} \Omega_{\text{друп}}))]; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_{\text{дху}}}{dt} &= \frac{\theta_{\text{дху}}}{V_{\text{дху}} p_{\text{дху}}} [W(\omega_{\text{дхупп}} \varphi_{\text{дхупп}} \Omega_{\text{дхупп}} - \omega_{\text{хдху}}(x_y) \varphi_{\text{хдху}} \Omega_{\text{хдху}} + \\ &+ \text{sgn}(\omega_{\text{пндху}} \varphi_{\text{пндху}} \Omega_{\text{пндху}}) + \text{sgn}(\omega_{\text{дхух}}(x_y) \varphi_{\text{дхух}} \Omega_{\text{дхух}}))]. \end{aligned} \quad (14)$$

В управляемых проточных камерах присоединенных объемов, сооб- щенных с камерами рабочего и холостого хода, при $\omega_{\text{пдр}} \neq \text{const}$ и $\omega_{\text{дху}} \neq \text{const}$ в случае, когда $\omega_{\text{пдр}} \geq \omega_{\text{ап}}$ и $\omega_{\text{дху}} \geq \omega_{\text{ax}}$, изменение давления воздуха определяется с учетом $\omega_{\text{пдр}} \equiv \omega_{\text{пдр}}(x_y)$ и $\omega_{\text{дху}} \equiv \omega_{\text{дху}}(x_y)$. В конце выпуска отработавшего воздуха из камер давление воздуха в них выравнивается. Если этого не происходит при $p_{\text{пдр}} > p_p$, $p_{\text{дху}} > p_x$ и $\theta_{\text{пдр}} > \theta_p$, $\theta_{\text{дху}} > \theta_x$, то управляемые проточные камеры присоединенных объемов функционально становятся камерами задержки.

В случае $p_{\text{пдр}} \geq p_p$, $p_{\text{дху}} \geq p_x$ и $\theta_{\text{пдр}} \geq \theta_p$, $\theta_{\text{дху}} \geq \theta_x$ при $\omega_{\text{пдр}} \equiv \omega_{\text{пдр}}(x_y)$ и $\omega_{\text{дху}} \equiv \omega_{\text{дху}}(x_y)$ текущий расход воздуха при перетечках между камерами, а следовательно, и текущее давление воздуха в камерах будут зависеть от

геометрической формы фигурных каналов перетечек и перепада давлений воздуха в рабочих камерах.

Для управляемых проточных камер присоединенных объемов изменение температуры (θ_1, θ_2) воздуха будет следовать тенденции изменения давления (p_1, p_2):

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\theta_2}{\theta_1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (15)$$

Здесь индексы «1», «2» указывают направление впуска воздуха «откуда куда».

Как указывалось в [3, 4], имеет место $\omega_{\text{дру}}(x_y)\phi_{\text{дру}}\Omega_{\text{дру}}$. Кроме того, отмечается незначительное запаздывание перетекания: при рабочем ходе ударника из камеры 7 в камеру 5 следует $p_p \geq p_{\text{дру}}$ и $\theta_p \leq \theta_{\text{дру}}$. При $\omega_{\text{дху}}(x_y)\phi_{\text{дху}}\Omega_{\text{дху}}$ и перетекании воздуха при рабочем ходе ударника из камеры 2 в камеру 19 усиливается зависимость $p_x \leq p_{\text{дху}}$ и $\theta_x \leq p_x \leq p_{\text{дху}}$.

Периодичность силовых импульсов обеспечивается средствами управления впуском в камеры, а также выпуском из них. Поддержание рабочего процесса с теми или иными качествами осуществляется средствами управления надувом и задержкой, увязанными функциями $\omega_i, \phi_i, \Omega_i$ и перемещениями ударника, которые известны (см., например, [1]), и их запись здесь опущена.

Схема ДПУМ с проточными управляемыми камерами присоединенных объемов с раздельным впуском сетевого воздуха со стороны холостого хода изображена на рис. 2.

Рассмотрим процесс распределения воздуха в пневмоударном механизме. Сетевой сжатый воздух поступает через впускной канал 11 в предкамеру 10 и через впускной канал 12 в предкамеру 15 холостого хода. При этом обе предкамеры выполняют функцию ресивера для накопления сжатого воздуха и сглаживания импульсов подачи сжатого воздуха. Предкамеры разделены между собой жесткими сплошными перегородками и в процессе работы ДПУМ не сообщаются друг с другом.

Из основной предкамеры 10 сжатый воздух через дроссельный калибраторенный канал 9 поступает в управляемую проточную камеру 7 присоединенного объема со стороны камеры рабочего хода, а в камеру рабочего хода — через впускной канал 14. Камера 7 сообщается с камерой рабочего хода через фигурный перепускной канал 8 в случае, когда этот канал не перекрыт боковой поверхностью ударника.

Предкамера 15 холостого хода имеет два выпускных канала сетевого воздуха в систему ДПУМ: 16 и 13. Через канал 16 воздух проходит в управляемую проточную камеру 19 со стороны холостого хода. Через канал 13 воздух поступает в камеру 2. Камера 19 сообщается с камерой 2 через фигурный перепускной канал 18 в случае, когда он не перекрыт боковой поверхностью ударника. Предкамера 15 обеспечивает холостой ход ударника.

При осуществлении холостого хода ударником, когда последний под давлением воздуха начинает движение в сторону предкамеры 10, камера рабочего хода сообщается с атмосферой через выпускной канал 4. Воздух под давлением поступает в камеру холостого хода одновременно из предкамеры 15, через выпускные каналы 13 и 16 и канал запуска камеры холостого хода; затем в управляемую проточную камеру 19 через канал 17. Импульс давлений воздуха в камере холостого хода возрастает и, достигнув определенного значения, обеспечивает начальное движение ударника в сторону

предкамеры 10. При этом перепускной канал 18 открывается последовательно при перемещении ударника. При движении ударник своей боковой поверхностью открывает выпускной канал 4. В данный момент камера холостого хода сообщается с атмосферой и давление в последней начинает постепенно уменьшаться. Когда ударник окажется в крайней точке своего движения при холостом ходе, он своей боковой поверхностью полностью закроет перепускной канал 8. Начинается рабочий ход.

При осуществлении рабочего хода ударником, когда последний ускорено движется в сторону рабочего инструмента, камера холостого хода сообщается с атмосферой через выпускной канал 4. Воздух под давлением поступает в камеру рабочего хода одновременно из предкамеры 10, через выпускной канал 14 предкамеры 10 и управляемую проточную камеру 7 присоединенного объема рабочего хода и далее через перепускные каналы 8, которые открываются последовательно в соответствии с перемещением ударника в сторону рабочего инструмента при совершении рабочего хода. Разница импульсов давлений между камерой рабочего хода и камерой холостого хода возрастает. Ударник, преодолевая сопротивление импульса давления со стороны камеры холостого хода, ускорено движется в сторону рабочего инструмента. Достигая хвостовика рабочего инструмента, ударник своей боковой поверхностью постепенно закрывает перепускной канал 18 камеры холостого хода. Закрыв его полностью, ударник передает свою кинетическую энергию рабочему инструменту. После соударения с рабочим инструментом ударник отскакивает от него. Под действием импульса отскока и давления воздуха со стороны камеры холостого хода ударник начинает движение в сторону камеры рабочего хода. Начинается холостой ход ударника.

Рассмотрим физико-математическую модель ДПУМ с проточными управляемыми камерами присоединенных объемов с впуском сетевого воздуха со стороны холостого хода в виде баро- и термодинамического описания. При принятых для схемы на рис. 2 обозначениях для параметров баро- и термодинамических функций, участвующих в процессе функционирования средств стабилизации параметров, уравнения запишем в виде цепочек.

Цепочка для предкамер 10 и 15:

$$\frac{dp_{\text{пп}}}{dt} = \frac{k}{V_{\text{пп}}} [W(\omega_{\text{пп}0}\varphi_{\text{пп}0} - \omega_{\text{пп}}\varphi_{\text{пп}} - \omega_{\text{друпп}}\varphi_{\text{друпп}} + sgn(\omega_{\text{пп}дру}\varphi_{\text{пп}дру}) + sgn(\omega_{0\text{пп}}\varphi_{0\text{пп}}) + sgn(\omega_{\text{пп}р}\varphi_{\text{пп}р}))]; \quad (16)$$

$$\frac{dp_{\text{пх}}}{dt} = \frac{k}{V_{\text{пх}}} [W(\omega_{\text{пх}0}\varphi_{\text{пх}0} - \omega_{\text{дхупх}}\varphi_{\text{дхупх}} - \omega_{\text{зхпх}}\varphi_{\text{зхпх}} + sgn(\omega_{0\text{пх}}\varphi_{0\text{пх}}) + sgn(\omega_{\text{пх}дх}\varphi_{\text{пх}дх}) + sgn(\omega_{\text{пх}зх}\varphi_{\text{пх}зх}))]. \quad (17)$$

Цепочка для камеры 5 рабочего хода ударника, которая сообщается с предкамерой 10 дросселем запуска 14, записывается для изменения давления воздуха аналогично (4).

Изменение давления воздуха в камере холостого хода:

$$\begin{aligned} \frac{dp_x}{dt} = & \frac{k}{V_x - x_y S_y} \left[W(\omega_{\text{зхпх}}\varphi_{\text{зхпх}} - \omega_{\text{ax}}\varphi_{\text{ax}} + \right. \\ & + \omega_{\text{хдху}}(x_y)\varphi_{\text{хдху}} + sgn(\omega_{\text{пп}зх}}\varphi_{\text{пп}зх}) + sgn(\omega_{\text{xa}}\varphi_{\text{xa}}) + \\ & \left. + sgn(\omega_{\text{дхух}}(x_y)\varphi_{\text{дхух}})) - p_x \frac{dx_y}{dt} S_y \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Цепочка для управляемых проточных камер 7 и 19 при возможных перетечках:

$$\frac{dp_{\text{dry}}}{dt} = \frac{k}{V_{\text{dry}}} [W(\omega_{\text{drypp}} \varphi_{\text{drypp}} - \omega_{\text{dry}}(x_y) \varphi_{\text{dry}} + + \operatorname{sgn}(\omega_{\text{drypp}} \varphi_{\text{drypp}}) + \operatorname{sgn}(\omega_{\text{dry}}(x_y) \varphi_{\text{dry}}))]; \quad (19)$$

$$\frac{dp_{\text{dxy}}}{dt} = \frac{k}{V_{\text{dxy}}} [W(\omega_{\text{dxyph}} \varphi_{\text{dxyph}} - \omega_{\text{dxy}}(x_y) \varphi_{\text{dxy}} + + \operatorname{sgn}(\omega_{\text{dxyph}} \varphi_{\text{dxyph}}) + \operatorname{sgn}(\omega_{\text{dxy}}(x_y) \varphi_{\text{dxy}}))]. \quad (20)$$

В управляемых проточных камерах 7 и 19 присоединенных объемов, которые сообщаются с камерами рабочего и холостого хода, при $\omega_{\text{dry}} \neq \text{const}$ и $\omega_{\text{dxy}} \neq \text{const}$ и в случае $\omega_{\text{dry}} \geq \omega_{\text{ap}}$ и $\omega_{\text{dxy}} \geq \omega_{\text{ax}}$ изменение давления воздуха определяется с учетом $\omega_{\text{dry}} \equiv \omega_{\text{dry}}(x_y)$ и $\omega_{\text{dxy}} \equiv \omega_{\text{dxy}}(x_y)$. В конце выпуска отработавшего воздуха из камер давление воздуха в них выравнивается. Если давление воздуха не выравнивается при $p_{\text{dry}} > p_p$ и $p_{\text{dxy}} > p_x$, то управляемые проточные камеры присоединенных объемов функционально становятся камерами задержки.

В случае $p_{\text{dry}} \geq p_p$ и $p_{\text{dxy}} \geq p_x$ при $\omega_{\text{dry}} \equiv \omega_{\text{dry}}(x_y)$ и $\omega_{\text{dxy}} \equiv \omega_{\text{dxy}}(x_y)$ текущий расход воздуха при перетечках между камерами, а следовательно, и текущее давление воздуха в камерах будут изменяться в зависимости от геометрической формы фигурных перепускных каналов и перепада давлений воздуха в рабочих камерах.

В управляемых проточных камерах присоединенных объемов изменение давления (p_1, p_2) воздуха будет следовать изменению его плотности (ρ_1, ρ_2) в виде (10).

Как указывалось в [3, 4], имеет место $\omega_{\text{dry}}(x_y) \varphi_{\text{dry}}$. Кроме того, отмечается незначительное запаздывание перетекания: при рабочем ходе ударника из камеры 7 в камеру 5 следует $p_p \geq p_{\text{dry}}$. При $\omega_{\text{dxy}}(x_y) \varphi_{\text{dxy}}$ и перетекании воздуха при рабочем ходе ударника из камеры 2 в камеру 19 усиливается зависимость $p_{\text{dxy}} \geq p_x$.

Периодичность силовых импульсов обеспечивается средствами управления впуском в камеры, а также выпуском из них.

Применив классификацию признаков [2] для средств стабилизации параметров энергоносителя с учетом средств формирования силового импульса, уравнения изменения температуры воздуха для предкамер, камер рабочего и холостого хода, а также возможных перетечек между ними запишем в виде цепочек.

Цепочка для предкамер 10 и 15:

$$\frac{d\theta_{\text{nn}}}{dt} = \frac{\theta_{\text{nn}}}{V_{\text{nn}} p_{\text{nn}}} [W(\omega_{\text{nnpp}} \varphi_{\text{nnpp}} \Omega_{\text{nnpp}} - \omega_{\text{ppn}} \varphi_{\text{ppn}} \Omega_{\text{ppn}} - \omega_{\text{drypp}} \varphi_{\text{drypp}} \Omega_{\text{drypp}} + + \operatorname{sgn}(\omega_{\text{nnpp}} \varphi_{\text{nnpp}} \Omega_{\text{nnpp}}) + \operatorname{sgn}(\omega_{\text{ppn}} \varphi_{\text{ppn}} \Omega_{\text{ppn}}) + \operatorname{sgn}(\omega_{\text{drypp}} \varphi_{\text{drypp}} \Omega_{\text{drypp}}))]; \quad (21)$$

$$\frac{d\theta_{\text{nx}}}{dt} = \frac{\theta_{\text{nx}}}{V_{\text{nx}} p_{\text{nx}}} [W(\omega_{\text{nxo}} \varphi_{\text{nxo}} \Omega_{\text{nxo}} - \omega_{\text{dxyph}} \varphi_{\text{dxyph}} \Omega_{\text{dxyph}} - \omega_{\text{zxp}} \varphi_{\text{zxp}} \Omega_{\text{zxp}} + + \operatorname{sgn}(\omega_{\text{nxo}} \varphi_{\text{nxo}} \Omega_{\text{nxo}}) + \operatorname{sgn}(\omega_{\text{dxyph}} \varphi_{\text{dxyph}} \Omega_{\text{dxyph}}) + \operatorname{sgn}(\omega_{\text{zxp}} \varphi_{\text{zxp}} \Omega_{\text{zxp}}))]. \quad (22)$$

Цепочка для камеры рабочего хода ударника:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_x}{dt} = & \frac{\theta_x}{V_x p_x} \left[W(\omega_{x_{\text{пп}}} \varphi_{x_{\text{пп}}} \Omega_{x_{\text{пп}}} - \omega_{ax} \varphi_{ax} \Omega_{ax} + \right. \\ & + \omega_{x_{\text{дху}}} (x_y) \varphi_{x_{\text{дху}}} \Omega_{x_{\text{дху}}} + \operatorname{sgn}(\omega_{p_{x3}} \varphi_{p_{x3}} \Omega_{p_{x3}}) + \operatorname{sgn}(\omega_{xa} \varphi_{xa} \Omega_{xa}) + \\ & \left. + \operatorname{sgn}(\omega_{d_{x_{\text{дху}}}} (x_y) \varphi_{d_{x_{\text{дху}}}} \Omega_{d_{x_{\text{дху}}}})) - (k-1) p_x \frac{dx_y}{dt} S_y \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

Цепочка для камер 7 и 19:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_{\text{дру}}}{dt} = & \frac{\theta_{\text{дру}}}{V_{\text{дру}} p_{\text{дру}}} [W(\omega_{\text{дру}_{\text{пп}}} \varphi_{\text{дру}_{\text{пп}}} \Omega_{\text{дру}_{\text{пп}}} - \omega_{\text{дру}} (x_y) \varphi_{\text{дру}} \Omega_{\text{дру}} + \\ & + \operatorname{sgn}(\omega_{\text{дру}} \varphi_{\text{дру}} \Omega_{\text{дру}}) + \operatorname{sgn}(\omega_{\text{дру}} (x_y) \varphi_{\text{дру}} \Omega_{\text{дру}}))]; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_{\text{дху}}}{dt} = & \frac{\theta_{\text{дху}}}{V_{\text{дху}} p_{\text{дху}}} [W(\omega_{\text{дху}_{\text{пп}}} \varphi_{\text{дху}_{\text{пп}}} \Omega_{\text{дху}_{\text{пп}}} - \omega_{x_{\text{дху}}} (x_y) \varphi_{x_{\text{дху}}} \Omega_{x_{\text{дху}}} + \\ & + \operatorname{sgn}(\omega_{p_{\text{дху}}} \varphi_{p_{\text{дху}}} \Omega_{p_{\text{дху}}}) + \operatorname{sgn}(\omega_{d_{x_{\text{дху}}}} (x_y) \varphi_{d_{x_{\text{дху}}}} \Omega_{d_{x_{\text{дху}}}}))]. \end{aligned} \quad (25)$$

В управляемых проточных камерах присоединенных объемов, которые сообщаются с камерами рабочего и холостого хода, при $\omega_{\text{дру}} \neq \text{const}$, $\omega_{\text{дху}} \neq \text{const}$ и $\omega_{\text{дру}} \geq \omega_{ap}$, $\omega_{\text{дху}} \geq \omega_{ax}$ изменение давления воздуха определяется с учетом $\omega_{\text{дру}} \equiv \omega_{\text{дру}}(x_y)$ и $\omega_{\text{дху}} \equiv \omega_{\text{дху}}(x_y)$. В конце выпуска отработавшего воздуха из камер давление воздуха в них выравнивается. Если этого не происходит при $p_{\text{дру}} > p_p$, $p_{\text{дху}} > p_x$ и $\theta_{\text{дру}} > \theta_p$, $\theta_{\text{дху}} > \theta_x$, то управляемые проточные камеры присоединенных объемов функционально становятся камерами задержки.

В случае $p_{\text{дру}} \geq p_p$, $p_{\text{дху}} \geq p_x$ и $\theta_{\text{дру}} \geq \theta_p$, $\theta_{\text{дху}} \geq \theta_x$ при $\omega_{\text{дру}} \equiv \omega_{\text{дру}}(x_y)$ и $\omega_{\text{дху}} \equiv \omega_{\text{дху}}(x_y)$ текущий расход воздуха при перетечках между камерами, а следовательно, и текущее давление воздуха в камерах будут изменяться в зависимости от геометрической формы фигурных каналов перетечек и перепада давлений воздуха в рабочих камерах.

Для проточных управляемых камер присоединенных объемов изменение температуры (θ_1, θ_2) воздуха будет следовать тенденции изменения давления (p_1, p_2) воздуха в виде (15).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абраменков, Д.Э. Теория дроссельных пневматических механизмов и разработка типоразмерного ряда ручных машин ударного действия для строительства [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Д.Э. Абраменков. — Омск, 2004. — 45 с.
2. Абраменков, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дроссельные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск : Изд-во НГУ, 1993. — 430 с.
3. Абраменков, Д.Э. Бародинамические параметры средств стабилизации энергоносителя пневмоударного механизма с дроссельным воздухораспределением [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков и др. // Труды НГАСУ. — 2009. — Т. 12, № 2. — С. 11—17.
4. Абраменков, Д.Э. Баро- и термодинамические параметры средств стабилизации энергоносителя пневмоударного механизма с дроссельным воздухораспределением [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков и др. // Труды НГАСУ. — 2009. — Т. 12, № 3. — С. 6—12.

АБРАМЕНКОВ Д.Э., д-р техн. наук, проф.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

АБРАМЕНКОВ Э.А., д-р техн. наук, проф.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

ГЛАДЫШЕВ Г.В., асп.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

ЧУБАРОВ П.В., асп.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 03.06.10

Abramenkov D.E., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Abramenkov E.A., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Gladyshev G.V., post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Chubarov P.V., post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

THROTTLE PNEUMOSHOCK MECHANISM WITH OPERATED FLOWING CHAMBERS OF VOLUME ATTACHED WITH SEPARATE INTAKE AIR NETWORK

Basic schemes and physical and mathematical models of throttle pneumoshock mechanisms with operated flowing chambers of volume attached with separate intake air network are considered from working course and from idling.

Key words: pneumoshock mechanism, drummer, operated flowing chamber of volume attached, prechamber, compressed air, intake, working course chamber, idling chamber.

REFERENCES

1. Abramenkov, D.E. Theory of throttle pneumatic mechanisms and working out of a typical dimensional number of manual machines of shock action for building [Text] : Abstract of thesis...candidate of technical science / D.E. Abramenkov. — Omsk, 2004. — 45 p.
2. Abramenkov, E.A. Pneumatic mechanisms of actionshockmachines: throttle, jet, without plunger, without valve [Text] / E.A. Abramenkov, D.E. Abramenkov. — Novosibirsk : Publ. of NGU, 1993. — 430 p.
3. Abramenkov, D.E. Baro- and dynamicstabilisationmeans parameters of energy carrier of pneumoshock mechanism with throttle air distribution [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov et al. // Works of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering. — 2009. — Vol. 12, N 2. — P. 11—17.
4. Abramenkov, D.E. Baro- and dynamicstabilisationmeans parameters of energy carrier of pneumoshock mechanism with throttle air distribution [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov et al. // Works of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering. — 2009. — Vol. 12, N 3. — P. 6—12.

УДК 621.878.2 : 621.396

Ю.В. АВДЕЕВ, А.Д. КОНОНОВ, А.А. КОНОНОВ, В.Н. АНИКИН

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОВОЛНОВОГО КАНАЛА СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНЫМИ МАШИНАМИ

На основе анализа влияния радиоволнового канала управления землеройно-транспортными машинами на структуру информационного сигнала даются рекомендации по выбору и применению антенных систем, обеспечивающих требуемую надежность и устойчивость дистанционного управления землеройно-транспортными машинами.

Ключевые слова: землеройно-транспортные машины, дистанционное управление, дальность радиоуправления, ведомая машина.

Важным направлением повышения эффективности применения землеройно-транспортных машин (ЗТМ) и безопасности жизнедеятельности оператора является развитие систем дистанционного радиоуправления [1]. При решении задач электромагнитной совместимости и оптимизации приема управляющих сигналов для функционирования ЗТМ весьма важно определить характер и степень влияния канала радиоуправления в различных условиях распространения радиоволн. Диапазон ультракоротких волн (УКВ) имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при расчетах надежности и устойчивости работы систем дистанционного управления ЗТМ.

Доминирующее влияние на величину напряженности поля в точке приема оказывают отражения волн от подстилающей грунтовой поверхности и окружающего рельефа. Энергия отраженной волны попадает в точку приема и складывается с энергией прямого луча (на рис. 1 показана схема распространения радиоволн в канале «передатчик — приемник» системы дистанционного управления ЗТМ).

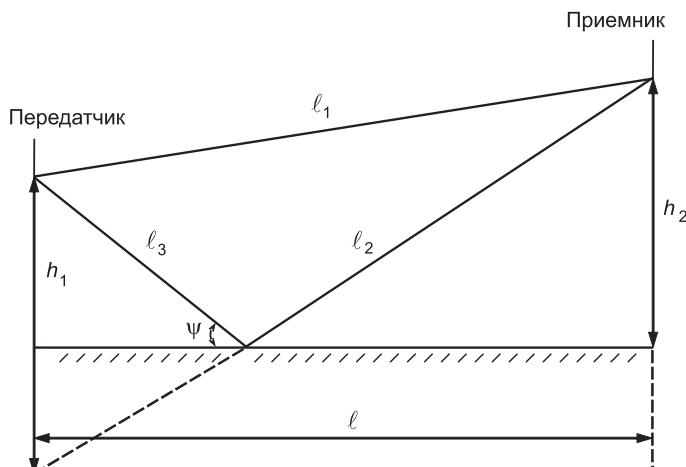


Рис. 1. Схема распространения радиоволн в канале «передатчик — приемник» системы дистанционного управления ЗТМ

Напряженность поля в точке приема определяется в результате сложения переменных полей, прошедших по лучам l_1 и l_2 . Комплексная амплитуда прямого луча может быть представлена в виде

$$\dot{E}_0 = E_0 e^{-j k l_1}, \quad (1)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ — длина волны, м.

Комплексная амплитуда отраженного луча варьируется вследствие поглощения части энергии и изменения фазы при рассеянии и может быть представлена в виде

$$\dot{E}_r = E_0 \Gamma e^{-j(k l_2 + \varphi)}, \quad (2)$$

где Γ и φ — амплитуда и фаза комплексного коэффициента отражения.

Результирующая напряженность поля в точке приема

$$\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_r = E_0 e^{-j k l_1} [1 + \Gamma e^{-j(k \Delta \ell + \varphi)}], \quad (3)$$

где $\Delta \ell = l_2 - l_1$.

Множитель ослабления по мощности F_P представляется в виде

$$F_P = [1 + \Gamma e^{-j(k \Delta \ell + \varphi)}]^2 = 1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(k \Delta \ell + \varphi). \quad (4)$$

Из рис. 1 следует, что

$$\Delta \ell = \sqrt{\ell^2 + (h_1 + h_2)^2} - \sqrt{\ell^2 + (h_2 - h_1)^2},$$

где h_1 — высота передающей антенны;

h_2 — высота приемной антенны.

Для определения множителя ослабления и амплитудных характеристик поля в точке приема требуются величины Γ и φ , зависящие от проводимости σ_0 , диэлектрической проницаемости ϵ_0 грунта, длины волны, поляризации радиоволн, а также от угла облучения поверхности рассеяния грунта.

Коэффициенты отражения для горизонтальной и вертикальной поляризаций имеют вид [2]

$$\dot{\Gamma}_r = \frac{\sin \psi - \sqrt{\dot{\epsilon} - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{\dot{\epsilon} - \cos^2 \psi}}; \quad (5)$$

$$\dot{\Gamma}_v = \frac{\dot{\epsilon} \sin \psi - \sqrt{\dot{\epsilon} - \cos^2 \psi}}{\dot{\epsilon} \sin \psi + \sqrt{\dot{\epsilon} - \cos^2 \psi}}, \quad (6)$$

где $\dot{\epsilon} = \epsilon_0 - j60\lambda\sigma_0$ — комплексная величина диэлектрической постоянной;

$$\sin \psi = \frac{h_1 + h_2}{\sqrt{(h_1 + h_2)^2 + \ell^2}}, \quad \cos \psi = \frac{\ell^2}{(h_1 + h_2)^2 + \ell^2}.$$

Во избежание излишнего загромождения статьи графическими материалами в качестве примеров на рис. 2 и 3 приведены лишь результаты расчетов множителя ослабления для высоты передающей антенны $h_1 = 0,5$ м и высоты приемной антенны $h_2 = 2,5$ м, различного вида поляризации радиоволн, а также дальности радиоуправления ЗТМ.

Полный анализ зависимостей показывает, что общая закономерность спада множителя ослабления обратно пропорциональна квадрату расстояния до ведомой ЗТМ, однако уровень множителя ослабления при

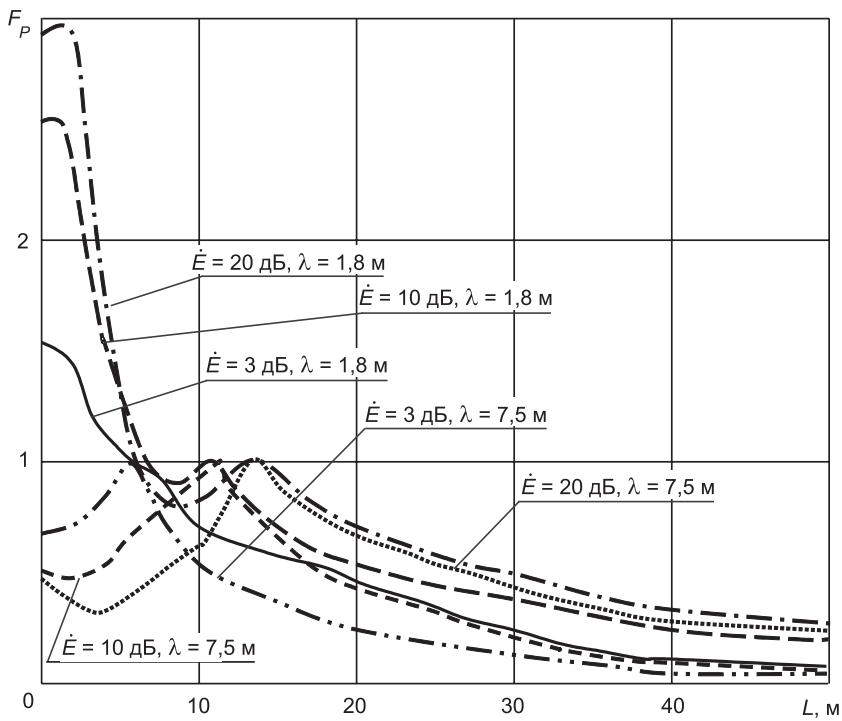


Рис. 2. Зависимость множителя ослабления от дальности радиоуправления ЗТМ при высоте передающей антенны $h_1 = 0,5 \text{ м}$, высоте приемной антенны $h_2 = 2,5 \text{ м}$ и вертикальной поляризации радиоволн

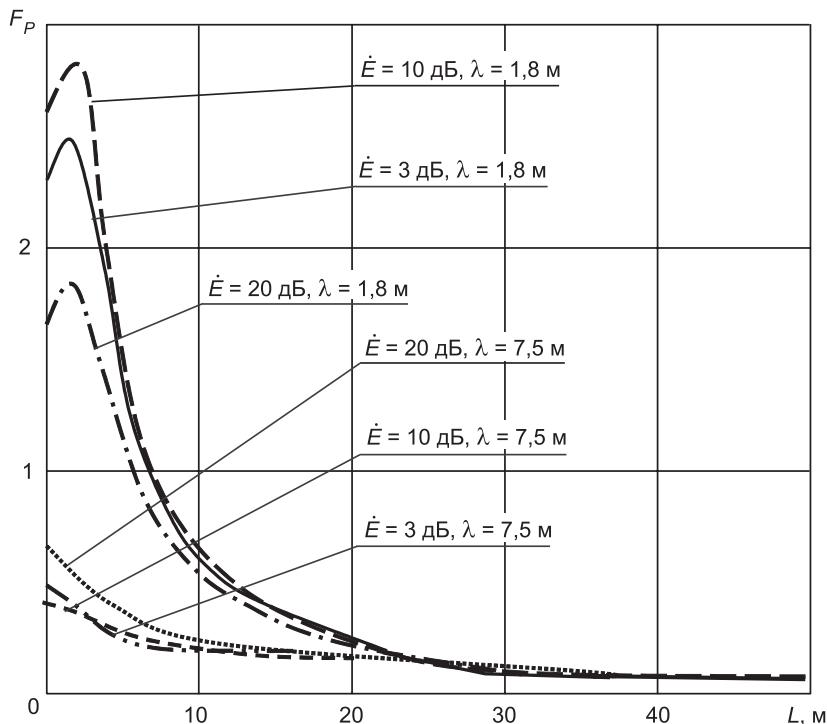


Рис. 3. Зависимость множителя ослабления от дальности радиоуправления ЗТМ при высоте передающей антенны $h_1 = 0,5 \text{ м}$, высоте приемной антенны $h_2 = 2,5 \text{ м}$ и горизонтальной поляризации радиоволн

вертикальной поляризации в среднем больше по сравнению с горизонтальной. С увеличением высоты антенны увеличивается уровень сигналов, но при этом увеличивается зона интерференции, так как возрастают число и интенсивность переотражений.

При близости поверхностных волн к подстилающей поверхности (т.е. грунту) характеристики их существенно зависят от состояния этой поверхности, ее структуры и формы, окружения и многих других факторов.

Реально участок работы ЗТМ представляет собой совокупность большого числа неровностей в виде возвышений и впадин, размеры которых соизмеримы с длиной волны УКВ диапазона или превышают ее. Для учета влияния неровностей земной поверхности применим волновую трактовку, которая сводится к тому, что в месте приема приходит энергия, отраженная от достаточно большой области грунтовой поверхности, при этом возникает сложный интерференционный эффект.

При анализе воздействия рельефа местности на распространение радиоволн существует два различных подхода: детерминированный, который учитывает конкретные особенности рабочего участка, и статистический, когда соответствующие влияния канала радиоуправления ЗТМ определяются на основе статистических характеристик неровностей, и учет этих влияний в среднем позволяет уточнить мощность передатчика для обеспечения требуемого уровня сигналов в месте приема.

При детерминированном рассмотрении влияние неровностей сказывается на характеристиках рассеяния электромагнитной энергии, при этом плотность потока отраженной энергии уменьшается, т.е. уменьшается модуль коэффициента отражения. Уменьшение зависит от формы неровностей и их взаимного расположения, в частности от отношения высоты неровностей к длине волны, а также поляризации падающего поля и от угла скольжения.

Окружающие предметы в зависимости от их физических и геометрических параметров, а также дальностей расположения их от ведомой машины представляют собой переизлучатели, создающие на входе приемного устройства системы дистанционного управления ЗТМ поле сложной формы как по амплитудно-фазовым, так и по поляризационным параметрам и характеристикам. В тех случаях, когда размеры переизлучателя соизмеримы с длиной волны, его действие на суммарное поле может быть значительным. Так, металлические предметы с линейными размерами, близкими к $\lambda/4$, создают эффект резонансного переизлучения.

При длине переизлучателя, соизмеримой с длиной волны, его влияние на структуру поля можно приближенно оценить¹ как

$$H = \frac{120E}{(2N-1)\pi R_0} \cos \left[\frac{k}{\ell} (\ell_1 - \ell_2 - \ell_3) \right] e^{j\Phi}, \quad (7)$$

где N — любое целое число, определяющее число четвертей волны, укладывающихся вдоль антенны;

R_0 — активное сопротивление антенны;

Φ — фаза отраженного сигнала.

Выражение (7) позволяет произвести расчет необходимого расстояния, когда уровень вторичного поля не будет превосходить допустимый помеховый порог.

При статистическом подходе математический анализ влияния окружающих предметов в диапазоне УКВ на результирующее электромагнит-

¹ Резин П.А. Расчет излучения прямолинейной антенны в ближней зоне / П.А. Резин // ЖТФ. 1937. Т. 7, вып. 6. С. 646–667.

ное поле в общем виде весьма сложен, поэтому для анализа реальной обстановки применяется моделирование. В [3] получены соотношения, которые позволяют подсчитать дополнительный уровень шума в канале связи за счет многолучевости для случая одинаковых вероятностей углов прихода волн относительно направления движения. Многолучевость приводит к флуктуациям амплитуды и фазы сигнала прямой волны. При малых временах запаздывания разность фаз

$$\Delta\Phi = \Phi(t) - \Phi(t_i),$$

где $\Phi(t)$ и $\Phi(t_i)$ — соответственно фазы прямой и запаздывающих волн; t и t_i — времена их прихода в точку приема.

На дальностях прямой видимости интенсивность отраженных волн мала и случайная составляющая фазы сигнала определяется в виде

$$\phi(t) \approx \sum_{i=1}^m a_i \sin(\Delta\omega_i t - \Phi_i),$$

где $a_i = U_i / U_0$ — отношение амплитуд i -й и прямой волн соответственно;

$\Delta\omega_i$ и Φ_i — девиация частоты и фаза i -й волны;

m — число переотраженных волн.

Уровень сигналов в антенне ведомой ЗТМ от рассеянных волн и величина запаздывания этих волн относительно прямой волны статистически связаны. С ростом запаздывания мощность полезного сигнала в антенне падает. Так, в эксперименте при запаздывании в 1,5 мкс мощность полезного сигнала уменьшается на 20 дБ.

Интерференционный множитель грунта можно рассчитать в приближении Кирхгофа методом касательной плоскости [4]. Мгновенную плотность потока энергии волны (вектор Π) сквозь некоторую поверхность S можно трактовать как умноженный на коэффициент отражения поток для поля, создаваемого идентичным реальному излучателем, помещенным в точке его зеркального отображения. Местоположение этой точки будет варьироваться в соответствии с изменением положения плоскости, касательной к неровностям грунта в точке падения луча от передатчика. Вся рабочая поверхность делится на две части: ближнюю S_0 и дальнюю $S - S_0$. В первой все неровности целиком расположены в зоне оптического наблюдения, а во второй видны лишь вершины неровностей (эффект затенения). Коэффициент отражения на дальнем участке для вертикальной и горизонтальной поляризаций близок к -1 .

Плотность потока энергии в зоне S_0 принимает вид

$$\Pi = \mathbf{C} \frac{e^{-jk\ell}}{\ell_2} \dot{\Gamma}_r, \quad (8)$$

где \mathbf{C} — постоянный фактор, а в дальней зоне

$$\Pi = -\mathbf{C} \frac{e^{jk\ell}}{\ell_2}. \quad (9)$$

Напряженность поля элементарного излучателя определяется как

$$E \approx -k^2 \Pi \cos\theta, \quad (10)$$

где θ — угол, отсчитываемый от перпендикуляра к оси излучателя в плоскости E .

В качестве иллюстрации на рис. 4 приведены графики изменения напряженности электрического поля в зависимости от расстояния до излучателя для различных условий работы ЗТМ (на ровной местности и в карьере) и видов поляризации сигнала передатчика.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

1) напряженность поля убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между ведомой и ведущей ЗТМ при дистанционном управлении;

2) общий уровень сигнала при вертикальной поляризации выше, чем при горизонтальной, поэтому в качестве приемной антенны целесообразно использовать четвертьвольновый вертикальный штырь, устанавливаемый на крыше кабины ведомой ЗТМ;

3) изменение уровня сигнала при изменении расстояния между ведомой и ведущей ЗТМ от 3 до 150 м составляет не более 60 дБ.

Полученные результаты имеют практическое значение и могут быть полезны при разработке высокопроизводительных систем дистанционного управления группой ЗТМ.

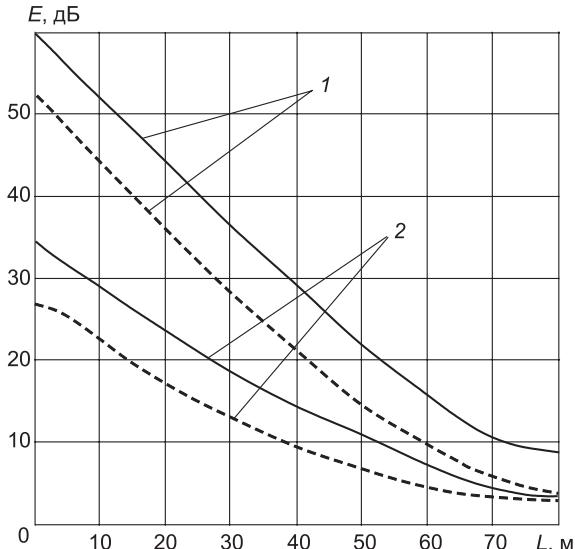


Рис. 4. Изменение напряженности поля в зависимости от расстояния до излучателя для различных условий работы ЗТМ:

1 — при работе на ровной местности; 2 — при работе в карьере

— вертикальная поляризация сигнала передатчика;
- - - горизонтальная поляризация сигнала передатчика

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Кононов, А.Д. Алгоритм обработки сигналов датчиков системы следящего дистанционного управления землеройно-транспортными машинами [Текст] / А.Д. Кононов, Ю.В. Авдеев, А.А. Кононов // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 3–4. — С. 95–99.
- Аникеенко, Г.Н. Радиолокационный поляризационный метод определения электрических параметров земных сред [Текст] / Г.Н. Аникеенко, А.А. Кононов // Сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. «Радио- и волоконно-оптическая связь, локация и навигация». — Воронеж, 1997. — Т. 3. — С. 1419–1427.
- Моргунов, Л.Н. Флуктуации принимаемого сигнала в антенне подвижного объекта системы городской УКВ и ДМВ радиосвязи [Текст] / Л.Н. Моргунов. — М. : Электросвязь, 1966. — № 10. — С. 51–54.
- Басс, Ф.Г. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности [Текст] / Ф.Г. Басс, И.М. Фукс. — М. : Наука, 1972. — 430 с.

АВДЕЕВ Ю.В., канд. техн. наук, доц.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
КОНОНОВ А.Д., канд. физ.-мат. наук, доц.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
КОНОНОВ А.А., д-р техн. наук, проф.; E-mail:kniiga16@mail.ru

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 11.10.10

Avdeev Yu.V., candidate of technical sciences, assistant professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Kononov A.D., candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Kononov A.A., doctor of technical sciences, professor; E-mail: kniga16@mail.ru, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Anikin V.N., post-graduate student, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

TO A PROBLEM OF EXAMINATION OF A WAVE DUCT OF A REMOTE CONTROL SYSTEM BY THE MOTORGRADERS, SCRAPERS AND BULLDOZERS

On the basis of the analysis of influence of a wave duct of control the motorgraders, scrapers and bulldozers on structure of an information signal give the guidelines at a select and application of antenna systems ensuring demanded reliability and a stability of full remote control by motorgraders, scrapers and bulldozers.

Key words: motorgraders, scrapers and bulldozers, full remote control, distance of a radio control, led machine.

REFERENCES

1. Kononov, A.D. Processing logic of signals of transmitters of system of tracking full remote control by motorgraders, scrapers and bulldozers [Text] / A.D. Kononov, Yu.V. Avdeev, A.A. Kononov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 3-4. — P. 95–99.
2. Anikeenko, G.N. A radar-tracking polarization method of definition of electrical parameters of earth mediums [Text] / G.N. Anikeenko, A.A. Kononov // The collection of Transactiones of the All-Russia technological conf. «Wireless and fiber-optic communication, detection and ranging and navigating». — Voronezh, 1997. — T. 3. — P. 1419–1427.
3. Morgunov, L.N. Fluctuations of a received signal in a vehicle antenna of system of a urban VHF and decimeter waves of a radio communication [Text] / L.N. Morgunov // Telecommunication. — 1966. — N 10. — P. 51–54.
4. Bass, F.G. A wave diffusion on a statistically rough surface [Text] / F.G. Bass, I.M. Fuks. — M. : Science, 1972. — 430 p.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.012.042.8.001.2

З.Р. ГАЛЯУТДИНОВ

МНОГОСЛОЙНАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА В ДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ ПЛИТ, ОПЕРТЫХ ПО КОНТУРУ

Представлен метод динамического расчета железобетонных плит, основанный на многослойной модели деформирования. Физическая модель динамического деформирования железобетона сформирована с учетом современных знаний о поведении материалов при кратковременном динамическом нагружении. Расчеты сопоставлены с результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: динамика, ускорение, перемещение, железобетонная плита, скорость деформирования, полоса бетона между трещинами.

Непрерывное развитие нефтяной, газовой, энергетической, химической и других отраслей промышленности увеличивает вероятность возникновения и воздействия на конструкции зданий и сооружений случайных кратковременных динамических нагрузок аварийного характера. Одним из путей экономичного и надежного проектирования сооружений, подверженных воздействию интенсивной динамической нагрузки, является разработка эффективных методов их расчета.

Недостаточность знаний о поведении железобетонных конструкций при интенсивном динамическом нагружении и несовершенство существующих методов расчета требуют проведения дальнейших исследований, направленных на совершенствование моделей динамического деформирования железобетона, являющихся основой методов расчета.

В настоящей работе рассматривается метод динамического расчета опертых по контуру железобетонных плит. Физические соотношения для плиты получены на основе многослойной модели. Данная деформационная модель реализована для статического расчета плит в работах отечественных и зарубежных ученых (Н.И. Карпенко, М. Fujii, A. Miyamoto и др.), а также в современных нормах (СП 52-101-2003) для расчета стержневых элементов на действие статических нагрузок. Представленная в статье многослойная модель является развитием деформационной модели, реализованной в нормативных документах для опертых по контуру плит при кратковременном динамическом нагружении.

Применение многослойной модели позволяет учесть изменение положения линии центров тяжести сечения, работу бетона в условиях плоского напряженного состояния в пределах одного слоя, постепенное выключение из работы бетона и перераспределение усилий по сечению, а также процесс постепенного образования и развития трещин как по полю плиты, так и по толщине.

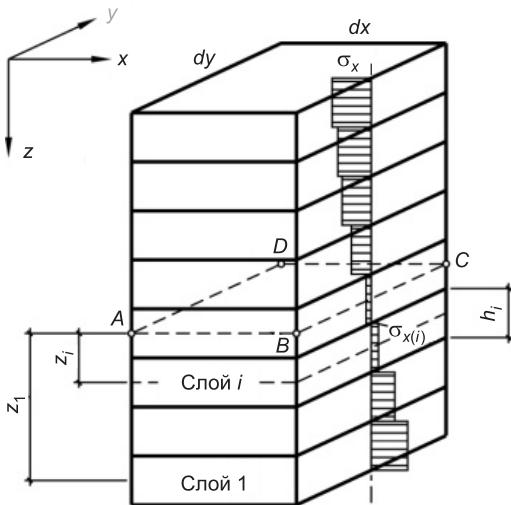


Рис. 1. Элемент плиты, разделенный на отдельные слои

Согласно принятой модели плита условно разбивается на слои малой толщины (рис. 1). Построение матрицы жесткости плиты в целом осуществляется с учетом динамического характера деформирования бетона и арматуры в пределах слоя, при этом напряжения и деформации для плиты связаны зависимостью

$$\{M\} = [D]\{\chi\},$$

где $\{M\}$ — вектор обобщенных усилий;
 $\{\chi\}$ — вектор обобщенных деформаций срединной поверхности плиты;
 $[D]$ — матрица упругости плиты.

Представим зависимость в развернутом виде

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ & & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ & & & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ & & & & D_{55} & D_{56} \\ & & & & & D_{66} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \chi_{mx} \\ \chi_{my} \\ 2\chi_{mxy} \\ \varepsilon_{0x} \\ \varepsilon_{0y} \\ \varepsilon_{0xy} \end{Bmatrix},$$

сим мет рич но

где

$$\begin{cases} D_{sj} = \sum_i d_{kr(i)} h_i z_i^2, & s = 1..3, \quad j = 1..3, \quad k = 1..3, \quad r = 1..3, \\ D_{sj} = \sum_i d_{kr(i)} h_i z_i, & s = 1..3, \quad j = 4..6, \quad k = 1..3, \quad r = 1..3, \\ D_{sj} = \sum_i d_{kr(i)} h_i, & s = 4..6, \quad j = 4..6, \quad k = 1..3, \quad r = 1..3. \end{cases}$$

Здесь $d_{kr(i)}$ — элементы матрицы упругости i -го слоя $[d]_i$;

h_i — толщина i -го слоя;

z_i — расстояние от центра тяжести i -го слоя до срединной поверхности плиты.

Нелинейный характер деформирования железобетона в пределах отдельного слоя описывается динамическими диаграммами деформирования бетона и арматуры и критерием прочности бетона при плоском напряженном состоянии. Железобетон рассматривается как анизотропный материал, причем характер связи между напряжениями и деформациями устанавливается соотношением напряжений в пределах элементарного объема на рассматриваемом участке конструкции и может изменяться в процессе деформирования.

До образования трещин физические соотношения для бетона записываются как для ортотропного материала с осями симметрии, совпадающими с осями главных напряжений (рис. 2, a). При этом изменение напряженно-деформированного состояния бетона на различных стадиях нагруз-

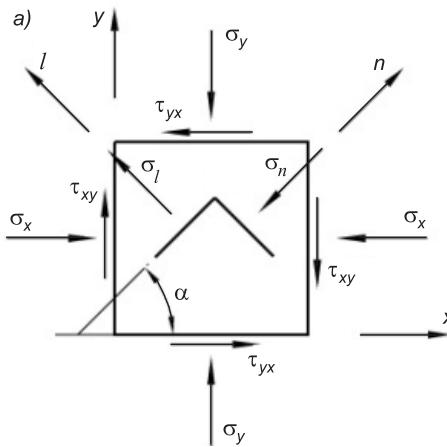
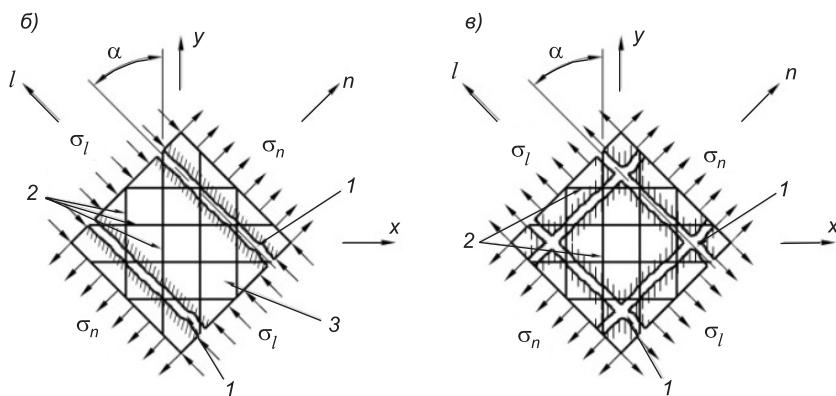


Рис. 2. Элемент при плоском напряженном состоянии (а) и схемы трещинообразования (б, в)
1 — трещина; 2 — арматура; 3 — полоса бетона между трещинами



жения описывается по главным площадкам n , l диаграммами « σ — ϵ » бетона с учетом критерия прочности бетона при плоском напряженном состоянии.

Для обоснования физической модели динамического деформирования железобетона были обобщены экспериментальные и теоретические данные, характеризующие работу материалов при интенсивном динамическом нагружении, представленные в работах В.М. Бондаренко, Ю.М. Баженова, В.А. Котляревского, Л.Р. Маильяна, В.М. Митасова, Н.Н. Попова, Г.И. Попова, Б.С. Растворгутева, J. Brooks, W. Dilger, C. Ross, I. Tedesco и других отечественных и зарубежных исследователей. На основании выполненного анализа определены диаграммы состояния бетона и арматуры и критерий прочности бетона, в наилучшей степени характеризующие работу материалов при динамических воздействиях.

Диаграмма деформирования бетона, учитывающая ниспадающую ветвь, скорость деформирования, влияние косвенного армирования на его прочностные и деформативные свойства, принята согласно исследованиям W.H. Dilger, R. Koch, R. Kowalczyk [1]:

$$\sigma_b = R_{bd} \frac{\alpha_1 x_1 + (\alpha_2 - 1)x_1^2}{1 + (\alpha_1 - 2)x_1 + \alpha_2 x_1^2},$$

где $x_1 = \epsilon_b / \epsilon_{R1}$ — относительная величина деформаций;

ϵ_{R1} — относительные деформации бетона, соответствующие максимальным напряжениям;

R_{bd} — динамическая прочность бетона;

α_1 и α_2 — коэффициенты, отражающие влияние поперечного армирования и скорости деформирования на изменение формы диаграммы бетона.

Для арматурной стали диаграмма сопротивления принята в виде кусочно-линейной аппроксимации, отражающей ее работу в упругой и пластической стадиях и в стадии упрочнения [2]. Изменение прочностных характеристик и длины площадки текучести учитывается коэффициентами динамического упрочнения, зависящими от скорости деформирования и принятymi на основании анализа экспериментальных и теоретических данных.

Критерий прочности бетона при плоском напряженном состоянии в условиях динамического нагружения принят по данным работы [2]. Указанный критерий удовлетворительно согласуется с опытными данными. Аналитически критерий прочности имеет вид

$$\begin{aligned} -\frac{\sigma_1(t)}{R_{bd} k_{yb}} &= 1, & \sigma_1(t) < 0, \quad \sigma_3(t) < 0, \\ -\frac{\sigma_1(t)}{R_{bd} k_{yb}} + \frac{\sigma_3(t)}{R_{btd} k_{ybt}} &= 1, & \sigma_1(t) < 0, \quad \sigma_3(t) > 0, \\ \frac{\sigma_1(t)}{R_{btd} k_{ybt}} + \frac{\sigma_3(t)}{R_{btd} k_{ybt}} &= 1, & \sigma_1(t) > 0, \quad \sigma_3(t) > 0, \end{aligned}$$

где $\sigma_1(t)$, $\sigma_3(t)$ — главные напряжения при динамическом нагружении; k_{yb} , k_{ybt} — коэффициенты динамического упрочнения бетона при сжатии и растяжении.

После образования трещин напряженное состояние элемента изменяется. При образовании пересекающихся трещин (см. рис. 1, в) бетон практически полностью выключается из работы, все усилия при этом воспринимаются арматурой. В случае образования непересекающихся трещин (см. рис. 1, б) бетон выключается из работы в направлении, перпендикулярном трещине, при этом вдоль трещины он воспринимает возникающие усилия. Прочность полос бетона на сжатие зависит от уровня растяжения их в направлении, перпендикулярном трещине. Снижение прочности полос бетона в условиях динамического сжатия—растяжения учитывается зависимостью, предложенной в [3]:

$$R_{pd} = R_{bd} / (205\epsilon_n + 0,9),$$

где ϵ_n — деформации образца перпендикулярно трещине;
 R_{pd} — прочность полос бетона между трещинами при кратковременном динамическом нагружении;
 R_{bd} — призменная прочность бетона при кратковременном динамическом нагружении.

Расчет сводится к решению системы дифференциальных уравнений

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{P(t)\},$$

где $[K]$, $[M]$ — матрицы жесткости и масс системы;
 $\{u\}$, $\{\ddot{u}\}$, $\{P(t)\}$ — векторы узловых перемещений, ускорений и внешней узловой нагрузки.

Уравнение движения системы, представленное в приращениях, решается шагово-итерационным методом. Для реализации принят метод Newmark- β , являющийся наиболее устойчивым для решения задач нелинейного расчета железобетонных конструкций. В результате решения

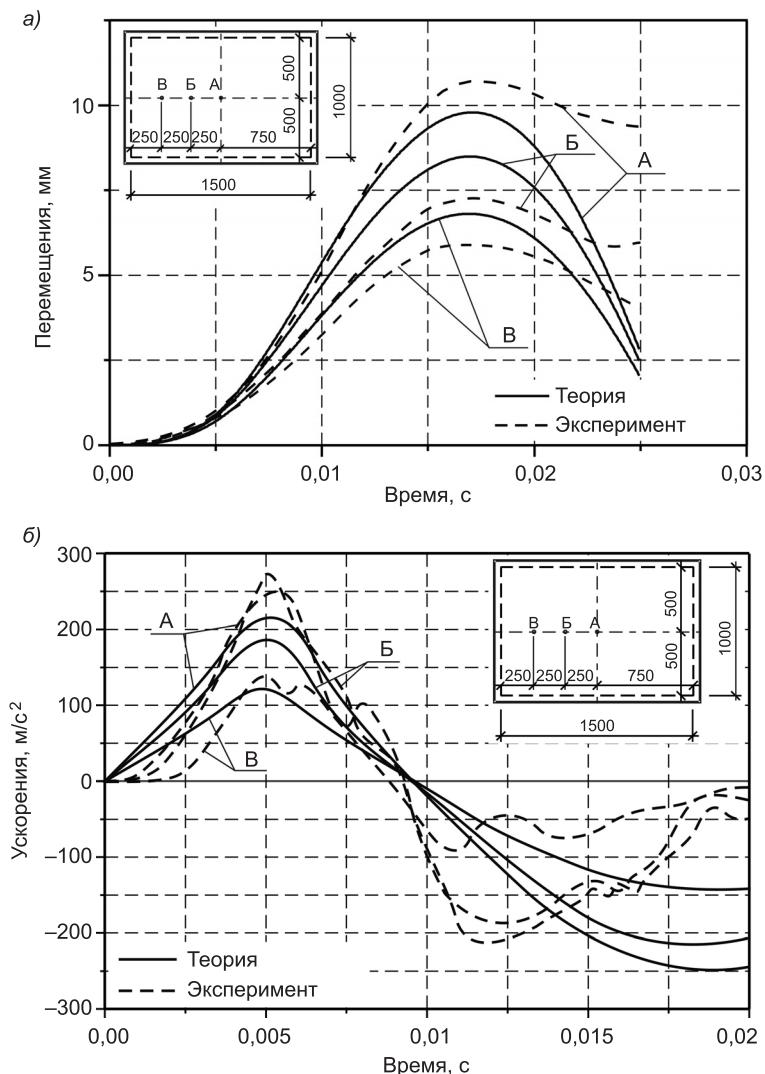


Рис. 3. Графики изменения перемещений (а) и ускорений (б) при кратковременном динамическом нагружении

системы уравнений определяется реакция системы в текущий момент времени. Полученные данные используются для корректировки физико-механических характеристик материалов в пределах слоев и соответственно жесткости плиты в целом.

На основе описанного алгоритма была составлена программа на языке FORTRAN. Результаты расчета шарнирно опертой по контуру плиты в сопоставлении с результатами экспериментальных исследований [4] приведены на рис. 3.

Таким образом, предложенный метод динамического расчета открытых по контуру железобетонных плит, учитывающий особенности деформирования материалов при интенсивном динамическом нагружении, позволяет с достаточной степенью точности оценить напряженно-деформированное состояние конструкции на всех стадиях деформирования вплоть до разрушения. Результаты расчета по предложенному методу хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dilger, W.H. Ductility of plain and confined concrete under different strain rates [Текст] / W.H. Dilger, R. Koch, R. Kowalczyk / J. American Concrete Institute. — 1984. — Vol. 81, N 1. — P. 73–81.
2. Кумпяк, О.Г. Прочность и деформативность железобетонных сооружений при кратковременном динамическом нагружении [Текст] / О.Г. Кумпяк, Д.Г. Копаница. — Томск : STT, 2002. — 336 с.
3. Галяутдинов, З.Р. Прочность сжато-растянутых полос бетона между трещинами при кратковременном динамическом нагружении [Текст] / З.Р. Галяутдинов // Вест. Том. гос. архит.-строит. ун-та. — 2007. — № 2. — С. 153–157.
4. Kumpjak, O.G. Deformation of reinforced concrete slabs under short-term dynamic loading [Текст] / O.G. Kumpjak, Z.R. Galjautdinov // Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology. KORUS 2004. — Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2004. — P. 313–318.

ГАЛЯУТДИНОВ З.Р., канд. техн. наук; E-mail: zaurg@t-sk.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 12.10.10

Galjautdinov Z.R., candidate of technical sciences, E-mail: zaurg@t-sk.ru; Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

THE MULTILAYERED MODEL OF A STRAINING OF REINFORCED CONCRETE IN DYNAMIC CALCULATIONS OF SLABS SUPPORTED ON A CONTOUR

The given paper present method of dynamic design reinforced concrete slabs. This method based on multilayered model of deformation. The physical model of dynamic deformation of reinforced concrete is generated taking into account modern knowledge of behaviour of materials at short-term dynamic loads. Calculations are compared with results of experimental researches.

Key words: dynamic, acceleration, displacement, reinforced concrete slab, strain rate, strip of concrete between cracks.

REFERENCES

1. Dilger, W.H. Ductility of plain and confined concrete under different strain rates [Text] / W.H. Dilger, R. Koch, R. Kowalczyk // J. American Concrete Institute. — 1984. — Vol. 81, N 1. — P. 73–81.
2. Kumpjak, O.G. Durability and deformity of reinforced concrete structures under short-term dynamic loading [Text] / O.G. Kumpjak, D.G. Kopanitsa. — Tomsk : STT, 2002. — 336 p.
3. Galjautdinov, Z.R. Durability of the compressed-tensile strips of concrete between cracks at a short-term dynamic loading [Text] / Z.R. Galjautdinov // Bulletin Tomsk State University of Architecture and Building. — 2007. — N 2. — P. 153–157.
4. Kumpjak, O.G. Deformation of reinforced concrete slabs under short-term dynamic loading [Text] / O.G. Kumpjak, Z.R. Galjautdinov // Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology. KORUS 2004. — Tomsk : Tomsk Polytechnic University, 2004. — P. 313–318.

УДК 621.929.6

В.П. ГИЛЕТА, Б.В. ЮДИН

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СМЕСИТЕЛЯ ДЛЯ НАНОПОРОШКОВ

Получено выражение для длины пути механизма с подвижностью 3. Предложен механизм для смешивания сыпучих материалов.

Ключевые слова: кинематический синтез механизмов, смешение наноматериалов, длина траектории.

Характерные для нанотехнологий размеры частиц приводят к тому, что совокупность этих частиц начинает вести себя как сплошная среда, внешне похожая на жидкость. В то же время для создания однородных смесей из частиц разных материалов прямое использование технологий смешения жидкостей нельзя признать эффективным. Известно несколько режимов смешения.

При движении рабочего органа смесителя — лопатки в разных сплошных средах происходят разные процессы. В ньютоновских жидкостях (рис. 1, а) процесс смешения определяется силами вязкости. Параллельное сдвиговое движение слоев приводит к перемещению частей верхнего слоя над нижними слоями, в результате исходно близкие части среды перемещаются друг относительно друга в разные точки объема и смешиваются с другими.

Движение слоев (рис. 1, б) для жидкостей и газов при больших скоростях приводит к возникновению пульсаций, что вызывает турбулентность, повышающую эффективность смешения.

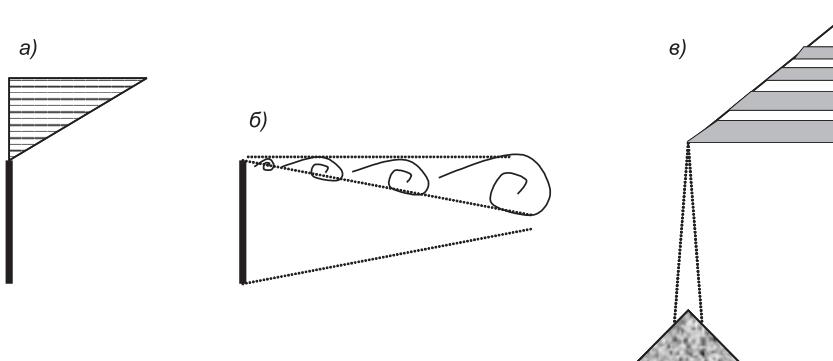


Рис. 1. Режимы смешения

а) — ньютоновское движение жидкости и газа; б) — турбулентное смешение;
в) — смешение сыпучих сред

При сдвиге порошка поперечных пульсаций нет, турбулентность не возникает, вязкость, которая могла бы вовлечь соседние слои, отсутствует, поэтому активизация процессов смешения должна достигаться другими способами.

В сыпучих материалах смешение возможно под действием сил инерции и гравитации, как, например, в песочных часах (рис. 1, в), где ссыпание в нижнюю емкость происходит одновременно с разных слоев, чем обеспечивается смешение. При смешении в объеме лопатка должна захватить часть среды в одном месте и перенести в другое. Из-за отсутствия вязких сил, способных вовлечь соседние слои, необходимо пройти все точки перемешиваемого объема. По мере движения часть захваченного объема осыпается, на ее место поступают новые порции среды. Траектория движения рабочего органа смесителя с учетом ее сечения в этом случае должна пройти все точки объема хотя бы единожды за цикл.

В статье [1] приведен способ синтеза законов движения двигателей двухподвижного рычажного механизма плоского смесителя по заданной траектории конечного звена.

Для одного и того же механизма способ позволяет получать бесконечное число вариантов сколь угодно сложных плоских траекторий движения конечного звена простым пере-программированием законов движения двух управляющих двигателей. Добавив к выходному звену вертикально двигающийся ползун с лопatkой на нижнем конце, мы получим четырехзвенный трехподвижный механизм для перемешивания в объеме (рис. 2).

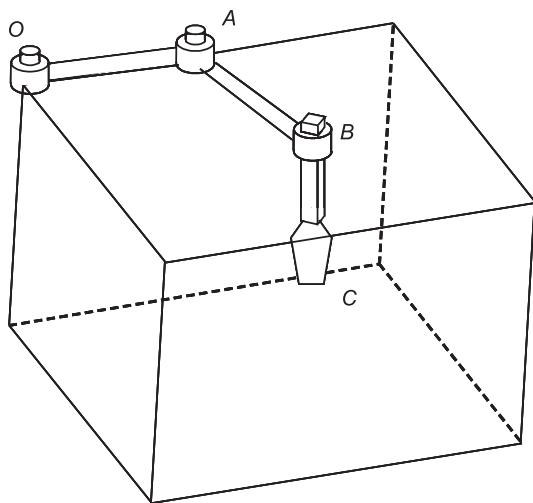


Рис. 2. Четырехзвенный механизм смесителя

перечного сечения рабочего органа смесителя на длину пройденного пути.

Сначала рассчитаем длину пройденного пути рабочего органа смесителя для двухподвижного трехзвенного рычажного плоского механизма [1].

Приводим в движение первый из управляющих двигателей — делаем поворот на Δu . При этом точка переместится на

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial u} \Delta u, \quad \Delta y = \frac{\partial y}{\partial u} \Delta u, \quad \Delta z = \frac{\partial z}{\partial u} \Delta u \quad (\text{точнее, } \Delta x = \frac{\partial x}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} \Delta t \dots).$$

Теперь приведем в движение второй из управляющих двигателей, делаем поворот на Δv . Точка переместится на

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial v} \Delta v, \quad \Delta y = \frac{\partial y}{\partial v} \Delta v, \quad \Delta z = \frac{\partial z}{\partial v} \Delta v.$$

Суммарное перемещение, записанное с применением алгебры альтернионов [1, 2]:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{r} &= \left(i_1 \frac{\partial x}{\partial v} \Delta v + i_2 \frac{\partial y}{\partial v} \Delta v + i_3 \frac{\partial z}{\partial v} \Delta v \right) + \left(i_1 \frac{\partial x}{\partial u} \Delta u + i_2 \frac{\partial y}{\partial u} \Delta u + i_3 \frac{\partial z}{\partial u} \Delta u \right) = \\ &= i_1 \left(\frac{\partial x}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial x}{\partial u} \Delta u \right) + i_2 \left(\frac{\partial y}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial y}{\partial u} \Delta u \right) + i_3 \left(\frac{\partial z}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial z}{\partial u} \Delta u \right). \end{aligned}$$

Сделаем замену $\Delta\bar{r} = i_1a + i_2b + i_3c$. Вычислим пройденный путь:

$$\begin{aligned}\Delta s^2 &= |\Delta r|^2 = \Delta\bar{r} \otimes \Delta\bar{r} = \{i_1a; i_2b; i_3c\} \otimes \{i_1a; i_2b; i_3c\} = \\ &= \begin{vmatrix} i_1a \otimes i_1a & i_1a \otimes i_2b & i_1a \otimes i_3c \\ i_2b \otimes i_1a & i_2b \otimes i_2b & i_2b \otimes i_3c \\ i_3c \otimes i_1a & i_3c \otimes i_2b & i_3c \otimes i_3c \end{vmatrix}.\end{aligned}$$

Используя алгебру альтернионов $i_2 \otimes i_3 = i_1$, с учетом антикоммутативности $i_2 \otimes i_3 = -i_3 \otimes i_2$ получим

$$\Delta\bar{r} \otimes \Delta\bar{r} = \begin{vmatrix} -1aa & i_3ab & i_2ac \\ -i_3ba & -1bb & i_1bc \\ -i_2ca & -i_1cb & 1c \otimes i_3c \end{vmatrix}.$$

Здесь недиагональные члены взаимно уничтожаются:

$$\Delta\bar{r} \otimes \Delta\bar{r} = -a^2 - b^2 - c^2;$$

« $-$ » — это знак пространственной части в пространственно-временном интервале. В случае, когда мы рассматриваем только пространственную часть, квадрат длины принимает положительное значение:

$$|\Delta r|^2 = a^2 + b^2 + c^2,$$

где

$$\begin{aligned}a^2 &= \left(\frac{\partial x}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial x}{\partial u} \Delta u \right)^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 \Delta^2 v + 2 \frac{\partial x}{\partial v} \frac{\partial x}{\partial u} \Delta v \Delta u + \left(\frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 \Delta^2 u; \\ b^2 &= \left(\frac{\partial y}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial y}{\partial u} \Delta u \right)^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial v} \right)^2 \Delta^2 v + 2 \frac{\partial y}{\partial v} \frac{\partial y}{\partial u} \Delta v \Delta u + \left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 \Delta^2 u; \\ c^2 &= \left(\frac{\partial z}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial z}{\partial u} \Delta u \right)^2 = \left(\frac{\partial z}{\partial v} \right)^2 \Delta^2 v + 2 \frac{\partial z}{\partial v} \frac{\partial z}{\partial u} \Delta v \Delta u + \left(\frac{\partial z}{\partial u} \right)^2 \Delta^2 u;\end{aligned}$$

$$\Delta l = \sqrt{|\Delta r|^2}.$$

Квадрат дифференциала дуги траектории двухподвижного механизма полностью совпадает с известным квадратом дифференциала дуги [3] в трехмерном евклидовом пространстве, что подтверждает правомочность использования алгебры альтернионов. Однако полученные зависимости описывают длину дуги только на поверхности. Для определения траектории в объеме выполним по описанному алгоритму исследование трехподвижного механизма.

Приведем в движение первый из управляющих двигателей — делаем поворот на Δu . При этом точка на конце первого звена переместится на

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial u} \Delta u, \Delta y = \frac{\partial y}{\partial u} \Delta u, \Delta z = \frac{\partial z}{\partial u} \Delta u.$$

Приведем в движение второй из управляющих двигателей, делаем поворот на Δv . Точка переместится на

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial v} \Delta v, \Delta y = \frac{\partial y}{\partial v} \Delta v, \Delta z = \frac{\partial z}{\partial v} \Delta v.$$

Теперь приведем в движение третий из управляющих двигателей, делаем поворот на $\Delta\omega$. При этом точка переместится на

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial \omega} \Delta\omega, \quad \Delta y = \frac{\partial y}{\partial \omega} \Delta\omega, \quad \Delta z = \frac{\partial z}{\partial \omega} \Delta\omega.$$

Суммарное перемещение, записанное с применением вышеописанного алгоритма:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{r} = & \left(i_1 \frac{\partial x}{\partial v} \Delta v + i_2 \frac{\partial y}{\partial v} \Delta u + i_3 \frac{\partial z}{\partial v} \Delta u \right) + \left(i_1 \frac{\partial x}{\partial u} \Delta v + i_2 \frac{\partial y}{\partial u} \Delta u + i_3 \frac{\partial z}{\partial u} \Delta u \right) + \\ & + \left(i_1 \frac{\partial x}{\partial \omega} \Delta \omega + i_2 \frac{\partial y}{\partial \omega} \Delta \omega + i_3 \frac{\partial z}{\partial \omega} \Delta \omega \right) = i_1 \left(\frac{\partial x}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial x}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial x}{\partial \omega} \Delta \omega \right) + \\ & + i_2 \left(\frac{\partial y}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial y}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial y}{\partial \omega} \Delta \omega \right) + i_3 \left(\frac{\partial z}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial z}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial z}{\partial \omega} \Delta \omega \right) = i_1 a + i_2 b + i_3 c. \end{aligned}$$

Далее процедуры повторяются, вплоть до $|\Delta r^2| = a^2 + b^2 + c^2$.

Теперь раскроем замену переменных:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial x}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial x}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial x}{\partial \omega} \Delta \omega \right)^2 &= \left(\frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 \Delta^2 v + 2 \frac{\partial x}{\partial v} \frac{\partial x}{\partial u} \Delta v \Delta u + \\ &+ \left(\frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 \Delta^2 u + 2 \frac{\partial x}{\partial v} \frac{\partial x}{\partial \omega} \Delta v \Delta \omega + \left(\frac{\partial x}{\partial \omega} \right)^2 \Delta^2 \omega + 2 \frac{\partial x}{\partial u} \frac{\partial x}{\partial \omega} \Delta u \Delta \omega; \\ \left(\frac{\partial y}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial y}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial y}{\partial \omega} \Delta \omega \right)^2 &= \left(\frac{\partial y}{\partial v} \right)^2 \Delta^2 v + 2 \frac{\partial y}{\partial v} \frac{\partial y}{\partial u} \Delta v \Delta u + \\ &+ \left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 \Delta^2 u + 2 \frac{\partial y}{\partial v} \frac{\partial y}{\partial \omega} \Delta v \Delta \omega + \left(\frac{\partial y}{\partial \omega} \right)^2 \Delta^2 \omega + 2 \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial y}{\partial \omega} \Delta u \Delta \omega; \\ \left(\frac{\partial z}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial z}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial z}{\partial \omega} \Delta \omega \right)^2 &= \left(\frac{\partial z}{\partial v} \right)^2 \Delta^2 v + 2 \frac{\partial z}{\partial v} \frac{\partial z}{\partial u} \Delta v \Delta u + \\ &+ \left(\frac{\partial z}{\partial u} \right)^2 \Delta^2 u + 2 \frac{\partial z}{\partial v} \frac{\partial z}{\partial \omega} \Delta v \Delta \omega + \left(\frac{\partial z}{\partial \omega} \right)^2 \Delta^2 \omega + 2 \frac{\partial z}{\partial u} \frac{\partial z}{\partial \omega} \Delta u \Delta \omega. \end{aligned}$$

Сумма всех этих членов составляет квадрат длины дуги.

Находим приращение $\Delta l = \sqrt{|\Delta r^2|}$. Фактическая длина дуги

$$l = \iiint \sqrt{|\Delta r^2|} du dv d\omega [\text{м}].$$

Если поперечный размер области захвата лопатки смесителя имеет размер S , м², то объем V_{cm} , м³, вовлеченный в смешение, за один цикл при условии однократного прохождения лопаткой через данную точку траектории будет $V_{cm} = lS$.

Эффективность смесителя может характеризоваться величиной $\varepsilon = \frac{V_{cm}}{V}$, где V — фактический объем емкости смесителя.

Полученные аналитические зависимости внешне сложны, однако их решение с применением вычислительных средств не представляет сложности.

Аналогичный метод может быть применен для механизмов с числом обобщенных координат больше трех. Так, для шестикоординатного агрегата

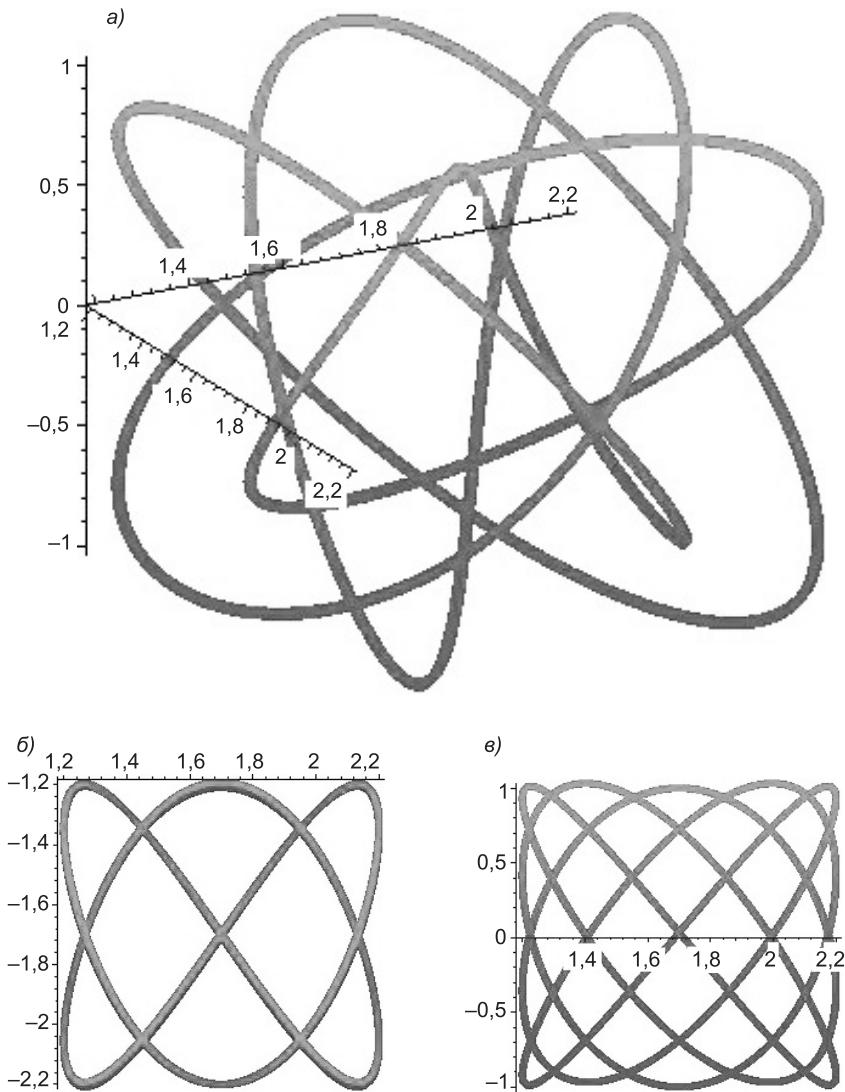


Рис. 3. Движение конечного звена трехподвижного механизма смесителя в емкости с квадратным сечением дна
 а) вид в аксонометрии; б) вид сверху; в) вид сбоку

гата будем иметь шесть обобщенных координат: три пространственные координаты положения и три угла поворота.

Пример использования трехподвижного механизма в качестве смесителя в емкости в виде параллелепипеда представлен на рисунках. На рис. 3 для иллюстрации характера движения отражена траектория конечного звена с упрощенным законом движения. Видно, что характер движения конечного звена плавный, равномерно покрывает разные участки емкости, но недостаточно плотно охватывает весь внутренний объем. Увеличив количество петель (рис. 4), добьемся необходимого результата. Координаты конечной точки C механизма зададим в следующем виде:

$$X_C = 0,25\cos(13t), \quad Y_C = 0,25\sin(12t), \quad Z_C = 0,5\sin(29t).$$

Две из них (X_C, Y_C) определяют траекторию — циклоиду в плоскости крышки механизма, координата Z_C задает глубину погружения конечной точки конечного звена — лопасти смесителя. В изложенном варианте ме-

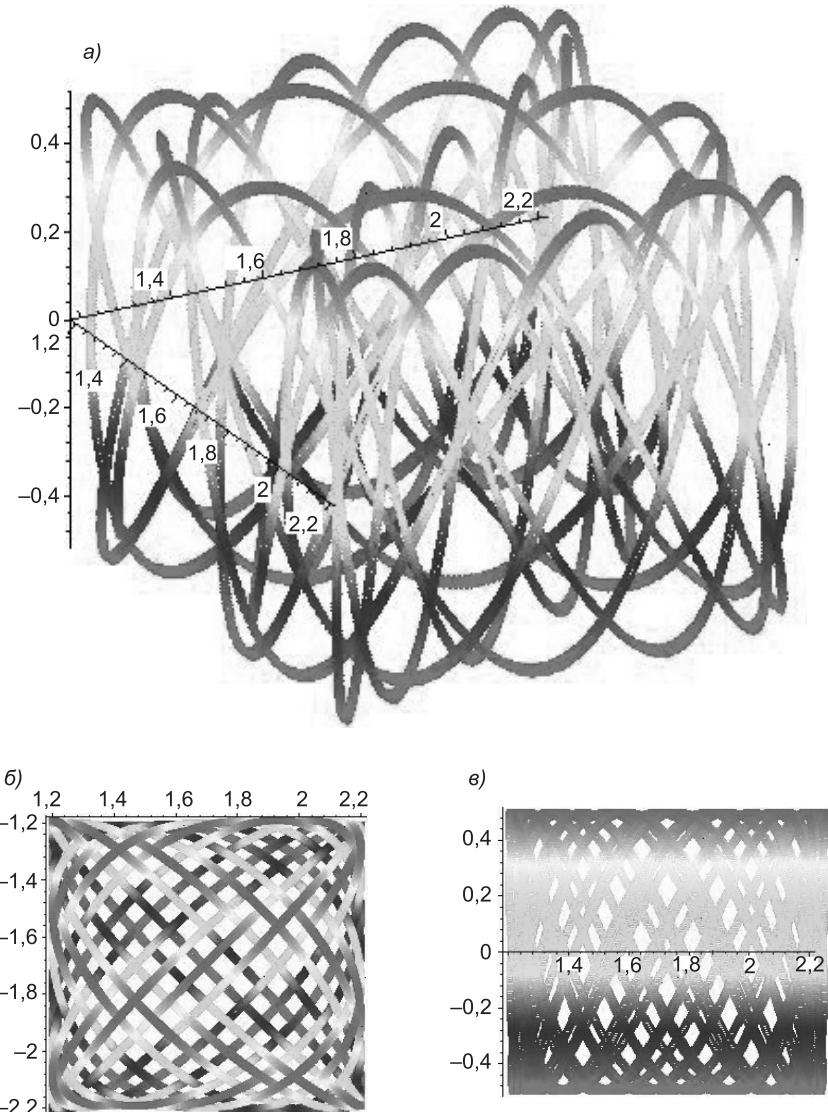


Рис. 4. Движение конечного звена трехподвижного механизма смесителя в емкости с квадратным сечением дна
 а) вид в аксонометрии; б) вид сверху; в) вид сбоку

ханизм работает в сосуде с дном в форме квадрата. Изменив законы движения конечной точки, можно перепрограммировать один и тот же механизм для работы в емкости с любой формой дна — круглой, треугольной, как это было сделано в [1].

Каждая из траекторий представляет собой свернутую в пространстве синусоиду, «упакованную» в куб. Такая траектория остается всюду пологой, что обеспечивает минимальные нагрузки на кинематические пары. При этом она равномерно покрывает весь объем емкости смесителя, что обеспечивает вовлечение всех частей емкости в процесс смешения.

По предложенной методике рассчитана длина пути смешения лопатки смесителя. В кубической емкости размерами $1 \times 1 \times 1$ м для указанных законов движения длина пути составила 26,87 м. Поделив исходный объем куба на длину пути, получим рекомендуемые площадь и диаметр лопатки смесителя:

$$S_{\text{д}} = \frac{1}{26,87} = 0,0372 \text{ м}^2, \quad d_{\text{д}} = 15,4 \text{ см.}$$

Выводы. 1. Показано, что квадрат дифференциала дуги определяет длину траектории, лежащей на поверхности, которая описывается двумя обобщенными координатами. Таким образом, это справедливо только для двухподвижных механических систем.

2. Для расчета длины траектории конечного звена механизма с подвижностью более двух удобно использовать предложенную модель.

3. Предложен метод оценки эффективности работы смесителя с тремя программируемыми координатами для смешивания нанопорошков в неподвижной емкости.

4. Созданная программа позволяет по заданной траектории конечного звена синтезировать законы движения — перемещения в поступательных парах и углы поворота во вращательных парах механизма, задав траекторию конечного звена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гилета, В.П. Кинематический анализ механизмов с использованием ряда Тейлора [Текст] / В.П. Гилета, Б.В. Юдин // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 6. — С. 55–61.
2. Юдин, Б.В. Применение тензорного исчисления при анализе механических систем [Текст] / Б.В. Юдин // Механика технических систем : Тр. науч. школ НГТУ / Отв. ред. Н.В. Пустовойт. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. — С. 135–143.
3. Корн, Г. Справочник по математике (для науч. работников и инженеров) [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. — М. : Наука, 1977.

ГИЛЕТА В.П., д-р техн. наук, проф.; E-mail: pmx08@mail.ru
 Новосибирский государственный технический университет
 ЮДИН Б.В., канд. техн. наук, доц.; E-mail: tarpan_sib@mail.ru
 Новосибирский государственный технический университет

Получено 22.09.10

Gileta V.P., doctor of technical sciences, professor, E-mail: pmx08@mail.ru, Novosibirsk State Technical University, Russia

Yudin B.V., candidate of technical sciences, assistant professor, E-mail: tarpan_sib@mail.ru, Novosibirsk State Technical University, Russia

INCREASE OF AN OVERALL PERFORMANCE OF THE AMALGAMATOR FOR NANO POWDER

Expression for length of a way for the mechanism with degree of freedom 3 is received. The mechanism for mixing thin powders is offered.

Key words: kinematic synthesis of mechanisms, mixture of nano powder, length of a trajectory.

REFERENCES

1. Gileta, V.P. The kinematic analysis of mechanisms with help of Taylor series [Text] / V.P. Gileta, B.V. Yudin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 6. — P. 55–61.
2. Yudin, B.V. Application of tensor calculations at the analysis of mechanical systems [Text] / B.V. Yudin // Mechanics of technical systems : works of scientific schools NSTU / Ed. N.V. Pustovojt. — Novosibirsk : Publ. House NSTU, 2008. — P. 135–143.
3. Korn, G. Mathematical handbook (for scientist and engineers) [Text] / G. Korn, T. Korn. — M. : Science, 1977.

УДК 699.86

Р.А. НАЗИРОВ, Е.Н. ЗАХАРЬИН, Д.Р. НАЗИРОВ

**ОБОСНОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСНЫХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗНАЧЕНИЯ
ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ СНИЖЕНИЯ
ТРЕБУЕМОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ
ПРИ РАСЧЕТАХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Разработана методика определения значения допустимого уровня снижения требуемого сопротивления теплопередаче (K_R) наружных ограждающих конструкций зданий, по которой предлагается определять K_R для каждого здания индивидуально по значению удельного расхода тепловой энергии на отопление, которое соответствует граничному значению между классами энергоэффективности «нормальный» и «низкий» согласно положениям СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий.

Ключевые слова: сопротивление теплопередаче, долговечность, ограждающая конструкция, методика, энергоэффективность.

Объем применения эффективных теплоизоляционных материалов на основе пенополистирола в строительной отрасли увеличивается с каждым годом. Во всем мире в настоящее время все большее распространение получает экструзионный пенополистирол, новые изделия из которого обладают высокими теплоизоляционными свойствами (рис. 1) [1].

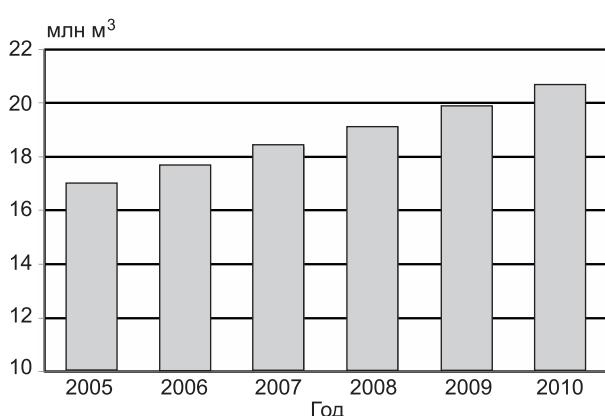


Рис. 1. Рост мирового спроса на экструзионный полистирол [1]

новых конструктивных решений ограждающих конструкций зданий с использованием высокоэффективных теплоизоляционных материалов, имеющих теплопроводность $0,045 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и ниже, особенно на территориях с суровыми климатическими условиями.

К сожалению, на сегодняшний день отсутствует общепринятая методика оценки долговечности теплоизоляционных материалов, что станов-

ится причиной отсутствия широкого внедрения таких конструкций. Развитию теплоизоляционных материалов в нашей стране способствовало ужесточение требований по тепловой защите зданий и сооружений, реализованное в нормативных документах [2, 3] за период с 1995 по 2004 г. Увеличение нормируемого сопротивления теплопередаче R_{req} наружных ограждающих конструкций примерно в 3 раза в среднем по РФ способствовало разработке и внедрению

вится все более актуальной проблемой на фоне возрастающего их потребления на строительном рынке. Проведенные исследования по определению долговечности пенополистирольных теплоизоляционных материалов в нашей стране имеют несопоставимые результаты. Срок эксплуатации пенополистирольных утеплителей, по различным источникам, оценивается в среднем от 10 до 100 лет.

Согласно феноменологической методике прогнозирования и расчета долговечности, разработанной д-ром техн. наук, проф. С.В. Александровским [4] в НИИСФ РААСН, долговечность Θ наружной ограждающей конструкции по снижению ее теплозащитных свойств определяется по формуле

$$\Theta = \frac{K_R R_{\text{req}} \lambda_T^2(w)}{[\delta_T - \lambda_T(w) K_R R_{\text{req}}] \Delta \bar{\lambda}(w)}, \quad (1)$$

где R_{req} — нормируемое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции по [2], $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$;

$\lambda_T(w)$ — коэффициент теплопроводности утеплителя, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

δ_T — толщина слоя утеплителя, м;

$\Delta \lambda^{\text{ср}}(w)$ — повышение теплопроводности утеплителя $\lambda_T(w)$ за один среднестатистический год эксплуатации ограждения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

K_R — допустимая (нормируемая) степень снижения начального приведенного сопротивления теплопередаче наружной ограждающей конструкции R_0 . Имеются различные рекомендации по оценке величины K_R , которыми можно было бы пользоваться при расчетах.

Снижение R_0 в процессе эксплуатации ограждения в основном обусловлено увеличением коэффициента теплопроводности утеплителя λ_0 , как это видно из формулы [3]

$$R_0 = 1/\alpha_{\text{int}} + \sum \delta_i / \lambda_i + 1/\alpha_{\text{ext}}, \quad (2)$$

где α_{int} , α_{ext} — коэффициенты теплоотдачи наружного и внутреннего воздуха, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

δ_i — толщина i -го слоя конструкции, м;

λ_i — коэффициент теплопроводности i -го слоя конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

В наружных ограждающих конструкциях λ_0 может увеличиваться из-за протекающих в теплоизоляционном материале процессов деструкции, повышения его влажности, деформаций и пр.

В расчетах по определению долговечности ограждения (снижению его теплоизоляционных свойств) использовано значение $K_R = 5\%^1$.

Российским обществом инженеров строительства (РОИС) принято, что первый капитальный ремонт наружных ограждающих конструкций из условий недопустимости нарушения санитарно-гигиенических требований и энергосбережения необходимо проводить при снижении R_0 не более чем на 15 % относительно R_{req} .

На наш взгляд, K_R должно иметь такое значение, при котором суммарное увеличение затрат на эксплуатационное обслуживание здания по сравнению с затратами за первый год эксплуатации равнялось бы

¹ СТО 00044807-001-2006. Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий / РОИС. М.: ФГУП ЦПП, 2006. 67 с.

стоимости восстановления теплоизоляционного слоя на теплотехнические показатели первоначального уровня:

$$P(K_R) = \sum_2^n (S_n - S_1). \quad (3)$$

Здесь P — стоимость восстановления теплоизоляционного слоя ограждающих конструкций здания до уровня первоначальных (проектных) теплотехнических показателей, руб.;

S_n — суммарные затраты на эксплуатационное обслуживание здания за n -й год эксплуатации, руб.;

S_1 — суммарные затраты на эксплуатационное обслуживание за первый год эксплуатации, руб.;

n — количество лет безремонтной эксплуатации.

При этом следует иметь в виду, что снижение значения K_R должно быть ограничено соблюдением обязательных санитарно-гигиенических требований к наружным ограждающим конструкциям по [2].

Если суммарные затраты на эксплуатацию здания можно легко контролировать, например, по расходу условного топлива за отопительный период или по суммарным теплопотерям здания за определенный период, то значение P зависит от многих труднопрогнозируемых факторов.

Одним из путей обоснования значения K_R может быть метод, основанный на комплексных теплотехнических показателях зданий. В этом случае за максимально допустимое снижение величины R_0 принимается значение, при котором удельный расход тепловой энергии на отопление зданий за отопительный период соответствует граничному значению между классами энергетической эффективности «нормальный» и «низкий» [2].

Предлагается следующий алгоритм определения K_R .

1. Выполнить комплексный теплотехнический расчет ограждающих конструкций здания по проектным данным.

2. Выполнить теплотехнический расчет наружных ограждающих конструкций, содержащих эффективный утеплитель с прогрессией повышения λ_0 с шагом, обеспечивающим адекватную в рамках расчета интерполяцию.

3. Определить по [2] удельный расход тепловой энергии на отопление зданий за отопительный период (q_h^{des} , кДж/(м²·°С · сут) или кДж/(м³ · °С · сут)) при различных коэффициентах теплопроводности теплоизоляционного материала наружных ограждающих конструкций.

4. Построить и аппроксимировать зависимость между повышением λ_0 теплоизоляционного материала и q_h^{des} .

5. Определить значение коэффициента теплопроводности (λ_r) теплоизоляционного материала, которое является граничным между классами энергетической эффективности «нормальный» и «низкий» по q_h^{des} [2].

6. Определить K_R по следующей формуле:

$$K_R = 1 - R_r / R_0, \quad (4)$$

где R_r — сопротивление теплопередаче наружной ограждающей конструкции, определенное при значении коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала, равном λ_r .

В качестве примера было рассмотрено крупнопанельное 16-этажное жилое здание, принятное к строительству в г. Красноярске. Рассчитан удельный расход тепловой энергии q_h^{des} на отопление здания за отопительный период [2] при различных значениях коэффициента теплопроводности λ основного теплоизоляционного слоя наружной конструкции. В расчетах использовались значения коэффициентов теплопроводности теплоизоляционного слоя толщиной 180 мм трехслойной стеновой панели с прогрессией повышения теплопроводности на 5 %. Теплотехнический расчет наружных ограждающих конструкций выполнялся для климатических условий г. Красноярска с учетом примыкания конструкций (внутренние стены, перекрытия) на основе расчета температурных полей на сертифицированном программном комплексе Терпег-3Д.

Классы энергетической эффективности для жилых зданий в 12 этажей и более по [2] представлены в таблице.

Классы энергетической эффективности для жилых зданий в 12 и более этажей

Класс энергетической эффективности	Отклонение фактического значения q_h^{des} от нормативного, %	Допустимые значения фактического значения q_h^{des} для жилых зданий в 12 и более этажей	
		кДж/(м ² · °C · сут)	кДж/(м ³ · °C · сут)
Очень высокий	< -51	< 35	< 12
Высокий	-50... -10	36...63	13...22
Нормальный	-9...+5	64...73	23...26
Низкий	+6...+75	74...122	27...43
Очень низкий	> 76	> 123	> 44

По результатам расчетов построен график зависимости q_h^{des} от значения повышения λ_0 основного теплоизоляционного слоя ограждающей конструкции для данного здания (рис. 2). Из рисунка видно, что при повышении проектного значения λ_0 основного теплоизоляционного слоя ограждающей конструкции на 21 % ($\lambda_t = 0,050 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$) удельный расход тепловой энергии на отопление здания составит 26 кДж/(м³ · °C · сут), что является граничным значением между классами энергетической эффективности «нормальный» и «низкий» (рис. 3). При дальнейшем повышении λ_0 здание уже будет соответствовать классу энергетической эффективности «низкий» и «очень низкий»,

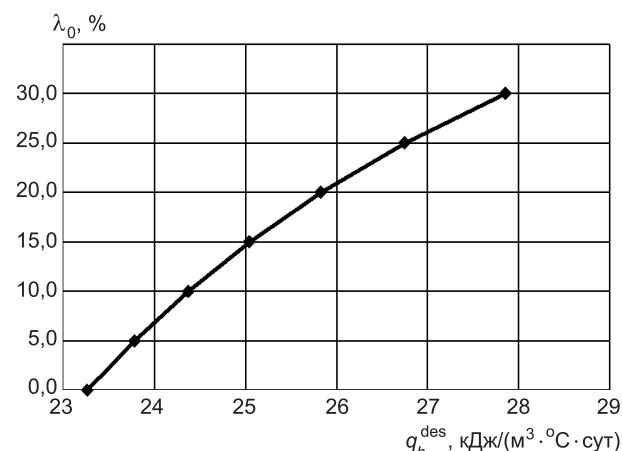


Рис. 2. Зависимость удельного расхода тепловой энергии на отопление здания от повышения коэффициента теплопроводности основного теплоизоляционного материала ограждающей конструкции

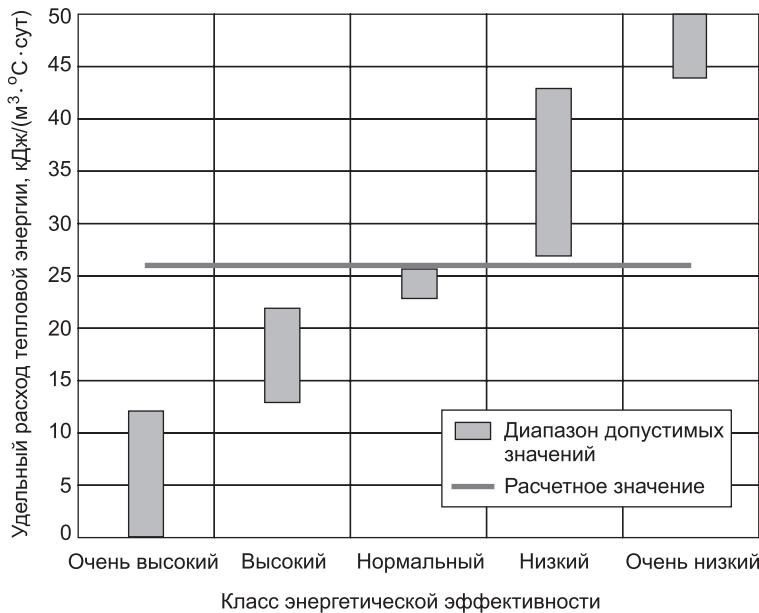


Рис. 3. Соответствие расчетного удельного расхода тепловой энергии на отопление здания классу энергетической эффективности

что говорит о повышенных эксплуатационных затратах и необходимости реконструкции.

Согласно выполненным теплотехническим расчетам при $\lambda_r = 0,050 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ по формуле (4) определяем, что K_R для данного здания составляет 14,6 %.

Данную методику можно использовать для любых жилых и общественных зданий и рассчитывать значение K_R в ходе выполнения энергетической части проектирования для определения долговечности закладываемых в проект теплоизоляционных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплоизоляция на основе полистирола: тенденции развития рынка [Текст] // Кровли. — 2007. — № 4.
2. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий [Текст]. — М. : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. — 26 с.
3. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий [Текст]. — М. : ФГУП ЦНС, 2004. — 140 с.
4. Александровский, С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций [Текст] / С.В. Александровский. — М. : НИИСФ РААСН, 2003.

НАЗИРОВ Р.А., д-р техн. наук, проф.

Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета, г. Красноярск

ЗАХАРЬИН Е.Н., инж.

Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета, г. Красноярск

НАЗИРОВ Д.Р., инж.

Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета, г. Красноярск

Получено после доработки 26.10.10

Nazirov R.A., doctor of technical sciences, professor, Institute of Engineering and Building of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Zakharin E.N., engineer, Institute of Engineering and Building of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Nazirov D.R., engineer, Institute of Engineering and Building of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

SUBSTANTIATION BY MEANS OF COMPLEX ENERGETIC INDEXES OF VALUE OF ADMISSIBLE LEVEL OF DECREASING THE REQUIRED HEAT TRANSFER RESISTANCE AT CALCULATIONS OF DURABILITY OF ENCLOSING STRUCTURES

Developed the method for determining the values of the admissible level of decreasing the required heat transfer resistance (K_R) of enclosing structures. It is proposed to determine the K_R for each building individually by the value of specific heat consumption for heating, which corresponds to the limiting value between the energy efficiency class «normal» and «low» according to the provisions of the SNiP 23-02-2003. Thermal protection of buildings.

Key words: heat transfer resistance, durability, enclosing structure, method, energy efficiency.

REFERENCES

1. Insulation on the basis of polystyrene: market trends [Text] // Krovli. — 2007. — N 4.
 2. SNiP 23-02-2003. Thermal protection of buildings [Text]. — M. : Gosstroy of Russia, SUE CNS, 2003. — 26 p.
 3. SP 23-101-2004. Design of thermal protection of buildings [Text]. — M. : FSUE CNS, 2004. — 140 p.
 4. Alexandrovsky, S.V. Durability of enclosing structures [Text] / S.V. Alexandrovsky. — M. : NIISF RAASN, 2003.
-

УДК 624.073.016.042.6

С.М. ПЕТРОВ

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА МНОГОПРОЛЕТНЫХ «СЭНДВИЧ»-ПАНЕЛЕЙ С УЧЕТОМ СДВИГА СРЕДНЕГО СЛОЯ И УПРУГОЙ ПОДАТЛИВОСТИ ОПОР

Описывается методика определения напряженно-деформированного состояния двухпролетных «сэндвич»-панелей с учетом сдвига среднего слоя из минеральной ваты на основе базальтового волокна и упругой податливости опор. Приведен укрупненный алгоритм расчета «сэндвич»-панелей по разработанной методике. Проводится сравнение результатов расчета с результатами натурных испытаний.

Ключевые слова: «сэндвич»-панель, структурированная минеральная вата на основе базальтового волокна, сдвиг среднего слоя, упругая податливость опор, методика расчета, натурные испытания, алгоритм расчета.

Панели «сэндвич» с минераловатным утеплителем нашли широкое применение в строительстве при устройстве стенового ограждения и покрытий промышленных и общественных зданий. Основное отличие конструкций таких панелей состоит в том, что средний слой представляет собой структуру, в которой волокна утеплителя ориентированы перпендикулярно плоскости обшивок. Такой материал обладает сильно выраженной ортотропией. Конструктивно утеплитель формируют из отдельных брусков прямоугольного сечения — ламелей, установленных вплотную друг к другу, но без приклеивания по боковым и торцевым граням.

Как правило, основными схемами работы «сэндвич»-панелей являются многопролетные неразрезные схемы, податливость опор в которых может оказывать существенное влияние на распределение усилий в элементах конструкции.

В данной работе предлагается алгоритм программы для расчета напряженно-деформированного состояния при изгибе неразрезных многопролетных «сэндвич»-панелей с учетом сдвига ортотропного среднего слоя и податливости опор. Алгоритм реализует разработанную автором методику расчета таких конструкций, основанную на теории составных стержней А.Р. Ржаницына.

За основу разработки расчетной модели конструкции принятые следующие положения.

1. Работа конструкции рассматривается как работа составной балки из двух брусьев, соединенных между собой по всей длине податливыми связями сдвига и абсолютно жесткими поперечными связями (рис. 1). В роли брусьев составной балки выступают обшивки панели, а в роли упругопо-

Рис. 1. Виды связей в составном стержне из двух брусьев по теории А.Р. Ржаницына

ми сдвига и абсолютно жесткими поперечными связями (рис. 1). В роли брусьев составной балки выступают обшивки панели, а в роли упругопо-

© Петров С.М., 2010

датливых связей сдвига и поперечных связей — ее средний слой. Работа материалов элементов конструкции подчиняется закону линейного деформирования. Податливость опор описывается коэффициентами упругой податливости k_i .

2. Реакции опор передаются на жесткую верхнюю обшивку через средний слой и распределяются по площадке длиной $l_{\text{sup } i}$. Размер площадки определяется как размер верхнего основания пирамиды продавливания, образованной наклонными плоскостями, проходящими под углом 45° от границы верхней грани опоры (рис. 2). Для крайних опор реакции определяются как $l_{\text{sup } 0} = b_{\text{sup}} + H$, для промежуточных опор — $l_{\text{sup } 1} = b_{\text{sup}} + 2H$. Здесь b_{sup} — ширина грани опоры, на которую опирается панель; H — толщина среднего слоя панели.

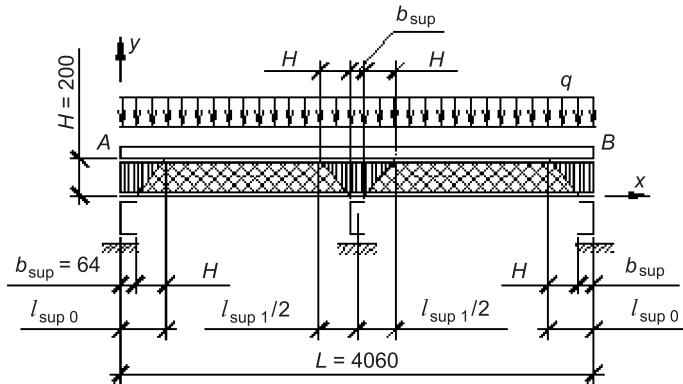


Рис. 2. Схема работы конструкции

3. Ортотропный волокнистый материал среднего слоя с существующими в нем непроклеенными стыками ламелей характеризуется приведенным модулем сдвига G_3 к модулю сдвига однородного изотропного материала [3].

Дифференциальное уравнение упругой линии балки Ржаницына, составленной из двух брусьев, имеет вид [1]

$$f^{IV}(x) - \lambda^2 f''(x) = \frac{q}{\Sigma EJ} + \lambda^2 \frac{M_0(x)}{EJ_0}. \quad (1)$$

Здесь ΣEJ — сумма изгибных жесткостей брусьев составной балки;

$\varepsilon = G_3(b/h)$ — коэффициент жесткости упругих связей сдвига;

G_3 — приведенный модуль сдвига материала среднего слоя;

b — ширина его сечения, h — расстояние между осями брусьев;

$\lambda = \sqrt{\varepsilon h^2 EJ_0 / (EJ_{sw} \Sigma EJ)}$ — характеристическое число дифференциального уравнения (1);

$EJ_{sw} = h^2 \Pi EA / \Sigma EA$ — жесткость конструкции составной балки на изгиб, достигаемая за счет разнесения обшивок на расстояние h ;

ΣEA и ΠEA — соответственно сумма и произведение жесткостей на сжатие сечений брусьев составной балки;

$EJ_0 = \Sigma EJ + EJ_{sw}$ — полная изгибная жесткость сечения балки;

q — распределенная нагрузка, приложенная к балке;

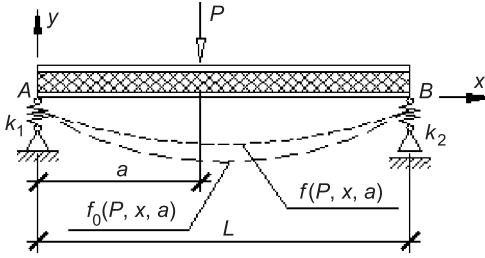


Рис. 3. Расчетная схема составной балки

$M_0(x)$ — изгибающий момент от внешней нагрузки, воспринимаемый всем сечением конструкции.

Для балки, представленной на рис. 3, автором было получено решение уравнения (1), в котором учитывается упругая податливость опор:

$$f(P, x, a) = \begin{cases} f_0(P, x, a) - \frac{P}{\lambda^3} \frac{EJ_{sw}}{EJ_0 \Sigma EJ} \left[\frac{\operatorname{sh}(\lambda(L-a)) \operatorname{sh}(\lambda x)}{\operatorname{sh}(\lambda L)} - \frac{\lambda(L-a)x}{L} \right], \\ \text{если } x \leq a; \\ f_0(P, x, a) - \frac{P}{\lambda^3} \frac{EJ_{sw}}{EJ_0 \Sigma EJ} \left[\frac{\operatorname{sh}(\lambda a) \operatorname{sh}(\lambda(L-x))}{\operatorname{sh}(\lambda L)} - \frac{\lambda a(L-x)}{L} \right], \\ \text{если } x > a, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$f_0(P, x, a) = \begin{cases} \frac{-P}{EJ_0} \left(\frac{(L-a)x^3}{6L} - \frac{(2L-a)(L-a)ax}{6L} \right) + \\ + \frac{P[k_1(L-a)(L-x) + k_2ax]}{L^2}, & \text{если } x \leq a; \\ \frac{-P}{EJ_0} \left(\frac{(L-a)x^3}{6L} - \frac{(2L-a)(L-a)ax}{6L} - \frac{(x-a)^3}{6} \right) + \\ + \frac{P[k_1(L-a)(L-x) + k_2ax]}{L^2}, & \text{если } x > a. \end{cases} \quad (3)$$

Выражение (3) представляет собой уравнение упругой линии монолитной балки с жесткостью сечения EJ_0 . Входящие в него величины k_1 и k_2 — коэффициенты упругой податливости правой и левой опор.

Выражения (2) и (3) положены в основу разработанной автором методики и алгоритма расчета «сэндвич»-панелей. При разработке методики расчета была рассмотрена многопролетная «сэндвич»-панель, загруженная произвольной нагрузкой (рис. 4, а).

Для определения неизвестных опорных реакций в заданной схеме выбирается основная система метода сил (рис. 4, б). Количество отбрасываемых связей равно степени внешней статической неопределенности исходной системы (n). Взамен отброшенных связей к основной системе прикладываются погонные нагрузки интенсивностью $q_{sup i} = X_i / l_{sup i}$, пределенные на участке длиной $l_{sup i}$.

Для рассматриваемой «сэндвич»-панели можно составить систему из n канонических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} X_1 \delta_{11} + X_2 \delta_{12} + \dots + X_{(n-1)} \delta_{1(n-1)} + X_n \delta_{1,n} + \delta_{1,p} &= X_1 k_1, \\ X_1 \delta_{21} + X_2 \delta_{22} + \dots + X_{(n-1)} \delta_{2(n-1)} + X_n \delta_{2,n} + \delta_{2,p} &= X_2 k_2, \\ \dots \\ X_1 \delta_{n,1} + X_2 \delta_{n,2} + \dots + X_{(n-1)} \delta_{n(n-1)} + X_n \delta_{n,n} + \delta_{n,p} &= X_n k_n. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

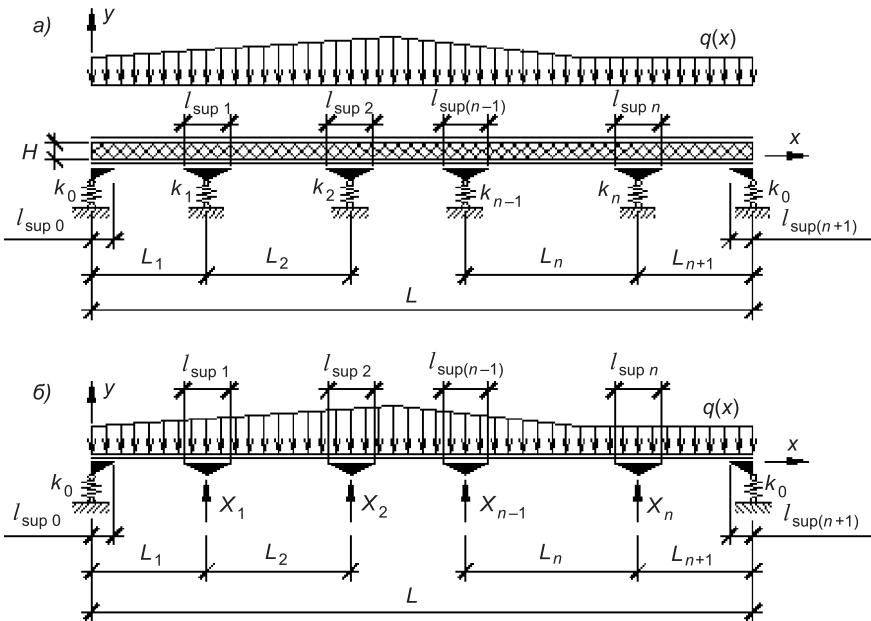


Рис. 4. Заданная схема работы конструкции (а) и выбранная основная система метода сил (б)

Здесь $\delta_{i,j}$ — перемещение по направлению связи i , вызванное действием погонной нагрузки $q_{sup j} = \bar{X}_j / l_{sup j} = 1 / l_{sup j}$, приложенной взамен реакции опоры j ;

$\Delta_{i,p}$ — перемещение точек упругой линии панели над осью i -й опоры в грузовом состоянии;

X_i — неизвестная реакция опоры i ;

k_i — коэффициент податливости упругой опоры i ($i, j = 1, 2, \dots, n$).

В правой части каждого уравнения системы (4) стоит перемещение i -й упругой опоры от действия на нее реакции панели X_i . Значения свободных членов $\Delta_{i,p}$ и коэффициентов податливости $\delta_{i,j}$ системы (4) могут быть определены с помощью выражения (2).

На рис. 5, а представлено грузовое состояние основной системы. В соответствии с выбранной схемой свободный член $\Delta_{i,p}$ системы уравнений (4) можно определить путем интегрирования выражения (2):

$$\Delta_{i,p} = \int_0^L q(x) f(1, a_i, x) dx - q_{sup 0} \int_0^{l_{sup 0}} f(1, a_i, x) dx - q_{sup(n+1)} \int_{L-l_{sup(n+1)}}^L f(1, a_i, x) dx. \quad (5)$$

Здесь $q(x)$ — функция внешней нагрузки;

$l_{sup 0}$ — ширина площадки передачи реакции опор;

$q_{sup 0} = V_A / l_{sup 0}$ и $q_{sup(n+1)} = V_B / l_{sup(n+1)}$ — величины погонных нагрузок, которые прикладываются вместо сосредоточенных опорных реакций V_A и V_B (рис. 4, а);

$f(1, a_i, x)$ — выражение (2), определяющее прогиб в сечении a_i для составной балки, на которую действует сосредоточенная сила P , равная единице, в сечении с координатой x (координаты a_i и x отсчитываются от крайней левой опоры).

Коэффициенты податливости $\delta_{i,j}$, входящие в (4), определяются путем рассмотрения единичных грузовых состояний по схеме, представленной на рис. 4, б:

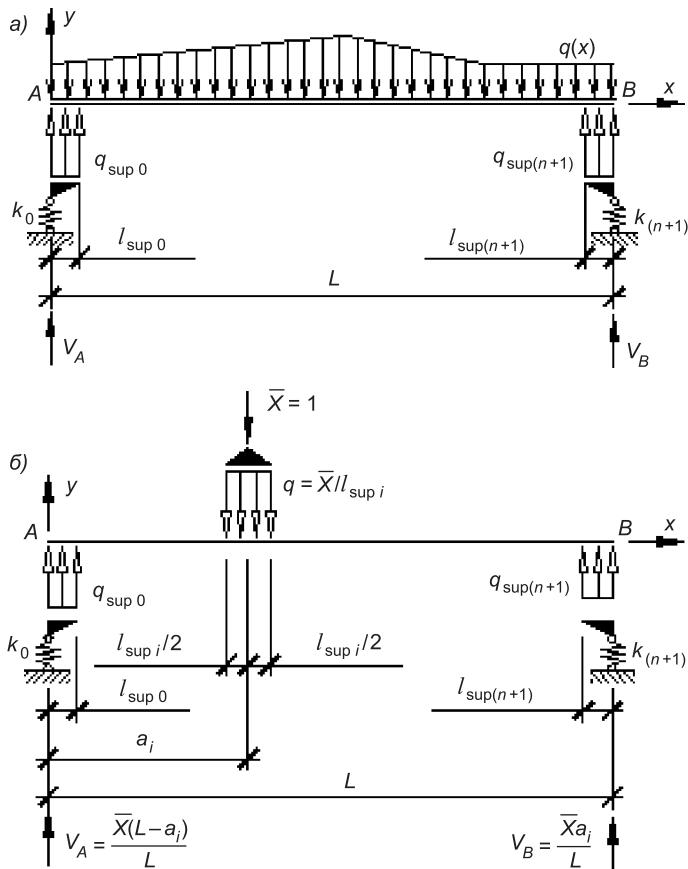


Рис. 5. К определению значений коэффициентов податливости и свободных членов системы уравнений (4)

$$\delta_{i,j} = \frac{1}{l_{sup j}} \int_{a_j - 0.5l_{sup j}}^{a_j + 0.5l_{sup j}} f(1, a_i, x) dx - \frac{L - a_j}{Ll_{sup 0}} \int_0^{l_{sup 0}} f(1, a_i, x) dx - \frac{a_j}{Ll_{sup(n+1)}} \int_{L-l_{sup(n+1)}}^L f(1, a_i, x) dx. \quad (6)$$

После решения системы уравнений (4) относительно неизвестных опорных реакций X_i может быть найдено окончательное уравнение упругой линии многопролетной «сэндвич»-панели с учетом сдвига среднего слоя и упругой податливости опор:

$$f(x) = f_p(x) + X_1 f(x, a_1) + X_2 f(x, a_2) + \dots + X_{n-1} f(x, a_{n-1}) + X_n f(x, a_n). \quad (7)$$

Уравнения упругой линии панели в единичном $f_p(x)$ и грузовом $f(x, a_i)$ состояниях, полученные после интегрирования выражения (2), имеют вид

$$f_p(x) = \int_0^L q(x) f(1, x, a) da - q_{sup 0} \int_0^{l_{sup 0}} f(1, x, a) da - q_{sup(n+1)} \int_{L-l_{sup(n+1)}}^L f(1, x, a) da; \quad (8)$$

$$f(x, a_i) = \frac{1}{l_{\sup 1}} \int_{a_i - 0.5l_{\sup 1}}^{a_i + 0.5l_{\sup 1}} f(1, x, a) da - \frac{L - a_i}{Ll_{\sup 0}} \int_0^{l_{\sup 0}} f(1, x, a) da - \\ - \frac{a_i}{Ll_{\sup(n+1)}} \int_{L - l_{\sup(n+1)}}^L f(1, x, a) da. \quad (9)$$

В выражениях (7)–(9) X_i — найденные реакции опор панели; a_i — координата оси отброшенной i -й опоры, а функция $f(1, x, a)$ определяется по выражению (2) при значении силы $P = 1$.

Из уравнения упругой линии (7) можно получить уравнения эпюор внутренних усилий, воспринимаемых как всем сечением, так и отдельными элементами панели:

— для всего сечения

$$M_0(x) = -EJ_0 f''_0(x), \quad Q_0(x) = -EJ_0 f''_0(x); \quad (10)$$

— для обшивок

$$M_i(x) = -EJ_i f''(x), \quad Q_i(x) = -EJ_i f'''(x), \\ T_i(x) = (-1)^{i-1} (EJ_0 f''_0(x) - \Sigma EJ f''(x)) / h; \quad (11)$$

— для среднего слоя

$$Q_3(x) = -EJ_0 f''_0(x) + \Sigma EJ f''(x). \quad (12)$$

Здесь индексы i соответствуют: 0 — всему сечению, 1 — верхней обшивке, 2 — нижней обшивке, 3 — среднему слою.

В выражениях (10)–(12) $Q_i(x)$ — уравнения эпюры поперечных сил; $M_i(x)$ — изгибающих моментов; $T_i(x)$ — продольных сдвигающих усилий в обшивках; $f_0(x)$ — выражение упругой линии панели, вычисленное без учета сдвига среднего слоя:

$$f_0(x) = f_{p0}(x) + X_1 f_0(x, a_1) + X_2 f_0(x, a_2) + \dots + \\ + X_{n-1} f_0(x, a_{n-1}) + X_n f_0(x, a_n). \quad (13)$$

Входящие в (13) функции $f_{p0}(x)$ и $f_0(x, a_i)$ являются выражениями упругой линии панели в грузовом и в i -м единичном состоянии, полученные без учета сдвига среднего слоя:

$$f_{p0}(x) = \int_0^L q(x) f_0(1, x, a) da - q_{\sup 0} \int_0^{l_{\sup 0}} f_0(1, x, a) da - \\ - q_{\sup(n+1)} \int_{L - l_{\sup(n+1)}}^L f_0(1, x, a) da; \quad (14)$$

$$f_0(x, a_i) = \frac{1}{l_{\sup 1}} \int_{a_i - 0.5l_{\sup 1}}^{a_i + 0.5l_{\sup 1}} f_0(1, x, a) da - \frac{L - a_i}{Ll_{\sup 0}} \int_0^{l_{\sup 0}} f_0(1, x, a) da - \\ - \frac{a_i}{Ll_{\sup(n+1)}} \int_{L - l_{\sup(n+1)}}^L f_0(1, x, a) da. \quad (15)$$

В (14) и (15) функция $f_0(1, x, a)$ определяется по выражению (3) при значении силы $P = 1$.

Используя полученные выражения (10)–(12), можно найти значения внутренних усилий и напряжений в каждом сечении элементов «сэн-

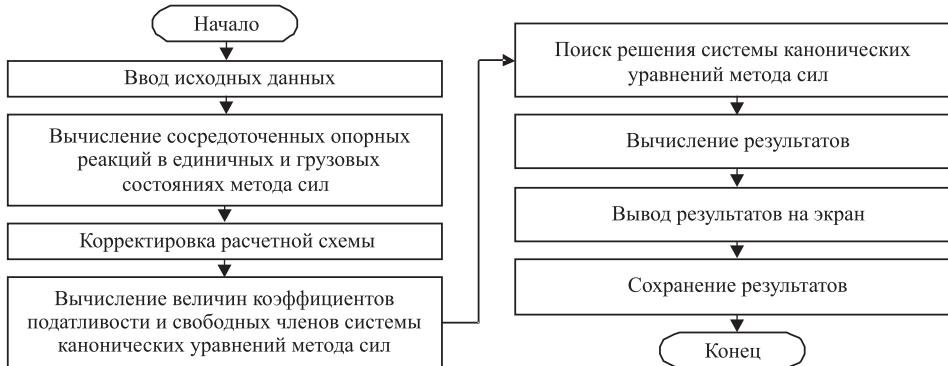


Рис. 6. Укрупненная блок-схема программы расчета «сэндвич»-панели

двич»-панели, которые будут определены с учетом сдвига ортотропного среднего слоя и упругой податливости опор.

Для реализации предложенной методики расчета «сэндвич»-панелей автором разработан алгоритм и написана программа на языке программирования C++. Укрупненная блок-схема алгоритма расчета, реализованного в программе, представлена на рис. 6. Так, на этапе *ввода исходных данных* задаются геометрия панели (ширина b и полная длина панели L , количество n и размеры L_i пролетов), параметры обшивок, среднего слоя и опор, а также внешняя нагрузка. Обшивки панели характеризуются жесткостью сечения на сжатие (EA) и изгиб (EJ) и положением центра тяжести y_c , средний слой — толщиной H , расчетной шириной сечения b , модулем деформации на сдвиг G_3 и модулем деформации на сжатие по толщине панели E_3 . Для опор задаются коэффициенты упругой податливости и ширина опорной площадки. После завершения ввода основных исходных данных на этом этапе производится расчет вспомогательных параметров конструкции: ε — коэффициент жесткости упругих связей сдвига, λ — характеристическое число дифференциального уравнения (1), EJ_{sw} — жесткость конструкции составной балки на изгиб, достигаемая за счет разнесения обшивок на расстояние h . Завершается этап заданием на конструкцию поперечной нагрузки. Формируется два массива нагрузок: от действия сосредоточенных сил и от действия распределенных нагрузок. Для формирования последнего массива панель разбивается на конечное число интервалов величиной dx , по границам которых прикладываются элементарные сосредоточенные силы величиной dP .

На этапе *вычисления сосредоточенных опорных реакций* определяются опорные реакции V_A и V_B в основной системе метода сил и в единичных грузовых состояниях, составленных в соответствии с рис. 4.

На этапе *корректировки расчетной схемы* производится замена сосредоточенных реакций на действие распределенной нагрузки по опорным площадкам длиной $l_{sup\ 0}$ и $l_{sup\ (n+1)}$ в единичных и грузовых состояниях и корректировка массивов нагрузок.

На этапе *вычисления величин коэффициентов податливости и свободных членов системы канонических уравнений метода сил* определяются значения соответствующих элементов системы уравнений (4) по выражениям (5) и (6). Интегрирование при этом производится приближенным методом — методом трапеций. Значения входящих в выражения (5) и (6) функции $f(1, x, a)$ вычисляются по заложенной в программу функции, соответствующей выражению (2).

На этапе поиска решений системы канонических уравнений метода сил осуществляется вычисление неизвестных X_i .

На этапе вычисления результатов на основании построенных выражений (7)–(12) проводится вычисление перемещений и усилий в каждом сечении элементов конструкции. Значения усилий по соотношениям (10)–(12) вычисляются с учетом заранее записанных в программу соответствующих выражений производной функции $f(1, x, a)$. Величины напряжений в сечениях элементов панели вычисляются с учетом всех действующих усилий в сечении элемента конструкции. Для обработки и хранения результатов расчета под каждую группу выходных параметров создается собственный массив. Полученные результаты расчета выводятся на экран и могут быть сохранены для последующего возобновления работы с ними.

В написанной автором программе проведен расчет «сэндвич»-панели с волокнистым средним слоем из базальтовой ваты. Схема работы, геометрические характеристики сечений элементов панели, физико-механические свойства их материалов соответствуют ранее испытанным конструкциям [2] и представлены в табл. 1 и 2 и на рис. 2. Расчет был проведен для каждой ступени нагружения до уровня нагрузки 6 кПа, соответствующего пределу линейной работы конструкции. Для каждого уровня нагрузки по результатам проведенных испытаний вычислены коэффициенты упругой податливости. Величины коэффициентов податливости определены как отношение полного перемещения сечения панели над опорой, измеренного на каждой ступени нагружения, к величине соответствующей опорной реакции.

На рис. 7 показан характерный график изменения величины нормальных напряжений в обшивках панели в зависимости от уровня нагрузки, полученный на основе расчета конструкции по предложенной методике с применением приведенного на рис. 6 алгоритма и в ходе натурных испытаний для сечений, расположенных в пролете и над средней опорой. Сплошной линией на этом рисунке показаны результаты расчета по разработанной методике, а результаты испытаний — отдельными точками.

Таблица 1
Геометрические характеристики сечений обшивок панели

Характеристика сечения и единица измерения	Верхняя обшивка ($i = 1$)	Нижняя обшивка ($i = 2$)
Площадь сечения, A_i , см ²	8,89	5,00
Момент инерции сечения, J_i , см ⁴	17,74	$1,042 \cdot 10^{-3}$
Жесткость на сжатие, EA_i , кН	183134	103000
Жесткость на изгиб, EJ_i , кН · см ²	365444,0	21,5
Расстояние от центра тяжести сечения обшивки до ее нижней грани, $y_{c,i}$, см	1,055	0,025

Таблица 2
Физико-механические характеристики материалов элементов панели

Характеристика и единица измерения	Величина
Расчетное сопротивление материала обшивок по пределу текучести, R_y , кН/см ²	24,0
Модуль упругости материала обшивок, E , кН/см ²	$2,06 \cdot 10^4$
Кратковременный условный модуль сдвига материала среднего слоя, G_3 , кН/см ²	0,4
Коэффициент поперечных деформаций материала среднего слоя, ν	0

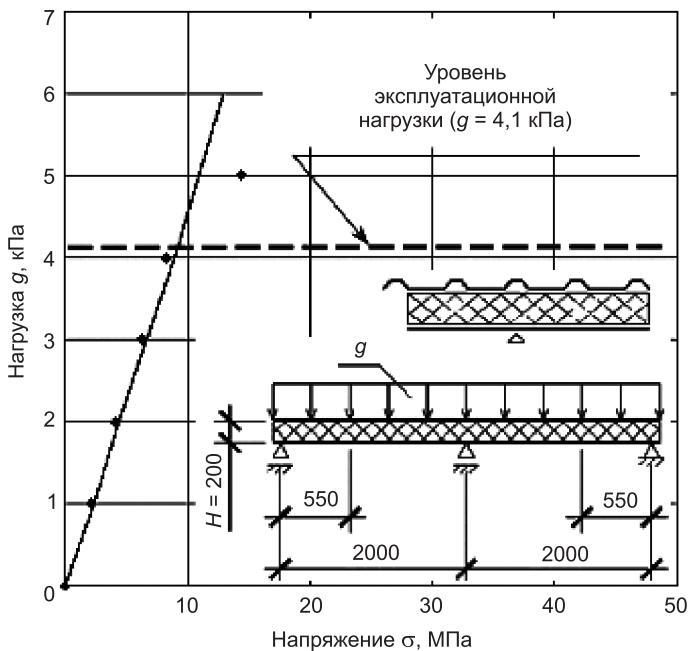


Рис. 7. Нормальные напряжения в сечении нижней обшивки, расположенном на расстоянии 550 мм от крайних опор

Таблица 3

Результаты расчета «сэндвич»-панели и экспериментальные данные при уровне нагрузки 4 кПа

Координата сечения	Результаты расчета	Результаты испытаний	Погрешность, МПа
<i>Напряжение в сечении нижней обшивки, расположенном</i>			
на расстоянии 0,55 м от крайней опоры	8,9 МПа	8,2 МПа	<u>0,7</u> (8,5 %)
на расстоянии 1,6 м от крайней опоры	4,7 МПа	5,1 МПа	<u>0,4</u> (7,8 %)
<i>Напряжение в сечении верхней полки верхней обшивки, расположенном</i>			
на расстоянии 0,55 м от крайней опоры	-26,0 МПа	-23,7 МПа	<u>2,3</u> (9,6 %)
над средней опорой	55,8 МПа	49,5 МПа	<u>6,3</u> (12,7 %)

В табл. 3 приведены результаты расчета и экспериментальные данные при уровне нагрузки 4 кПа, наиболее близком к рекомендованному эксплуатационному 4,1 кПа.

В ходе сравнения результатов проведенного расчета с экспериментальными данными установлено, что предлагаемая методика расчета «сэндвич»-панелей с учетом влияния сдвига ортотропного волокнистого среднего слоя и упругой податливости опор в пределах эксплуатационных нагрузок подтверждается результатами эксперимента. Характер изменения напряжений в зависимости от уровня действующей нагрузки совпадает с экспериментальными данными. Отклонения вычисленных значений напряжений от результатов испытаний не превышают 13 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ржаницын, А.Р. Составные стержни и пластинки [Текст] / А.Р. Ржаницын. — М. : Стройиздат, 1986. — 316 с.

2. Петров, С.М. Экспериментальные исследования работы трехслойных кровельных «сэндвич»-панелей [Текст] / С.М. Петров, Е.В. Ильдияров, Н.В. Попков и др. // Промышленное и гражданское строительство. — 2009. — № 5. — С. 44–45.
3. Петров, С.М. Определение приведенного модуля сдвига среднего слоя «сэндвич»-панелей с минераловатным утеплителем [Текст] / С.М. Петров // Проблемы оптимального проектирования сооружений: докл. I Всерос. конф. (8–10 апр., 2008 г.) / отв. за вып. Г.И. Гребенюк. — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2008. — С. 354–362.

ПЕТРОВ С.М., ассист.; E-mail: petrovsm@yandex.ru

Самарский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 22.10.10

Petrov S.M., assistant; E-mail: petrovsm@yandex.ru, Samara State Architecturally-Building University, Russia

ALGORITHM OF CALCULATION MULTI-SPAN «SANDWICH»-PANELS WITH THE REGISTRATION OF MIDDLE LAYERS SHIFT AND THE ELASTIC PLIABILITY OF SUPPORT

The procedure of a stress and strain state analysis of the multi-span «sandwich»-panels is described with the factors of the structural orthotropic mineral wool middle layers shift and the elastic pliability of supports. The integrated algorithm by the developed design procedure is presented. Comparison of «sandwich»-panels calculation results of in-place tests is given.

Key words: «sandwich»-panel, structural orthotropic mineral wool, middle layer shift, elastic pliability of supports, design procedure, in-place test, algorithm of calculation.

REFERENCES

1. Rzhanitsyn, A.R. Built-up Bars and Plates [Text] / A.R. Rzhanitsyn. — M.: Stroyizdat, 1986. — 316 p.
 2. Petrov, S.M. Experimental researches of operation three-layer roofing «sandwich»-panels [Text] / S.M. Petrov, E.V. Ildiyarov, N.V. Popkov et al. // Industrial and Civil Engineering. — 2009. — N 5. — P. 44–45.
 3. Petrov, S.M. Definition of the effective shear modulus of the structural orthotropic mineral wool middle layers of the «sandwich»-panels [Text] / S.M. Petrov // Problems of Optimal Designing of Structures: Reports of I All-Russia Conf. (8–10 Apr., 2008.) / Ed. G.I. Grebenyuk. — Novosibirsk : NSABU (Sibstrin), 2008. — P. 354–362.
-

УДК 69.057:528.48

Ю.В. СТОЛБОВ, И.П. САВИЦКИЙ, К.С. КОКУЛЕНКО

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОБОСНОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОПУСКОВ ВЫСОТНОГО
ПОЛОЖЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ**

Выполнены расчеты точности методом максимума-минимума и теоретико-вероятностным методом. Рассчитаны технологические допуски, допускаемые отклонения (пределные погрешности) и средние квадратические погрешности на изготовление строительных элементов, строительные и геодезические разбивочные работы. Предложено расчет технологических допусков выполнять вероятностным методом с применением способа равной точности. Нормирование средних квадратических погрешностей на строительные и разбивочные работы рекомендуется проводить с учетом показателей ответственности возводимых зданий.

Ключевые слова: метод расчета точности, разбивочные работы, высотное положение конструкций, технологические допуски, допускаемые отклонения, предельные погрешности, средние квадратические погрешности, показатели ответственности зданий.

В настоящее время строится большое количество многоэтажных зданий из железобетонных конструкций. При их возведении необходимо соблюдать требования по точности их высотного положения. Точность строительно-монтажных, геодезических разбивочных работ регламентируется СНиПами [1, 2], а точность изготовления конструкций — ГОСТами. Расчет точности возведения строительных конструкций зданий выполняется с применением основных положений теории размерных цепей двумя методами: максимума-минимума и теоретико-вероятностным (вероятностным).

В ГОСТ 21780–83 (СТ СЭВ 3740–82). «Расчет точности. Системы обеспечения точности геометрических параметров в строительстве» рекомендовано выполнять расчет точности вероятностным методом с применением способа попыток. Но при расчете точности с применением способа попыток нет механизма рационального распределения функционального (суммарного) допуска между технологическими допусками при решении обратной задачи. Кроме того, при расчете допусков способом попыток предполагается строгое соблюдение норм точности, регламентируемых в СНиПах [1, 2], что на практике не всегда реализуется. Но расчет технологических допусков размерных цепей вероятностным методом можно выполнять с применением не только способа попыток, но и способами равной точности и равных допусков. При расчете размерных цепей способом равных допусков функциональный допуск распределяется между технологическими допусками равномерно. Размеры всех деталей и звеньев цепи одного порядка при строительстве зданий не встречаются. Поэтому этот способ может применяться в строительстве только для предварительных расчетов.

© Столбов Ю.В., Савицкий И.П., Кокуленко К.С., 2010

Для расчета технологических допусков вероятностным методом при возведении строительных конструкций приемлемым является способ равной точности. При этом расчет сводится к определению числа единиц допуска или коэффициента точности K_{cp} по выражению

$$K_{cp}^2 = \Delta_{\Sigma}^2 / \sum_{i=1}^{n-1} I_i^2, \quad (1)$$

где I_i — единицы допусков на составляющие звенья цепи, мм;

Δ_{Σ} — суммарный допуск, мм;

n — число звеньев в цепи.

Технологические допуски определяются по выражению

$$\Delta_i = K_{cp} I_i. \quad (2)$$

Экспериментальную проверку методов расчета технологических допусков с применением разных способов выполним на примере расчета точности разбивочных и строительных работ при разработке проекта производства работ по возведению железобетонных конструкций здания серии 1.020.

Расчеты допусков на геометрические параметры проводятся на основе выявления размерных связей в конструктивно-технологических схемах зданий и их элементов, составления размерных цепей и решения уравнения точности.

В соответствии с проектируемой технологией производства строительных и геодезических разбивочных работ за базу накопления погрешностей приняты ряды средних колонн в поперечном направлении здания.

Согласно [2], разность отметок верха колонн многоэтажных зданий и сооружений зависит от яруса колонн и не должна превышать предельных отклонений, рассчитываемых по формуле

$$\delta_{\Sigma} = 12 + 2n, \quad (3)$$

где n — порядковый номер яруса колонн. Тогда функциональный и суммарный допуски будут равны $\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\phi} = 44,0$ мм.

Расчет точности методом максимума-минимума

Расчет технологических допусков этим методом можно выполнять двумя способами: равных допусков и равной точности.

Плоская размерная цепь десятиэтажного здания серии 1.020 представляет собой раму в один пролет (см. рисунок).

Уравнение размерной цепи имеет вид

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_c^{\phi} + \Delta_n^{\phi} + 5\Delta_p^k + 5\Delta_p^k + \Delta_{i1,2}^k + 2\Delta_{i3,4;7,8}^k + \Delta_{i5,6}^k + \Delta_{i9,10}^k, \quad (4)$$

где

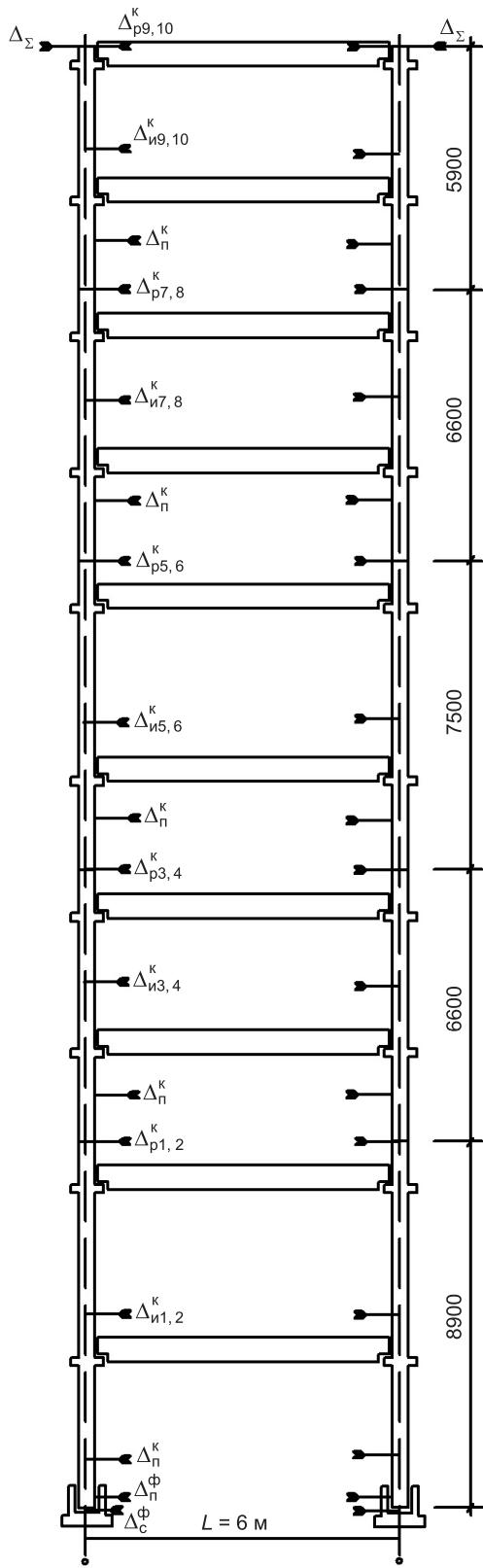
$$\Delta_c^{\phi}, \Delta_n^{\phi}, \Delta_{i1,3,5,7,9}^k, \Delta_{p3,5,7,9,10}^k, \Delta_{i1,2}^k, \Delta_{i3,4;7,8}^k, \Delta_{i5,6}^k, \Delta_{i9,10}^k$$

— соответственно допуски на устройство выравнивающего слоя по дну стакана, передачу условного горизонта в стаканы фундаментов, передачу условного горизонта на низ колонн каждого яруса, разбивку отметок на верх колонн и изготовление длин колонн на каждый ярус.

Способ равных допусков. Все допуски на составляющие звенья в размерной цепи принимаются равными:

$$\Delta_c^{\phi} = \Delta_n^{\phi} = \Delta_{i1,3,5,7,9}^k = \Delta_{p3,5,7,9,10}^k = \Delta_{i1,2}^k = \Delta_{i3,4;7,8}^k = \Delta_{i5,6}^k = \Delta_{i9,10}^k = \Delta_i,$$

тогда выражение (4) примет вид $\Delta_{\Sigma} = 17\Delta_i$, отсюда $\Delta_i = \Delta_{\Sigma} / 17 = 44 / 17 = 2,6$ мм.



Плоская размерная цепь высотного положения одного пролетного здания серии 1.020

Способ равной точности.

При расчете этим способом основная расчетная формула имеет вид

$$\Delta_{\Sigma} = K_{cp} [I_c^{\phi} + I_n^{\phi} + 5I_n^k + + 5I_p^k + I_{i1,2}^k + 2I_{i3,4;7,8}^k + + I_{i5,6}^k + I_{i9,10}^k], \quad (5)$$

где K_{cp} — число единиц допуска или коэффициент точности, принимаемый одинаковым для всех технологических операций;

I — единицы допуска, мм.

При расчете допусков на составляющие звенья размерной цепи авторами получены следующие значения:

$$I_c^{\phi} = 14,2 \text{ мм}; \quad I_n^{\phi} = 11,4 \text{ мм};$$

$$I_n^k = 11,4 \text{ мм};$$

$$I_{p3}^k = 5,3 \text{ мм}; \quad I_{p5,9}^k = 4,0 \text{ мм};$$

$$I_{p7}^k = 4,5 \text{ мм}; \quad I_{p10}^k = 3,5 \text{ мм};$$

$$I_{i1,2}^k = 22,4 \text{ мм}; \quad I_{i3,4;7,8}^k = 19,6 \text{ мм};$$

$$I_{i5,6}^k = 20,8 \text{ мм}; \quad I_{i9,10}^k = 18,7 \text{ мм}.$$

Коэффициент точности определен по выражению

$$K_{cp} = \frac{\Delta_{\Sigma}}{I_c^{\phi} + I_n^{\phi} + 5I_n^k + 5I_p^k + + I_{i1,2}^k + 2I_{i3,4;7,8}^k + I_{i5,6}^k + I_{i9,10}^k} = \frac{\Delta_{\Sigma}}{+ 44,0} = 0,21. \quad (6)$$

Технологические допуски, определяемые по выражению $\Delta_i = K_{cp}I_i$, будут иметь следующие значения, мм:

$$\Delta_c^{\phi} = 3,0; \quad \Delta_n^{\phi} = 2,4;$$

$$\Delta_n^k = 2,4; \quad \Delta_{p3}^k = 1,1;$$

$$\Delta_{p5,9}^k = 0,8; \quad \Delta_{i7}^k = 1,0;$$

$$\Delta_{p10}^k = 0,8; \quad \Delta_{i1,2}^k = 4,8;$$

$$\Delta_{i3,4;7,8}^k = 4,2; \quad \Delta_{i5,6}^k = 4,4;$$

$$\Delta_{i9,10}^k = 4,0.$$

Расчет точности теоретико-вероятностным (вероятностным) методом

Расчет технологических допусков этим методом можно выполнить тремя способами: попыток, равных допусков, равной точности.

Способ попыток (проверочный расчет). Основное уравнение размерной цепи имеет вид

$$\begin{aligned}\Delta_{\Sigma}^2 = & (\Delta_c^{\phi})^2 + (\Delta_n^{\phi})^2 + 5(\Delta_n^{\kappa})^2 + 5(\Delta_p^{\kappa})^2 + (\Delta_{i1,2}^{\kappa})^2 + \\ & + 2(\Delta_{i3,4;7,8}^{\kappa})^2 + (\Delta_{i5,6}^{\kappa})^2 + (\Delta_{i9,10}^{\kappa})^2.\end{aligned}\quad (7)$$

При использовании этого способа технологические допуски на устройство выравнивающего слоя по дну стаканов фундаментов принимаются по СНиП 3.03.01–87 [1] равными $\Delta_c^{\phi} = 10,0$ мм.

В соответствии со СНиП 3.01.03–84 [2] для зданий от 6 до 15 этажей средняя квадратическая погрешность измерения на станции не должна превышать $m_n^{\kappa} = 2,6$ мм.

Согласно [4], показатель ответственности здания $\gamma_n = 0,95$, тогда допуск на передачу отметок будет равен $\Delta_n^{\kappa} = 2tm = 4m = 4 \cdot 2,6 = 10,4$ мм.

Средняя квадратическая погрешность разбивки высотных отметок на верх колонн от риски внизу колонн до риски вверху колонн при измерении стальной рулеткой будет равна $m_p^{\kappa} = \pm 0,7$ мм, тогда допуск с учетом показателя ответственности здания $\gamma_n = 0,95$ будет $\Delta_p^{\kappa} = 4 \cdot 0,7 = 2,8$ мм.

Допуски линейных размеров, т.е. длины колонн, принимаются согласно ГОСТ 21779–82 [3]: $\Delta_{i1,2}^{\kappa} = 24,0$ мм; $\Delta_{i3,4}^{\kappa} = \Delta_{i5,6}^{\kappa} = \Delta_{i7,8}^{\kappa} = \Delta_{i9,10}^{\kappa} = 20,0$ мм.

Подставив значения технологических допусков в выражение (6), получим $\Delta_{\Sigma} = 54,4$ мм. Согласно [2], функциональный допуск Δ_{ϕ} равен 44,0 мм, т.е. $\Delta_{\Sigma} > \Delta_{\phi}$. Следовательно, собираемость строительных конструкций при соблюдении технологических допусков, заданных в нормативных документах [1–3], не будет обеспечена.

Способ равных допусков. При расчете этим способом все технологические допуски принимаются равными:

$$\Delta_c^{\phi} = \Delta_n^{\phi} = \Delta_n^{\kappa} = \Delta_p^{\kappa} = \Delta_{i1,2}^{\kappa} = \Delta_{i3,4;7,8}^{\kappa} = \Delta_{i5,6}^{\kappa} = \Delta_{i9,10}^{\kappa} = \Delta_i.$$

Тогда выражение (7) примет вид

$$\Delta_{\Sigma}^2 = 17\Delta_i^2, \quad \Delta_i^2 = \Delta_{\Sigma}^2 / 17.$$

Суммарный допуск $\Delta_{\Sigma} = 44,0$ мм, тогда $\Delta_i = 10,7$ мм.

Способ равной точности (стадия проектирования). При расчете технологических допусков этим способом для всех составляющих звеньев размерной цепи принимается средний коэффициент точности, а технологические допуски определяются по выражению $\Delta_i = K_{cp}I_i$. Тогда основное уравнение размерной цепи (7) примет вид

$$\Delta_{\Sigma}^2 = K_{cp}^2 \left[(I_c^{\phi})^2 + (I_n^{\phi})^2 + 5(I_n^{\kappa})^2 + 5(I_p^{\kappa})^2 + (I_{i1,2}^{\kappa})^2 + 2(I_{i3,4;7,8}^{\kappa})^2 + (I_{i5,6}^{\kappa})^2 + (I_{i9,10}^{\kappa})^2 \right]. \quad (8)$$

Коэффициент точности K_{cp} будет равен

$$K_{cp}^2 = \Delta_{\Sigma}^2 \sqrt{\left[(I_c^\phi)^2 + (I_n^\phi)^2 + 5(I_n^\kappa)^2 + 5(I_p^\kappa)^2 + (I_{u1,2}^\kappa)^2 + 2(I_{u3,4;7,8}^\kappa)^2 + (I_{u5,6}^\kappa)^2 + (I_{u9,10}^\kappa)^2 \right]}. \quad (9)$$

Подставив значения единиц допусков в выражение (9), получим $K_{cp} = 0,79$.

По коэффициенту точности K_{cp} и единицам допусков определяем значения технологических допусков, мм:

$$\begin{aligned} \Delta_c^\phi &= 11,1; \quad \Delta_n^\phi = 9,0; \quad \Delta_n^\kappa = 9,0; \quad \Delta_{p3}^\kappa = 4,2; \quad \Delta_{p5,9}^\kappa = 3,1; \quad \Delta_{p7}^\kappa = 3,5; \\ \Delta_{p10}^\kappa &= 2,8; \quad \Delta_{u1,2}^\kappa = 17,6; \quad \Delta_{u3,4;7,8}^\kappa = 15,4; \quad \Delta_{u5,6}^\kappa = 16,3; \quad \Delta_{u9,10}^\kappa = 14,7. \end{aligned}$$

Анализ результатов расчета точности разбивочных и строительных работ показал, что при расчетах методом максимума-минимума технологические допуски получены очень жесткие. Использование этого метода для расчета допусков высотного положения строительных конструкций не рекомендуется.

Расчеты вероятностным методом с использованием разных способов показывают различные результаты. При использовании способа попыток, рекомендованного нормативными документами, технологические допуски на строительные и разбивочные работы выбираются из СНиПов [1, 2] и стандарта [3]. Расчеты показали, что при использовании способа попыток собираемость конструкции не обеспечивается ($\Delta_{\Sigma} = 54,4$ мм $>$ $\Delta_n = 44,0$ мм), а при применении способа равных допусков значения точности на все технологические операции получены равными, что не соответствует фактическим допускам и требованиям СНиП [1].

При расчете размерных цепей вероятностным методом с использованием способа равной точности допуски на все технологические операции взаимосвязаны между собой едиными параметрами (размерами), определены по одному коэффициенту точности K_{cp} и близки к действительным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции [Текст]. — М. : Госстрой СССР, 1988. — 140 с.
2. СНиП 3.01.03-84. Геодезические работы в строительстве [Текст]. — М. : Госстрой СССР, 1985. — 28 с.
3. ГОСТ 21779-82 (СТ СЭВ 2681-80). Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски [Текст]. — М. : Изд-во стандартов, 1982. — 22 с.
4. Столбов, Ю.В. Назначение точности возведения строительных конструкций с учетом ответственности зданий и сооружений [Текст] / Ю.В. Столбов, С.Ю. Столбов // Вест. СибАДИ. — 2006. — Вып. 4. — Омск : СибАДИ. — С. 134–138.

СТОЛБОВ Ю.В., д-р техн. наук, проф.

*Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск
САВИЦКИЙ И.П., ст. препод.*

*Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск
КОКУЛЕНКО К.С., асп.*

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск

Получено после доработки 18.10.10

Stolbov Yu.V., doctor of technical sciences, professor, Sibrian State Auto-Road Academy, Omsk, Russia

Savitsky I.P., senior lecturer, Siberian State Auto-Road Academy, Omsk, Russia
Kokulenko K.S., post-graduate student, Siberian State Auto-Road Academy, Omsk, Russia

METHODS OF CALCULATION AND SUBSTANTIATION OF TECHNOLOGICAL ADMISSIONS OF ALTITUDE POSITION OF BUILDING DESIGNS AT ERECTION OF THE MULTI-STORY BUILDINGS

Calculations of accuracy by a method of a maximum-minimum and a probability-theoretic method are executed. Technological admissions, permissible deviations (limiting errors) and average quadratic errors are calculated on manufacturing of building elements, for building and geodetic marking works. It is offered to carry out calculation of technological admissions a likelihood method with application of a way of equal accuracy. Normalization of average quadratic errors for building and marking works is recommended in view of parameters of the responsibility of erected buildings.

Key words: method of calculation of accuracy, marking works, high-altitude position of designs, technological admissions, permissible deviations, limiting errors, average quadratic errors, parameters of the responsibility of buildings.

REFERENCES

1. SNiP 3.03.01–87. Bearing and enclosing structures [Text]. — M. : Gosstroy USSR, 1988. — 140 p.
 2. SNiP 3.01.03–84. Survey operations in construction [Text]. — M. : Gosstroy USSR, 1985. — 28 p.
 3. GOST 21779–82. System of ensuring of geometrical parameters accuracy in construction. Manufacturing and assembling tolerances [Text]. — M. : 1982. — 22 p.
 4. Stolbov, Yu.V. Destination of accuracy of erection of building designs in view of the responsibility of buildings and constructions [Text] / Yu.V. Stolbov, S.Yu. Stolbov // Bulletin SibADI. — 2006. — Pt 4. — Omsk : Publ. House SibADI. — P. 134–138.
-

ГИДРОФОБНАЯ ЗАЩИТА ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ

Гидрофобизация — один из наиболее эффективных способов предотвращения поглощения материалом воды.

В НГАСУ (Сибстрин) на кафедре строительных материалов и спецтехнологий разработаны новые виды гидрофобизаторов на основе кремнийорганических соединений (силанов, силоксанов), обладающих способностью химически взаимодействовать с поверхностью покрываемых изделий благодаря наличию активных функциональных групп и технологии гидрофобной обработки различных строительных материалов.

В РЕЗУЛЬТАТЕ ГИДРОФОБНОЙ ОБРАБОТКИ ОБЕСПЕЧИВАЕТСЯ:

- снижение поглощения воды поверхностью материала в 5–20 раз;
- повышение водо-, воздухо-, морозостойкости материалов в 5–10 раз;
- увеличение срока эксплуатации материалов, конструкций и в целом зданий и сооружений;
- увеличение сроков между ремонтами в 2–10 раз;
- сохранение и улучшение на 10–30 % теплотехнических характеристик ограждающих конструкций;
- улучшение внешнего вида зданий за счет устранения мокрых пятен, высолов, отслоения защитно-отделочных покрытий;
- предотвращение промокания и промерзания стыков, образования плесени;
- уменьшение капиллярного подсоса грунтовых вод.

При этом на длительный срок обеспечиваются гидрофобные свойства, не изменяется внешний вид и сохраняется воздухопроницаемость материалов стеновых конструкций.

Применение гидрофобизаторов требует соблюдения технологии. Оптимальные расход гидрофобизатора, концентрация рабочего раствора и способ обработки должны подбираться для конкретного материала индивидуально. По этим вопросам на кафедре можно получить исчерпывающую информацию.

На современном этапе развития строительной отрасли эти передовые технологии должны быть в арсенале любой строительной и ремонтно-строительной организации.

Разработчик ЕРШОВА Светлана Георгиевна

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

E-mail: ntio-ngasu@yandex.ru

Internet: www.sibstrin.ru

Тел./факс: (383) 266-28-89

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 подпись 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 редакции распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5") или диске 3,5". Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Сыг 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, инициалы, 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*;

— *аннотацию 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 *p*, *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 2010 г. — из расчета 650 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

8. Следует применять физические величины и их обозначения, соответствующие стандарту СТ. СЭВ 1052–78 (СН 528–80).

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

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 присыпать 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. *Корректура 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 2-е полугодие 2010 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 — 1080 р.

Цена отдельного номера — 180 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**

№ 10 (622) 2010

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Т.П. Петровченко*
Технический редактор *Н.М. Макаренко*
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*
Корректор *Г.И. Шведкина*