

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 551.48 : 556.1

С. В. ПИЧУГИНА

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ОБОСНОВАНИИ РЕЖИМА РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА РАВНИННЫМИ ВОДОХРАНИЛИЩАМИ В ПЕРИОД ЗИМНЕЙ МЕЖЕНИ¹

Рассматриваются специфические условия эксплуатации водохранилища сезонного регулирования в зимний период, когда имеются особые требования к уровню нижнего бьефа и повышенным объемам пусков с целью обеспечения уровней, гарантирующих работу водозаборных сооружений городов, расположенных в нижнем бьефе гидроузла. Проводится оценка вероятности сработки уровня водохранилища ниже допустимого в условиях экстремально низкого зимнего притока...

меженный сток, зимний сток, сезонное регулирование, водохранилище.

Общеизвестен факт, что регулирование стока приводит к резкому сокращению твердой фазы наносов, так как водохранилища перехватывают большую часть взвешенных и все влекомые наносы. Следствием этого является глубинная эрозия русла в нижнем бьефе гидроузлов. Она проявляется непосредственно ниже плотины, где в первые годы эксплуатации возникает зона размыва, распространяющаяся по течению. Обусловленная этим посадка уровня создает большие трудности для водопользователей, в частности для водозаборных станций, расположенных в зоне влияния эрозионного процесса. В подобных случаях возникает необходимость повышения расходов пусков для обеспечения уровня режима реки в нижнем бьефе, отвечающего созданию условий для надежного функционирования городских водозаборов. В маловодные годы ситуация сильно осложняется, если водохранилище осуществляет сезонное регулирование и имеет небольшой регулирующий объем. В силу ограниченности полезного объема в годы с особо низким зимним притоком удовлетворение указанных выше требований приводит к острому дефициту воды.

Для оценки риска, связанного с возникновением экстремальной ситуации при эксплуатации водохранилищ сезонного регулирования в зимнее время, необходимо изучить изменчивость притока в водохранилище в дефицитный по стоку период, выявить частоту экстремальных ситуаций по маловодью, провести анализ особенностей эксплуатации водохранилища в осенне-зимний период с учетом возможности проявления таких неблагоприятных факторов, как пониженный приток в водохранилище и повышенная потребность в пусках в нижний бьеф. Все это является основой для оценки частоты критических ситуаций, связанных с дефицитом

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 06-05-65076) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Изменения окружающей среды и климата: природные катастрофы» проекта 16.7.

запаса воды в водохранилище в условиях низкого зимнего притока при обеспечении необходимых расходов попусков.

Одним из ярких примеров может служить водохранилище Новосибирского гидроузла — единственное крупное водохранилище в Западной Сибири. С начала его эксплуатации под воздействием вышеуказанных факторов, а также в результате крупномасштабных работ по выемке аллювиальных (песчано-гравийных) отложений из русловых карьеров на участке реки, непосредственно примыкающем к гидроузлу и протяженностью около 20 км, посадка уровня в нижнем бьефе в различных створах достигла по различным оценкам 180–200 см [1]. Если ранее (в проекте использования водных ресурсов) минимальная величина расхода попусков определялась требованиями экологической безопасности, то в настоящее время приходится гарантировать обеспечение уровня режима реки в нижнем бьефе, отвечающего созданию условий для надежного функционирования городских водозаборов, что является приоритетной задачей. Обладая малым полезным объемом (4,4 км³), водохранилище чувствительно к такому явлению, как значительное снижение водного стока в осенне-зимний период. В маловодные годы запасов воды в водохранилище оказывается недостаточно для обеспечения требуемых для этого попусков воды. Например, в 1981 г. сработка ниже уровня мертвого объема (УМО) составила 128 см, в 1982 г. — 190 см, в 1998 г. — 153 см, в 1999 г. — 65 см, в 2000 г. — 32 см [2]. Последнее определяется особенностями стока Верхней Оби в осенне-зимний период.

В зимний период приток в водохранилище в основном определяется стоком Оби. В зимнюю межень объем бокового притока составляет лишь около 0,2% от стока р. Обь в этот период.

Наименьшие расходы на Верхней Оби наблюдаются в январе — марте. По данным наблюдений за 113-летний период с 1894 по 2006 г. средняя величина стока в первом квартале у створа Камень-на-Оби (входной створ Новосибирского водохранилища) характеризуется средней за многолетний период величиной расхода (норма стока), равной 338 м³/с.

Сопоставление многолетних данных о стоке рек Верхняя Обь, Томь и Иртыш с данными о климатической обстановке на юге Западной Сибири показывает, что периоды маловодья, как правило, соответствуют «сухим» годам, а наиболее острые по маловодью ситуации — периодам проявления сильных засух. Так, длительный засушливый период наблюдался с 1898 по 1902 г. Наиболее засушливыми были 1890, 1900 и 1911 гг. [3]. Согласно данным многолетних наблюдений за стоком р. Обь в створах г. Камень-на-Оби и г. Новониколаевск (Новосибирск), наиболее маловодными являются 1900 и 1901 гг., которые относятся к продолжительному маловодному периоду конца XIX — начала XX в. (1896–1911 гг.). Величины расходов в зимний период этих лет представлены в табл. 1.

Понижение уровня воды в водохранилище ниже УМО, имеющего отметку 108,5 м БС, допускается только в годы с обеспеченностью водности зимней межени 60% и более. Согласно «Основным положениям пра-

Таблица 1

Зимние расходы воды (январь — март) в экстремально маловодные годы

Город	Средние расходы воды, м³/с							
	1900 г.			I квартал	1901 г.			I квартал
	месяц				месяц			
	I	II	III		I	II	III	
Камень-на-Оби	199	187	187	191	178	168	190	179
Новосибирск	224	222	223	223	225	220	221	222

Таблица 2

Изменение величины попусков воды в зимний период

Годы	1970–1980	1980–1990		1990–2000		2000–2008	
Период осреднения	Средний расход, м ³ /с	Средний расход, м ³ /с	Увеличение попусков относительно 1970–1980 гг., %	Средний расход, м ³ /с	Увеличение попусков относительно 1980–1990 гг., %	Средний расход, м ³ /с	Увеличение попусков относительно 1990–2000 гг., %
Ноябрь — март	680	700	2,4	710	1,5	740	4,0
Первый квартал	620	650	4,6	725	11,4	735	1,3

вил использования ресурсов Новосибирского водохранилища на реке Оби» (1969 г.), сработка водохранилища не должна быть ниже отметки 107,5 м БС — контрольного уровня, определяемого условиями бесперебойной работы водозаборов г. Бердска.

В настоящее время и в сложившейся ситуации средний расход воды в нижний бьеф в период зимней межени (декабрь — март) составляет около 620 м³/с.

Для анализа изменения величины попусков в нижний бьеф за годы эксплуатации водохранилища ряд данных наблюдений был разбит на четыре десятилетия: 1960–1970, 1970–1980, 1980–1990, 1990–2000 гг., 2000–2008 гг. (табл. 2, рис. 1). Как видно из табл. 2, за последние годы расход попусков значительно возрос. Учитывая малую полезную емкость, дальнейшее увеличение попусков может только усложнить использование водных ресурсов водохранилища, а обеспечение устойчивого водоснабжения городов Новосибирска и Бердска в период катастрофического маловодья окажется под угрозой срыва.

При разработке планов по сработке водохранилища перед приходом волны половодья и его наполнению очень важно иметь не только прогноз объема притока, но и время прихода волны половодья к водохранилищу. Водный режим р. Обь характеризуется относительно невысоким и растянутым половодьем. Причем характерны две четко выраженные волны. Первая обусловлена таянием снега на равнинной территории, ее максимум отмечается в конце апреля — начале мая. В формировании первой волны у Новосибирска участвуют реки, впадающие на участке г. Барнаул — г. Новосибирск, а также крупные притоки, в том числе реки Чумыш, Алей и час-

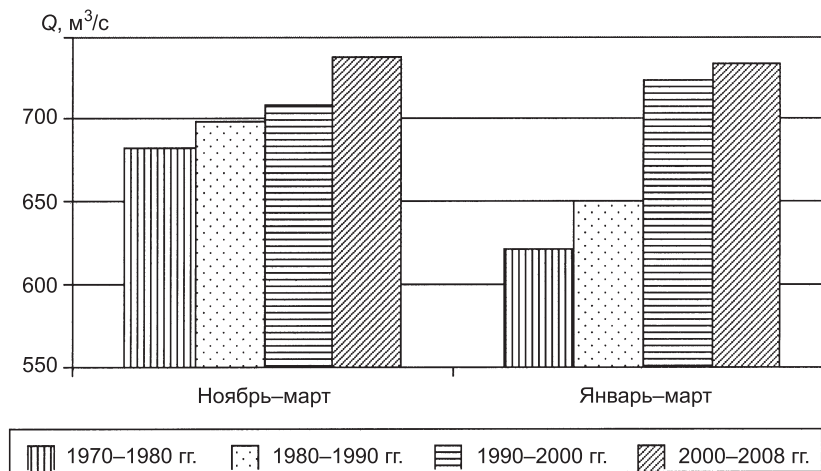


Рис. 1. Изменение величины попусков в нижний бьеф

точно воды Чарыша и Бии. Вторая волна половодья образуется при таянии горных снегов и ледников и преимущественно за счет вод Катунь, Бии и Чарыша [4].

Режим сработки водохранилища целиком определяется прогнозом приточности. Из-за неточности последних неоднократно возникали сложные ситуации, вызванные необоснованным объемом холостого сброса при последующем наполнении водохранилища до нормального подпорного уровня, что имело место в 1982, 2003, 2008 гг.

Анализ ряда дат прихода волны половодья к входному створу водохранилища показал, что в среднем первая волна подходит к водохранилищу к 7 апреля.

Самая ранняя дата прихода волны половодья отмечена 18 марта 1944 г., наиболее поздняя наблюдалась 21 апреля 1984 г.

Таким образом, с вероятностью 80% можно утверждать, что водохранилище начнет заполняться к 12 апреля, т.е. в начале второй декады.

Для оценки вероятности совпадения таких неблагоприятных явлений, как поздний приход половодья к водохранилищу и экстремально маловодный зимний сток, была выполнена проверка на наличие корреляции между объемом зимнего стока и датами прихода волны половодья к входному створу водохранилища. Расчеты позволили определить значение модуля коэффициента корреляции, которое не превышает 0,2, что говорит практически об отсутствии связи между зимним или осенне-зимним стоком и началом весеннего половодья. Далее эти явления можно рассматривать как независимые друг от друга.

Вероятность наступления половодья после 7 апреля (медианное значение распределения) составляет 50%. Экстремально маловодный год характеризуется вероятностью превышения, равной 95% (вероятность превышения составит 5%), на эту же обеспеченность рассчитаны все системы водоснабжения крупных городов. Следовательно, вероятность совпадения маловодья и позднего начала половодья составляет 2,5%. В табл. 3 приведены вероятности совпадения зимних маловодий различной обеспеченности и поздних дат прихода волны половодья.

Анализ водного баланса Новосибирского водохранилища, проведенный применительно к гидрологическим ситуациям, наблюдавшимся в 1894–2006 гг., при соблюдении условий обеспечения требуемого уровня режима в нижнем бьефе показал следующее. За расчетный интервал времени принимался период с 1 сентября по 10 апреля (дата начала сработки водохранилища обычно приходится на первую — вторую декады сентября). Начальный уровень свободной поверхности в верхнем бьефе на 1 сентября назначался равным НПУ.

Таблица 3

Вероятность совпадения позднего прихода волны половодья к водохранилищу и низкой водности зимнего периода

Водность зимнего периода	Вероятность превышения, %	Вероятность прихода половодья позднее, %				
		7 апреля	14 апреля	17 апреля	19 апреля	21 апреля
		50	20	10	5	1
Средний маловодный	25	10	4	2	1	0,2
	20	5	2	1	0,5	0,1
	10	2,5	1	0,5	0,25	0,05
Маловодный	5	0,5	0,2	0,1	0,05	0,01
Очень маловодный	1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Катастрофически маловодный	0,1	10	4	2	1	0,2

Расчетная величина попусков определялась двумя разными способами. Первый из них основывался на использовании диспетчерских графиков, регламентированных «Временными правилами использования водных ресурсов Новосибирского водохранилища», разработанными Ленгидропроектом в 1999 г. Согласно требованиям, приведенным в них, попуски в нижний бьеф в зимний период назначаются не ниже $620 \text{ м}^3/\text{с}$. При благоприятных условиях расход попуска может снижаться, однако средний расход попуска за последние 20 лет в зимний период равен гарантированному попуску.

Второй способ определения величины требуемых попусков основан на использовании практического опыта эксплуатации водохранилища, накопленного за период с 1980 по 2003 г., показавшего возможность уменьшения расходов в зимнее время при наличии ледового покрова. Результаты выполненного анализа представлены в табл. 4, причем варианты 2 и 3 в ней являются результатом оценки обеспеченности попусков в соответствующий период времени. В первом случае (вариант 2) по данным за 11-летний период 1991–2001 гг. был выбран расход попуска 80%-й обеспе-

Таблица 4

Величины расходов расчетных попусков

Месяц	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3		
	декада			декада			декада		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Сентябрь	1100	1100	1100	1190	1096	1060	1100	950	920
Октябрь	900	900	900	1040	940	920	900	830	850
Ноябрь	620	620	620	870	680	495	845	545	460
Декабрь	620	620	620	450	460	515	425	380	440
Январь	620	620	620	535	535	540	430	455	480
Февраль	620	620	620	545	590	600	480	490	750
Март	620	620	620	625	7350	835	530	530	530
Апрель	950	—	—	880	—	—	735	—	—

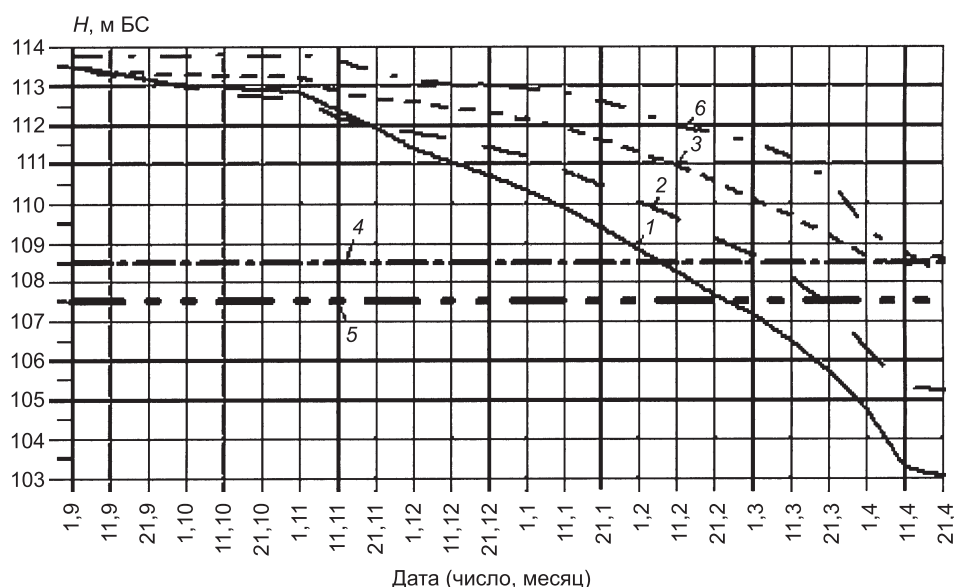


Рис. 2. Наблюдавшийся в 1968–1969 гг. ход уровня свободной поверхности Новосибирского водохранилища и результаты моделирования процесса опорожнения водохранилища
1 — вариант 1; 2 — вариант 2; 3 — вариант 3; 4 — УМО; 5 — минимальный допустимый уровень сработки; 6 — реальный ход уровня

ченности, во втором (вариант 3) был взят 24-летний период 1980–2003 гг. и принят расход 95%-й обеспеченности.

Оценочные расчеты, выполненные при трех вариантах задания расхода попусков для всего ряда наблюдений за стоком реки в течение 112 лет (это весьма ретроспективно), показали, что при первом варианте (использование диспетчерских графиков) понижение уровня свободной поверхности в водохранилище ниже допустимого (107,5) могло бы иметь место в 30% случаев. При использовании довольно мягких предпосылок по оценке требуемых попусков во втором и третьем вариантах тот же результат был получен соответственно в 20 и 7% случаях. Пример такого расчета для имевших место ранее гидрологических условий, характеризующих приточность к водохранилищу, представлен на рис. 2, на котором воспроизведена ситуация зимнего маловодья, имевшая место в 1968–1969 гг., обеспеченностью 97%.

Уровень сработки водохранилища	Водность периода			Время прихода паводка
	сентябрь–октябрь	ноябрь–декабрь	январь–март	
Глубокая сработка водохранилища (ниже 107,5 м БС на 2 и более м)				
Глубокая сработка водохранилища (ниже 107,5 м БС до 2 м)				
Сработка водохранилища до 107,5 м БС				

Легенда:

Водность периода		Дата прихода паводка	
	10–25%	средний многоводный	март
	25–75%	средний	по 5 апреля
	75–90%	средний маловодный	по 8 апреля
	90–97%	маловодный	по 13 апреля
	97–99%	очень маловодный, катастрофически	по 16 апреля
	99,90%	маловодный	от 17 апреля

Рис. 3. Возможные комбинации гидрологических факторов (водность периодов, время прихода волны половодья к водохранилищу), приводящие к пересработке водохранилища ниже УМО

Показан наблюдавшийся тогда ход уровня в прежних условиях эксплуатации гидроузла и трех расчетных кривых, ретроспективно описывающих процесс опорожнения водохранилища в сложившихся к настоящему времени условиях при трех различных вариантах величины расходов пусков.

По результатам расчетов была составлена схема, отражающая сочетание таких факторов, как водность осеннего и зимнего периодов, дата прихода паводка, которые могут привести к сработке уровня водохранилища ниже допустимых отметок, при необходимости обеспечения расхода пусков в нижний бьеф не ниже гарантированного значения (рис. 3).

Таким образом, выполненный анализ результатов расчетов показал, что в годы с экстремально низким осенне-зимним стоком реки можно ожидать возникновения гораздо более острых ситуаций с обеспечением гарантированных пусков в нижний бьеф, чем те, что уже имели место в период эксплуатации ГЭС. При этом возникнут проблемы и с водообеспечением г. Бердска и других населенных пунктов, обычно находящихся в зоне подпора Новосибирского гидроузла вследствие глубокой сработки объема воды, а следовательно, и уровня водохранилища.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев, В. С. Использование водных ресурсов Новосибирского водохранилища [Текст]/В. С. Мальцев, С. П. Бавский//Водное хозяйство России (проблемы, технологии, управление).— 2000.— Т. 2, № 4.— С. 347–356.
2. Васильев, О. Ф. Гидрологические особенности эксплуатации Новосибирского гидроузла в зимний период [Текст]/О. Ф. Васильев, А. А. Атавин, С. В. Пичугина//Докл. VI Всерос. гидролог. съезда. Санкт-Петербург, 28 сентября — 1 октября 2004 г.— М.: Метеоагентство Росгидромета, 2008.— Ч. I.— С. 131–136.
3. Колдомасов, Л. И. Климат Западной Сибири [Текст]/ Л. И. Колдомасов.— Новосибирск: Новосибгиз, 1947.— 59 с.
4. Бейром, С. Г. Изменение природных условий средней Оби после создания Новосибирской ГЭС [Текст]/С. Г. Бейром, Н. В. Вострякова, В. М. Широков.— Новосибирск: Недра, 1973.— 231 с.

Пичугина С. В., ст. препод.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 10.02.09

Pichugina S. V., senior lecturer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF HYDROLOGICAL FACTORS WHILE SUBSTANTIATION OF THE OPERATION OF A LOWLAND RESERVOIR IN THE WINTER LOW FLOW PERIOD

The specific conditions operation of reservoir with seasonal regulation in the winter period had been considered in the case of special requirements to the maintenance of water levels in the river providing reliable conditions for intakes of municipal and industrial water supply systems situated at the downstream of the hydropower dam. Estimation probability of cases with overdecrease of storage (the reservoir level drop was up below the dead volume level) in the conditions of extremely low winter runoff is fulfilled...

river low flows, winter runoff, seasonal regulation of a reservoir.

REFERENCES

1. Maltsev, B. S. Water management of Novosibirsk reservoir [Text]/B. S. Maltsev, C. P. Bavskiy//Water sector of Russia (problem, technologies, management).— 2000.— Vol. 2, N 4.— P. 347–356.
 2. Vasiliev, O. F. The hydrological peculiarity of the Novosibirsk reservoir operation in winter period (in Russian) [Text]/O. F. Vasiliev, A. A. Atavin, S. V. Pichugina//Proceedings of IV All-Russian Hydrological congress, St. Petersburg (September 28 — October 1, 2004), SPb.— M.: Meteoagentstvo Rosgidrometa, 2008.— Part I.— P. 131–136.
 3. Koldomasov, L. I. Climate of Western Siberia [Text]/L. I. Koldomasov.— Novosibirsk: Novosibgiz, 1947.— 59 p.
 4. Beirom, S. G. The changes of the natural conditions of mean Ob after construction Novosibirsk HPS [Text]/S. G. Beirom, N. V. Vastriakova, V. M. Shirokov.— Novosibirsk: Nedra, 1973.— 231 p.
-

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 628.16.081

Е. Л. ВОЙТОВ, Ю. Л. СКОЛУБОВИЧ, А. Ю. СКОЛУБОВИЧ

МЕТОДИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА РЕАКТОРОВ-ОСВЕТИТЕЛЕЙ

Разработана методика технологического моделирования и расчета реакторов-осветлителей. Представлены формулы для определения структурной прочности осадка в межзерновом пространстве контактной массы. Приведен порядок технологического расчета реакторов-осветлителей...

реактор-осветлитель, оптимальный режим, псевдооживление, контактная масса, загрузка фильтров, защитное действие, потери напора, гидравлический уклон, скорость фильтрования, касательные напряжения, прочность осадка.

Для предварительной реагентной очистки низкотемпературных маломутных высокоцветных поверхностных вод в технологиях питьевого и технического водоснабжения нами разработан реактор-осветлитель новой конструкции [1]. Для расчета реактора-осветлителя на оптимальный режим работы необходимо разработать методику технологического моделирования.

Ранее установлено, что для начальных стадий псевдооживления приемлемы законы движения жидкости через неподвижные зернистые среды и процесс осветления в слое взвешенной контактной массы реактора-осветлителя аналогичен процессу контактной коагуляции в зернистой загрузке фильтров [1]. В этой связи логично предположение о возможности применения существующих методик технологического моделирования и расчета фильтров для реакторов-осветлителей.

Традиционный метод технологического моделирования, разработанный Д. М. Минцем, основан на использовании эталонной модели с заданными параметрами фильтрующей загрузки d^* , m_0^* и технологическими параметрами v^* , i_0 , μ_0 , C/C_0 [2]. По результатам технологического моделирования определяются параметры b^* , $(a/b)^*$, A^* , $(h/t)^*$, которые пересчитываются на реальный фильтр. Критерием оптимального режима работы фильтра является равенство продолжительности защитного действия загрузки фильтра t_z и времени достижения предельной потери напора t_n . При этом за предельный напор принимается располагаемый напор, определяемый высотным расположением фильтров и равный 2,5–3 м. Это приводит к неоправданному занижению диаметра зерен загрузки, снижению грязеемкости фильтрующих загрузок и производительности фильтров.

Установлено, что предельные потери напора (предельный гидравлический уклон) характеризуют прочность осадка на сдвиг, определяются геометрическими параметрами пористой среды и могут иметь различное значение в зависимости от скорости фильтрования, физико-химических свойств воды и взвеси [2]. При достижении предельных потерь напора за

время t_3 касательные напряжения на поверхности зерен загрузки достигают прочности осадка и он начинает разрушаться, т.е. истекает также и время защитного действия загрузки. Таким образом, равенство $t_3 = t_n$ существует всегда и не может являться критерием оптимальности.

На оценке параметров фильтрования по прочности осадка на сдвиг как наиболее общего показателя, интегрально учитывающего различные условия работы фильтров, основана методика технологического моделирования и расчета фильтров проф. А. М. Фоминых [3]. В методике основное уравнение равномерного движения жидкости, связывающее гидравлический уклон i и касательные напряжения τ , возникающие на поверхности, обтекаемой потоком, принято в качестве модели, характеризующей процесс фильтрования

$$\tau = \gamma \cdot i \cdot R \quad (1)$$

или

$$\tau \omega = \rho g i m, \quad (2)$$

где R — гидравлический радиус, $R = m/\omega$.

Подстановкой формулы Козени–Кармана для расчета гидравлического уклона в уравнение (2) А. М. Фоминых получена зависимость для расчета предельных касательных напряжений

$$\tau_{пр} = \frac{30,66 \cdot V \cdot \alpha \cdot \mu \cdot (1 - m_{пр})}{d \cdot m_{пр}^2}, \quad (3)$$

где $m_{пр}$ — предельная пористость.

Прочность осадка на сдвиг, определяемая по результатам технологического моделирования, полученным в известных натуральных условиях фильтрования, позволяет по формуле (3) рассчитывать оптимальные конструктивные и технологические параметры производственного фильтра. При этом главным критерием оптимальности является максимальная скорость фильтрования (а следовательно, и производительность фильтра) при условии минимальной допустимой продолжительности фильтроцикла. Второй критерий — максимальная грязеемкость, при принятой скорости фильтрования зависящая от диаметра зерен загрузки.

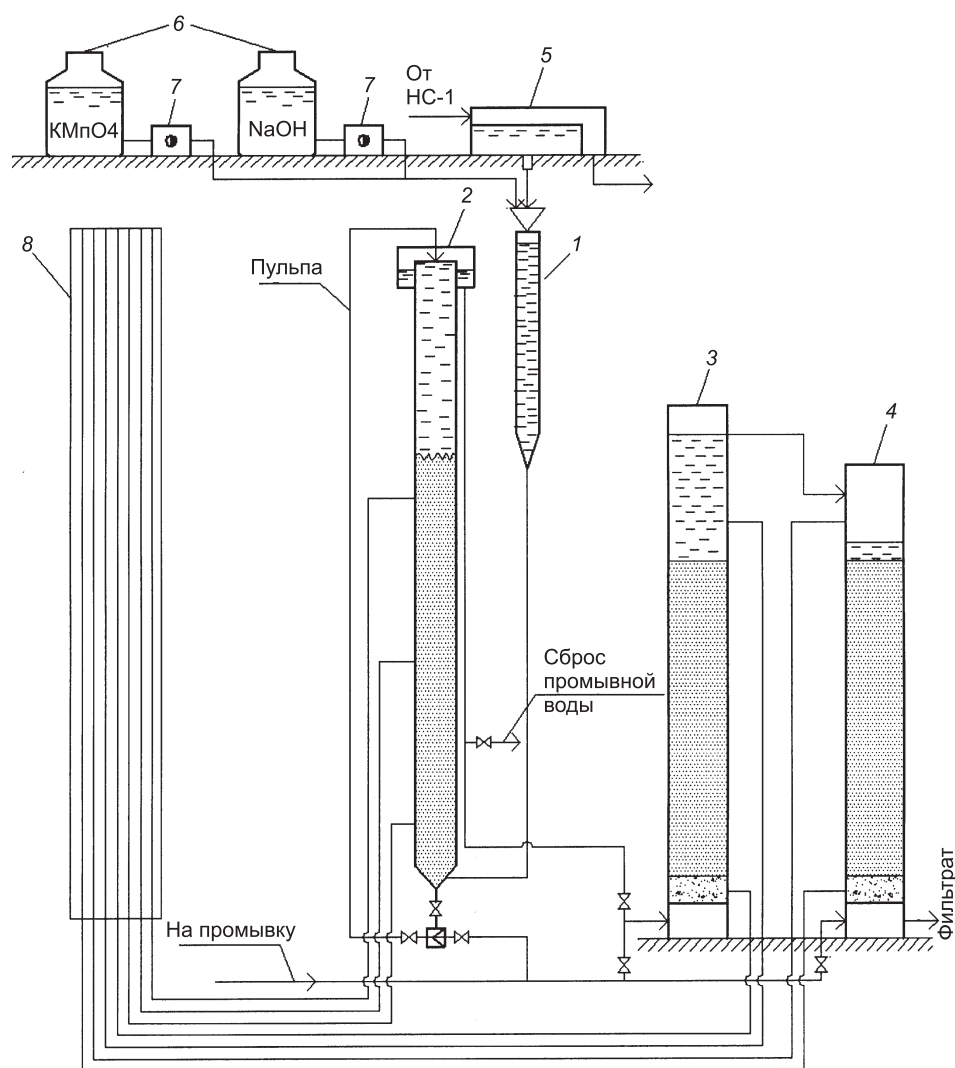
Однако формула (3) определения прочности осадка на сдвиг не учитывает начальной пористости загрузки, которая имеет решающее значение для условий осветления воды во взвешенном слое контактной массы и неприемлема для расчета реактора-осветлителя. Путем преобразования известных выражений, характеризующих прочность осадка, получена формула для определения касательных напряжений в загрязненной контактной массе (КМ) реактора-осветлителя:

$$\tau_{пр} = \frac{33 \cdot V \cdot \alpha \cdot \mu \cdot (1 - m_0)}{d \cdot m_{пр}^2 (1 - m_{пр})}, \quad (4)$$

где m_0 и $m_{пр}$ — начальная и предельная пористости псевдооживленной КМ.

Принцип оценки оптимальных конструктивных и технологических параметров реакторов-осветлителей по прочности осадка на сдвиг лежит в основе методики их технологического моделирования и расчета. Критериями оптимальности при расчете реакторов-осветлителей приняты максимальная скорость восходящего потока осветляемой жидкости и грязеемкость слоя контактной массы при условии сохранения минимальной допустимой продолжительности цикла осветления и требуемого качества очищенной воды.

Методика технологического моделирования и расчета реакторов-осветлителей изложена ниже в характерном примере исследований по технологическому моделированию работы реактора-осветлителя, проведенному на экспериментальной установке (рисунок).



Экспериментальная установка по очистке подземной воды

1 — воздухоотделитель; 2 — реактор-осветлитель; 3 — скорый фильтр; 4 — сорбционный фильтр; 5 — бак-дозатор; 6 — реакгентные баки; 7 — насосы-дозаторы; 8 — пьезометрический щит

В исходную подземную воду, подаваемую на модель осветлителя, вводился едкий натр и перманганат калия. При этом в загрузке реактора-осветлителя происходило окисление железа и марганца в воде, их гидролиз, контактная коагуляция продуктов гидролиза и образование осадка на зернах взвешенной контактной массы. По мере накопления осадка слой контактной массы первые несколько часов расширялся. Расширение составляло до 10% от первоначальной высоты расширенного слоя. Затем по мере формирования сплошной сетки осадка расширение прекращалось и происходил прирост потерь напора во взвешенном слое осветлителя аналогично приросту в фильтрах с плотной зернистой загрузкой. Снижение общего содержания железа и марганца в воде после осветлителя составляло около 90%. Цикл осветления воды в реакторе-осветлителе заканчивался в тот момент, когда вынос осадка из фильтра достигал 5 мг/л по мутности. Загрузка контактной массы подвергалась эжекционной промывке для ее регенерации и восстановления осветляющей способности.

Условия проведения эксперимента и полученные результаты приведены в табл. 1. Полученные опытные данные позволили рассчитать пористость и удельную поверхность расширенной контактной массы в начале цикла очистки подземной воды на модели реактора-осветлителя, пре-

Т а б л и ц а 1

Наименование и обозначение опытных параметров	Единица измерения	Значение
Диаметр зерен песка d	мм	0,65
Коэффициент формы зерен	—	1,16
Пористость плотной контактной массы (КМ) $m_{\text{п}}$	—	0,41
Высота плотного слоя КМ $L_{\text{п}}$	м	1,00
Высота расширенного слоя чистой КМ L_0	м	1,06
Высота расширенного слоя загрязненной КМ $L_{\text{пр}}$	м	1,10
Скорость восходящего потока воды V	м/ч,	8,8
Температура воды	°C	9,0
Динамическая вязкость воды μ	Па·с	$1,38 \cdot 10^{-3}$
Доза реагента — едкого натра	мг/л	60
Среднее содержание железа в исходной воде Fe_0	кг/м ³	0,00025
Среднее содержание железа в осветленной воде Fe_t	кг/м ³	0,00010
Средняя концентрация взвеси в осветленной воде C_t	кг/м ³	0,002
Потери напора в чистом расширенном слое КМ Δh_0	м	0,81
Потери напора в загрязненном расширенном слое КМ $\Delta h_{\text{пр}}$	м	0,90
Продолжительность цикла осветления $T_{\text{ц}}$	ч	27
Предельная плотность насыщения КМ осадком $\rho_{\text{пр}}$	кг/м ³	0,67

дельную пористость, насыщенность слоя контактной массы осадком и прочность осадка на сдвиг, необходимые для оптимизации конструктивных и технологических параметров осветлителя. Начальная пористость псевдоожиженной контактной массы определена по формуле¹

$$m_0^* = 1 - \frac{L_{\text{п}}}{L_0} (1 - m_{\text{п}}), \quad (5)$$

где m_0^* — начальная пористость псевдоожиженной (расширенной) контактной массы;

$L_{\text{п}}$, L_0 — плотного и расширенного слоя чистой контактной массы, м.

Удельная поверхность ω псевдоожиженной контактной массы определена по формуле

$$\omega = \frac{6 \cdot \alpha (1 - m)}{d}. \quad (6)$$

Предельная пористость псевдоожиженной контактной массы $m_{\text{пр}}$ рассчитана через предельный гидравлический уклон:

$$i_{\text{пр}} = \Delta h_{\text{пр}} / L_{\text{пр}}, \quad (7)$$

$$\frac{(1 - m_{\text{пр}})^2}{m_{\text{пр}}^3} = \frac{\Delta h}{L_{\text{пр}}} \cdot \frac{49,5 \cdot d^2}{V \cdot \alpha^2 \cdot \mu}, \quad (8)$$

где $i_{\text{пр}}$ — предельный гидравлический уклон;

$\Delta h_{\text{пр}}$ — предельные потери напора в загрязненном слое контактной массы, м;

$L_{\text{пр}}$ — предельная высота загрязненного слоя контактной массы, м.

Предельная насыщенность псевдоожиженной контактной массы осадком определена разностью начальной и предельной пористостей чистого и загрязненного псевдоожиженного слоя контактной массы соответственно

$$\Delta m_{\text{пр}}^* = m_0^* - m_{\text{пр}}^*. \quad (9)$$

¹ Здесь и далее звездочкой обозначены параметры, значения которых определены расчетом по методике технологического моделирования.

Удельная насыщенность рассчитана по формуле

$$\Delta m_{\text{пр}}^* / \omega. \quad (10)$$

Предельные касательные напряжения (прочность осадка на сдвиг) $\tau_{\text{пр}}$, соответствующие предельной величине выноса осадка из контактной массы, определены по формуле (4).

Прочность осадка на сдвиг как наиболее общий параметр процесса осветления и геометрическая структура контактной массы положены в основу методики технологического моделирования и расчета реакторов-осветлителей.

Грязеемкость контактной массы рассчитана из формулы

$$C_{\text{г}}^* = \rho_{\text{пр}} \cdot L_0, \quad (11)$$

где $\rho_{\text{пр}}$ — предельная плотность насыщения контактной массы осадком, кг/м³.

Весовая концентрация осадка в слое псевдоожиженной контактной массы γ^* , кг/м³, определена по формуле (1)

$$\Delta m_{\text{пр}}^* = \rho_{\text{пр}} / \gamma^*. \quad (12)$$

Подстановкой (11) в (12) получено

$$\gamma^* = C_{\text{г}}^* / (\Delta m_{\text{пр}}^* \cdot L_0). \quad (13)$$

Проверка совпадения опытной продолжительности цикла осветления $T_{\text{ц}}$, ч, с расчетной $T_{\text{цр}}^*$, ч, проведена по формуле

$$T_{\text{цр}}^* = \frac{\Delta m_{\text{пр}}^* \cdot L_0 \cdot \gamma^*}{V^* (C_0 - C_t)}, \quad (14)$$

где C_0 и C_t — средние за цикл осветления концентрации взвеси в исходной воде после введения реагента и в осветленной воде, кг/м³;

C_0 определено по формуле

$$C_0 = 20 (\text{Fe}_0 - \text{Fe}_t), \quad (15)$$

где Fe_0 и Fe_t — концентрации железа в исходной и осветленной воде, кг/м³ [4].

Расчетная продолжительность цикла осветления $T_{\text{цр}}^*$ совпала с опытной, следовательно, параметры моделирования были определены верно и могли быть использованы для расчета реактора-осветлителя на оптимальный режим его работы.

Параметры опытного реактора-осветлителя, рассчитанные по результатам моделирования, приведены в табл. 2.

Опыт длительной эксплуатации производственных реакторов-осветлителей в общем составе сооружений очистки подземных вод от соединений железа, марганца и солей жидкости показал рациональность 24-часовой минимальной продолжительности цикла работы осветлителей между промывками². Эта продолжительность межрегенерационного периода работы реакторов-осветлителей и принята за расчетную продолжительность при обосновании рациональных конструктивных и технологических параметров работы реактора-осветлителя.

Расчет осветлителя на оптимальный режим работы произведен на самый неблагоприятный период года (весенний паводок) в следующей последовательности.

² Сколубович Ю. Л., Войтов Е. Л. Разработка технологии подготовки питьевой воды из источника с повышенным содержанием солей жесткостей. Изв. вузов. Строительство. 2002. № 1–2. С. 33–35.

Таблица 2

Наименование и обозначение расчетных параметров реактора-осветлителя	Единица измерения	Расчетные параметры	
		опытные	оптимальные
Скорости восходящего потока воды V^* , $V_{\text{опт}}$	м/ч	8,8	9,9
Диаметры зерен контактной массы d^* , $d_{\text{опт}}$	мм	0,65	0,6
Коэффициент формы зерен α	—	1,16	1,16
Начальные пористости расширенной КМ m_0^* , $m_{0 \text{ опт}}$	—	0,443	0,473
Удельные поверхности расширенной КМ ω^* , $\omega_{\text{опт}}$	м ² /м ³	5964	6113
Предельные пористости расширенной КМ $m_{\text{пр}}^*$, $m_{\text{пр опт}}$	—	0,438	0,468
Предельные насыщенности КМ осадком $\Delta m_{\text{пр}}^*$, $\Delta m_{\text{пр опт}}$	—	0,005	0,005
Удельные насыщенности КМ $\Delta m_{\text{пр}}^* / \omega^*$, $\Delta m_{\text{пр опт}} / \omega_{\text{опт}}$	м ³ /м ²	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$
Прочность осадка на сдвиг $\tau_{\text{пр}}$	Па	0,572	0,572
Грязеемкости контактной массы $C_{\text{г}}^*$, $C_{\text{г опт}}$	кг/м ³	0,71	0,70
Весовые концентрации осадка в загрязненной КМ γ^* , $\gamma_{\text{опт}}$	кг/м ³	134	125
Средняя концентрация взвеси в исходной воде C_0	кг/м ³	0,005	0,005
Продолжительность цикла осветления $T_{\text{цр}}^*$	ч	26,9	24
Высота расширенного слоя чистой КМ $L_{\text{опт}}$	м	1,06	1,8
Высота плотного слоя чистой КМ $L_{\text{п опт}}$	м	1,00	1,6

1. Определена максимально возможная скорость восходящего потока очищаемой воды, исходя из 24-часовой продолжительности цикла осветления.

2. Определен фракционный состав контактной массы при минимальном расширении слоя контактной массы, обеспечивающем устранение застойных зон.

3. Уточнена продолжительность цикла осветления по параметрам технологического моделирования путем пересчета на максимально возможную скорость восходящего потока осветленной воды.

4. Определена толщина слоя контактной массы.

Новая максимальная возможная скорость восходящего потока воды рассчитана из соотношения

$$V_{\text{опт}} = \frac{T_{\text{цр}}^*}{T_{\text{опт}}} \cdot V^*, \quad (16)$$

где $T_{\text{опт}}$ — минимальная допустимая продолжительность цикла осветления, равная 24 ч.

Новый средний диаметр зерен контактной массы определен подстановкой в формулу (17) коэффициента расширения $e = 0,12$, устраняющего существование застойных зон, и новой скорости $V_{\text{опт}}$

$$d_{\text{опт}} = \left[\frac{V\alpha \cdot \mu^{0,54} (e+1)^{1,33}}{5(e+m_{\text{п}})^{1,77}} \right]^{0,752}. \quad (17)$$

Начальная пористость $m_{0 \text{ опт}}$ при расширении $e = 0,12$ определена по формуле (5), удельная поверхность псевдооживленной контактной массы — по формуле (6).

Новая предельная пористость $m_{\text{пр опт}}$ определена решением кубического уравнения по формуле (4) при известной прочности осадка на сдвиг $\tau_{\text{пр}}$

$$m_{\text{пр опт}}^2 (1 - m_{\text{пр опт}}) = \frac{33V\alpha\mu(1 - m_{\text{опт}})^2}{d \cdot \tau_{\text{пр}}}. \quad (18)$$

Новая предельная насыщенность $\Delta m_{\text{пр опт}}$, $\text{м}^3/\text{м}^2$, и удельная насыщенность $\Delta m_{\text{пр опт}}/\omega$, $\text{м}^3/\text{м}^2$, определены по формулам (9) и (10) соответственно.

Новая грязеемкость $C_{\text{г опт}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$, определена по формуле

$$C_{\text{г опт}} = C_{\text{г}}^* \cdot \frac{\Delta m_{\text{пр}}}{\omega} \cdot \frac{\omega^*}{\Delta m_{\text{пр}}^*}. \quad (19)$$

Весовая концентрация осадка $\gamma_{\text{опт}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$, рассчитана по формуле

$$\gamma_{\text{опт}} = C_{\text{г опт}} / (\Delta m_{\text{пр}} \cdot L). \quad (20)$$

Новая продолжительность цикла осветления определена по формуле

$$T_{\text{цр}} = \frac{\Delta m_{\text{пр}} \cdot L_0 \cdot \gamma_{\text{опт}}}{V(C_0 - C_t)}. \quad (21)$$

Продолжительность цикла осветления $T_{\text{цр}} = 24$ ч, следовательно, скорость $V_{\text{опт}}$, $\text{м}/\text{с}$, подобрана верно.

Толщина слоя загрузки определена по эмпирической формуле

$$L = k \cdot V \cdot \mu / (\omega \cdot \tau_{\text{пр}}), \quad (22)$$

где k — коэффициент, $k = 10^7 \text{ м}^{-1}$;

V — скорость восходящего потока, $\text{м}/\text{с}$;

μ — вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

τ — прочность осадка на сдвиг, Па ;

ω — удельная поверхность зерен псевдоожиженной контактной массы, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

d — средний диаметр зерен контактной массы.

Повторное моделирование реактора-осветлителя при оптимальных конструктивных размерах контактной массы и технологическом режиме его работы показало отклонение расчетных от опытных параметров до 15%, что находится в пределах точности метода моделирования и расчета осветлителей.

Таким образом, предлагаемая методика технологического моделирования и расчета позволяет получить оптимальные конструктивные и технологические параметры реактора-осветлителя при удовлетворительной сходимости расчетных и эксплуатационных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войтов, Е. Л. Моделирование процесса очистки воды в реакторе-осветлителе [Текст]/Е. Л. Войтов, Ю. Л. Сколубович, А. Ю. Сколубович // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 10. — С. 125–129.
2. Минц, Д. М. Теоретические основы технологии очистки воды [Текст]/Д. М. Минц. — М.: Стройиздат, 1964. — 156 с.
3. Фоминых, А. М. Теоретическое обобщение и перспективы развития процесса очистки воды фильтрованием [Текст]/А. М. Фоминых, В. А. Фоминых // Изв. вузов. Строительство. — 1996. — № 12. — С. 83–86.
4. Николадзе, Г. И. Обезжелезивание природных и оборотных вод [Текст]/Г. И. Николадзе. — М.: Стройиздат, 1978. — 160 с.

ВОЙТОВ Е. Л., канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

СКОЛУБОВИЧ Ю. Л., д-р техн. наук, проф., проректор

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

*СКОЛУБОВИЧ А. Ю., асп.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 17.01.09

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

Skolubovich Yu. L., doctor of technical sciences professor, prorector, Novosibirsk State University Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Skolubovich A. Yu., post graduate student, Novosibirsk State University Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

METHODS OF TECHNOLOGICAL MODELING AND CALCULATION REACTOR-CLARIFIER

The methods of technological modeling and calculation reactor-clarifier is designed. The Formulas for determination of structured toughness setting in space between granules of the contact mass are presented. The Order of the technological calculation reactor-clarifier is brought...

the reactor-clarifier, the optimum mode, appearing dilution, the contact mass, loading filter, the defensive action, the losses of the pressure, the hydraulic gradient, the velocity filtration, the tangent voltages, toughness setting.

REFERENCES

1. Voytov, E. L. Modeling of the process peelings water in reactor-clarifier [Text]/ E. L. Voytov, Yu. L. Skolubovich, A. Yu. Skolubovich//News of Higher Educational Institutions. Construction.— 2008.— N 10.— P. 125–129.
2. Mins, D. M. Theoretical bases to technologies peelings water [Text]/D. M. Mins.— M.: Stroyizdat, 1964.— 156 p.
3. Fominyh, A. M. Theoretical generalization and prospects of the development of the process peelings water by filtration [Text]/A. M. Fominyh, V. A. Fominyh//News of Higher Educational Institutions. Construction.— 1996.— N 12.— P. 83–86.
4. Nikoladze, G. I. Removing ferric from natural and circulating water [Text]/ N. I. Nikoladze.— M.: Stroyizdat, 1978.— 160 p.

СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

УДК 625.8 : 624.04

Е. В. УГЛОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ТРАНСПОРТА

Предложена расчетная модель деформирования системы «дорожная конструкция — грунт». Выполнен численный эксперимент по расчету характеристик деформирования нежестких дорожных конструкций с различной толщиной асфальтобетонного покрытия. На основе выявленных особенностей деформирования различных дорожных конструкций даны рекомендации по повышению их устойчивости к усталостному разрушению и колееобразованию...

нежесткие дорожные конструкции, напряженно-деформированное состояние, чаша максимальных динамических прогибов.

Аналитической базой различных методов расчета дорожных одежд всегда являлась теория напряженно-деформированного состояния слоистой среды [1, 2]. Для расчета характеристик динамического напряженно-деформированного состояния нежестких дорожных конструкций в данной работе, учитывая кратковременность реальных процессов деформирования при проезде транспортных средств, в качестве определяющих соотношений используются уравнения динамической теории вязкоупругости [3, 4].

Основой для постановки модельных задач механики, корректно описывающих особенности нагружения и деформирования элементов системы «дорожная конструкция — грунт», являются геометрия и строение реальных дорожных конструкций. Дорожные конструкции на прямоли-

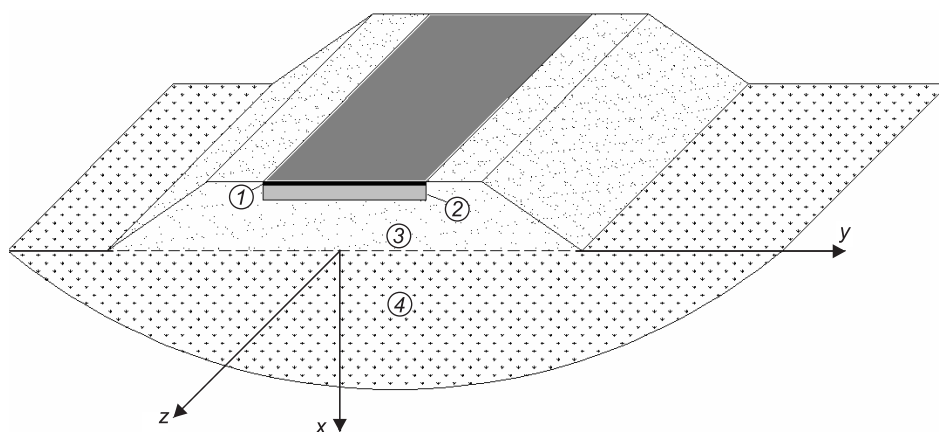


Рис. 1. Система «дорожная конструкция — грунт»

1 — покрытие; 2 — основание; 3 — грунт земляного полотна; 4 — подстилающий грунтовый массив

нейных участках ограничены по ширине, но имеют достаточную протяженность. Они включают пакет слоев ограниченной ширины (покрытие и основание), грунт земляного полотна и подстилающий грунтовый массив (слоистое полупространство). Все элементы системы жестко сцеплены между собой. Сечение системы представлено на рис. 1.

Деформирование среды описывается динамическими уравнениями Ламе:

$$\begin{aligned}\mu_j \Delta u_x^{(j)} + (\lambda_j + \mu_j) \frac{\partial \theta^{(j)}}{\partial x} &= \rho_j \left(\frac{\partial^2 u_x^{(j)}}{\partial t^2} + b \frac{\partial u_x^{(j)}}{\partial t} \right), \\ \mu_j \Delta u_y^{(j)} + (\lambda_j + \mu_j) \frac{\partial \theta^{(j)}}{\partial y} &= \rho_j \left(\frac{\partial^2 u_y^{(j)}}{\partial t^2} + b \frac{\partial u_y^{(j)}}{\partial t} \right), \\ \mu_j \Delta u_z^{(j)} + (\lambda_j + \mu_j) \frac{\partial \theta^{(j)}}{\partial z} &= \rho_j \left(\frac{\partial^2 u_z^{(j)}}{\partial t^2} + b \frac{\partial u_z^{(j)}}{\partial t} \right),\end{aligned}\quad (1)$$

где $u_x^{(j)}, u_y^{(j)}, u_z^{(j)}$ — компоненты вектора смещения точки j -го слоя;

каждый из плоскопараллельных слоев занимает область $x \in [-h_j, -h_{j+1}]$, $h_0 = h$;

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа в декартовой системе координат,

$$\theta^{(j)} = \frac{\partial u_x^{(j)}}{\partial x} + \frac{\partial u_y^{(j)}}{\partial y} + \frac{\partial u_z^{(j)}}{\partial z}.$$

На границах раздела упругих параметров заданы условия жесткого сцепления — равенство компонентов векторов перемещения и напряжения между контактирующими слоями. Постоянные Ляме λ_j, μ_j можно заменить коэффициентом Пуассона ν и модулем упругости каждого слоя E :

$$\lambda = \frac{E \cdot \nu}{[(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)]}; \quad \mu = \frac{E}{[2(1 + \nu)]}. \quad (2)$$

Достаточно сложен вопрос корректного учета вязкости в расчетной модели. Это связано с тем, что вязкость существенно зависит от частоты колебаний, температуры и других факторов. Определение этих зависимостей обычно сводят к нахождению декремента затухания экспериментальными методами с последующим определением зависимости вязкости от частоты.

В то же время с технической точки зрения возможен иной подход. Он связан с тем фактом, что изменение частоты колебаний определяет изменение скорости деформирования материала. Тогда влияние вязкости можно учесть путем введения динамического модуля упругости, который определяется на основе экспериментально полученной зависимости $E(\omega)$.

Связь нестационарного процесса со стационарными производится на основе методов гармонического анализа (с использованием преобразования Фурье по времени). Разработанная модель позволяет провести расчет амплитудно-временных и амплитудно-частотных характеристик перемещений, скоростей и ускорений для любой точки системы «дорожная конструкция — грунт», а также всех компонентов напряжений на основании использования закона Гука для сплошной среды. При расчете дорожных конструкций могут быть использованы два подхода к моделированию деформирования системы «дорожная конструкция — грунт». Один основан на точном учете скорости движения и реального строения элементов

дорожной конструкции, второй основан на использовании МКЭ — моделирования как для трехмерной постановки задачи, так и для разработки и реализации упрощенных моделей решения частных задач.

Наличие хорошо отработанных алгоритмов и программных средств, основанных на использовании МКЭ, определяет его привлекательность при разработке механико-математических моделей исследуемой системы. При использовании МКЭ следует иметь в виду принципиальные сложности, определенные неограниченностью исследуемой структуры по ряду направлений, сложностью задания движущихся нагрузок и резким увеличением времени счета при постановке пространственной задачи.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований показал, что при движении транспортного средства импульс нагружения дорожной конструкции длится короткий промежуток времени, величина и продолжительность которого зависят от скорости транспортного средства, структуры дорожной одежды и местоположения рассматриваемого элемента дорожной конструкции. При исследовании напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций проезд автомобиля моделируется в виде нестационарно изменяющегося во времени воздействия, приложенного на поверхность системы «дорожная конструкция — грунт» в месте контакта колеса двухосного грузового автомобиля с нагрузкой на заднюю ось 100 кН, длительность которого определена в соответствии со скоростью движения автомобиля.

Первый этап разработки конечно-элементной модели системы определен типом и структурой конструкции и связан с выбором представительского объема, введением по периферии демпфирующих поясов, определением оптимального разбиения представительского объема на конечные элементы, обеспечивающего требуемую точность итогового результата при минимизации расчетного времени.

Выбор размеров представительского объема и демпфирующих поясов определен следующим

алгоритмом. Первоначальный размер представительского объема при исследовании нестационарного воздействия на систему (например, удара) определен временем прохождения продольной волны (ее скорость $V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$, где E — модуль упругости материала данного элемента, ν — коэффициент Пуассона) по кратчайшему пути до ближайшей границы представительского объема и обратно до точки наблюдения. Размер и свойства демпфирующих поясов выбираются из условия ми-

Расчетные характеристики элементов модели «дорожная конструкция — грунт»

Расчетные параметры конструкции	Элементы модели «дорожная конструкция — грунт»		
	Асфальто-бетон	Слои основания	Грунт земляного полотна
<i>Конструкция № 1</i>			
Модуль упругости E , МПа	2300	280	47
Плотность ρ , кг/м ³	2250	1900	1700
Коэффициент Пуассона ν	0,35	0,3	0,35
Толщина t , м	0,2	0,5	3,0
<i>Конструкция № 2</i>			
Модуль упругости E , МПа	2500	260	47
Плотность ρ , кг/м ³	2250	1900	1700
Коэффициент Пуассона ν	0,35	0,3	0,35
Толщина t , м	0,14	0,35	3,0
<i>Конструкция № 3</i>			
Модуль упругости E , МПа	2500	200	47
Плотность ρ , кг/м ³	2250	1900	1700
Коэффициент Пуассона ν	0,35	0,3	0,35
Толщина t , м	0,1	0,2	3,0

нимизации амплитуды волн, отраженных от границы представительского объема.

Входными параметрами расчетной модели напряженно-деформированного состояния системы «дорожная конструкция — грунт» являются:

- свойства материала каждого конструктивного слоя и земляного полотна: динамический модуль упругости ($E_{\text{дин}}$), коэффициент Пуассона, плотность;
- толщины слоев дорожной одежды;
- поперечные размеры слоев дорожной одежды и земляного полотна;
- нагрузка: импульс давления колеса на покрытие заданной длины, приложенный в виде круга данного радиуса (r).

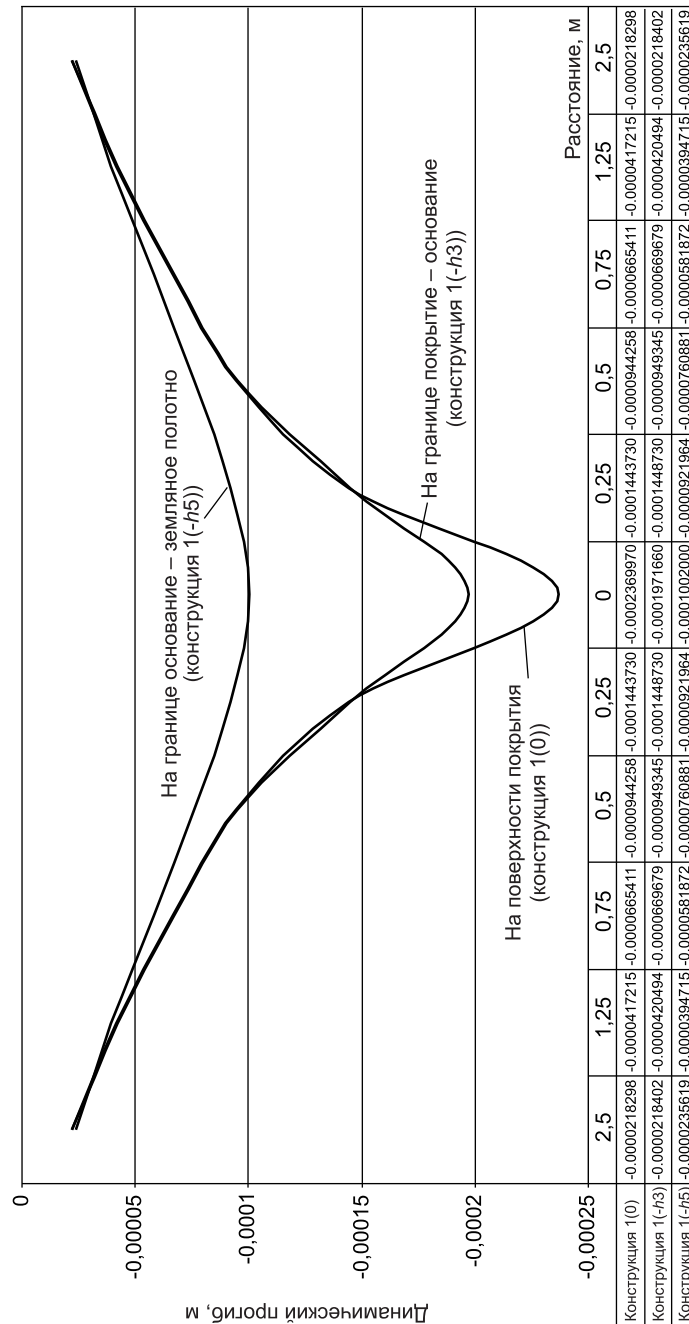


Рис. 2. Чаша максимальных динамических прогибов по горизонтальным сечениям в конструкции № 1

Выходными параметрами разработанной модели являются амплитудно-временные зависимости напряжения, деформации и перемещения в любой точке дорожной конструкции в течение определенного интервала времени.

Для исследования особенностей деформирования нежестких дорожных одежд был проведен численный эксперимент, включающий расчет характеристик динамического НДС дорожных конструкций с различной толщиной конструктивных слоев (таблица): № 1 — дорожная конструкция усиленной прочности (с толщиной асфальтобетонных слоев более 18 см), № 2 — дорожная конструкция «средней» прочности (с толщиной асфальтобетонных слоев 12–18 см), № 3 — дорожная конструкция «низкой» прочности (с толщиной асфальтобетонных слоев менее 12 см). В настоящее время

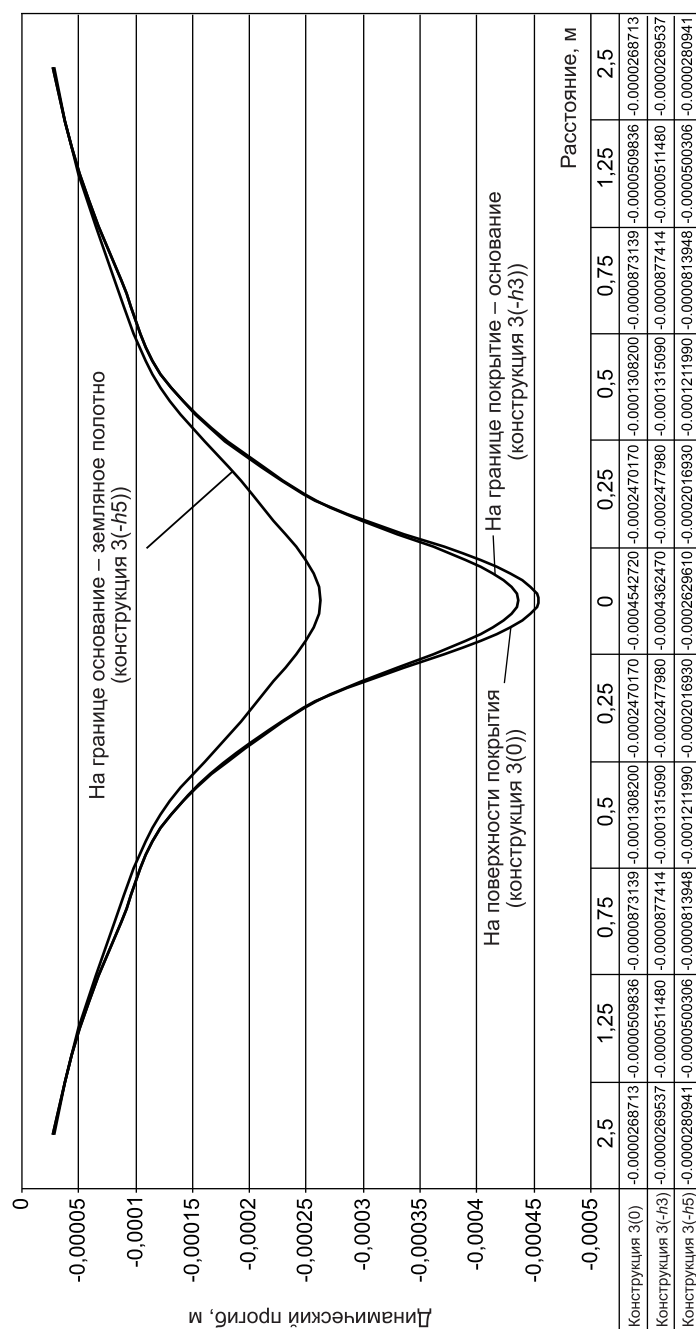
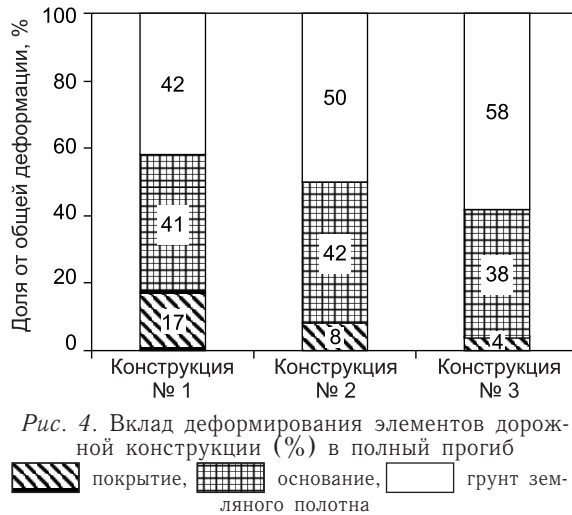


Рис. 3. Чаша максимальных динамических прогибов по горизонтальным сечениям в конструкции № 3

наиболее часто указанные дорожные конструкции применяются соответственно на автомобильных дорогах I, II, III–IV технических категорий.

В ходе численного эксперимента дорожная конструкция рассматривалась как трехслойная система: слой покрытия (монокотные слои из асфальтобетона, обладающие изгибной жесткостью), слой основания (несвязные слои), земляное полотно. При этом модули упругости покрытия и основания рассчитывались как средневзвешенные значения нескольких слоев. Грунтовый массив моделировался в виде двухслойного полупространства (слой на более жестком полупространстве).



Расчеты проводились для точек поверхности и внутренних точек конструкции по продольному, поперечному и горизонтальным ее сечениям. По результатам расчетов строились чаши максимальных динамических прогибов поверхности или горизонтального сечения дорожной конструкции. Графики строились на основе выбора в каждой точке поверхности или горизонтального сечения максимального вертикального смещения за весь промежуток времени при прохожде-

нии колебаний из точки удара (рис. 2, 3).

На основе анализа этих графиков выявлен вклад совместного деформирования конструктивных элементов в полную деформацию поверхности конструкции (рис. 4).

Следует отметить основные физические закономерности совместного деформирования слоев дорожной конструкции:

— общий прогиб поверхности дорожной конструкции u_z складывается из суммы вертикально ориентированной деформации ее слоев u_{zj} :

$$u_z = \sum_{j=1}^n u_{zj}; \quad (3)$$

— каждый конструктивный слой под действием нагрузки имеет изгибную $u_{zj}^{(u)}$ и толщинную деформации $u_{zj}^{(T)}$ (рис. 5);

— при малой толщине слоя его толщинная деформация мала по срав-

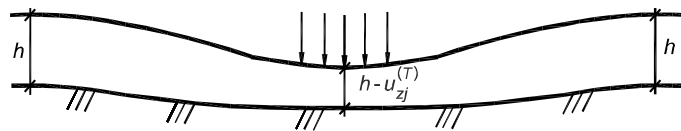


Рис. 5. Толщинная деформация дорожного покрытия

нению с изгибной $u_{zj}^{(u)} \ll u_{zj}^{(T)}$ и ею можно пренебречь;

— с увеличением толщины слоя его изгибная жесткость возрастает, что приводит к снижению доли изгибного деформирования в общей величине прогиба поверхности дорожной конструкции. При этом доля толщинной деформации $u_{zj}^{(T)}$, как правило, увеличивается.

В дорожной конструкции «низкой» прочности (конструкция № 3) грунт земляного полотна вносит значительный вклад в общий прогиб по-

верхности — более 55%. В асфальтобетонном покрытии доля толщинных деформаций мала (4% от общей величины прогиба поверхности дорожной конструкции), при этом величина изгибной деформации в 2–2,5 раза выше, чем в более прочных конструкциях, что обуславливает возникновение значительных растягивающих напряжений на нижней грани покрытия. С увеличением капитальности дорожной одежды и толщины асфальтобетонного покрытия доля деформаций в грунте земляного полотна снижается (до 40%), при этом существенно возрастает доля толщинных деформаций в дорожном покрытии. Увеличение доли деформаций сжатия в слоях покрытия способствует накоплению остаточных деформаций при многократном нагружении и, как следствие, образованию колеи в процессе эксплуатации.

Проведенный анализ характеристик деформирования различных дорожных конструкций позволил выявить следующие закономерности.

1. Дорожные конструкции с толщиной асфальтобетонных слоев 20 см и более имеют незначительные растягивающие напряжения на нижней поверхности покрытия и достаточно устойчивы к усталостному трещинообразованию. При этом, учитывая большую долю толщинных деформаций, возникающих в асфальтобетонных слоях при приложении нагрузки, такие дорожные одежды в большей степени подвержены накоплению остаточных деформаций в покрытии и требуют использования сдвигоустойчивых асфальтобетонных смесей повышенной жесткости. Повышение модуля упругости асфальтобетона в покрытии хотя и приводит к некоторому повышению растягивающих напряжений, существенного отрицательного влияния на усталостную долговечность оказывать не будет. Учитывая малую величину растягивающих напряжений на нижней грани покрытия, нижний слой целесообразно устраивать из пористых и высокопористых асфальтобетонных смесей, обладающих невысокой прочностью на растяжение при изгибе и высокой прочностью на сдвиг, что позволит в комплексе с использованием в верхних слоях покрытия теплоустойчивых асфальтобетонных смесей (на полимерно-битумном вяжущем, резинобитумном вяжущем и т.д.) обеспечить устойчивость дорожного покрытия по критерию колеобразования.

2. Противоположная картина наблюдается при эксплуатации дорожных конструкций «низкой» прочности с малой толщиной покрытия (менее 12 см). Вследствие невысокой несущей и распределяющей способности дорожного покрытия основная нагрузка воспринимается основанием дорожной одежды и грунтом земляного полотна, где возможно накопление остаточных деформаций. Малая толщина асфальтобетонного покрытия обуславливает возникновение значительных растягивающих напряжений на нижней границе покрытия (более 1,5 МПа). Для повышения усталостной долговечности покрытия требуется использование в нижнем слое асфальтобетонов, обладающих высокой прочностью на растяжение при изгибе и усталостной прочностью (плотные смеси с повышенным содержанием вяжущего, приготовленные с использованием полимерно-битумного, резинобитумного вяжущего и т.д.), а также использование различных армирующих прослоек, повышающих прочность асфальтобетона на растяжение при изгибе.

3. При строительстве и эксплуатации дорожных конструкций с асфальтобетонным покрытием малой толщины (менее 15 см) особое внимание следует уделять повышению устойчивости асфальтобетона к старению, так как повышение модуля упругости в процессе эксплуатации приводит к резкому увеличению растягивающих напряжений и, как следствие, к значительному ускорению усталостных разрушений. Для дорожных конструкций «усиленной» прочности ввиду малой величины воз-

никающих растягивающих напряжений (0,3–0,5 МПа) увеличение модуля упругости асфальтобетона в процессе старения является менее опасным фактором, чем для дорожных конструкций «низкой» прочности, где величина растягивающих напряжений в слое асфальтобетона в случае увеличения его модуля упругости может достигать 2,5–3,5 МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов, Н. Н. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд [Текст]/ Н. Н. Иванов.— М.: Транспорт, 1973.— 327 с.
2. Корсунский, М. Б. Приведение многослойных дорожных конструкций к расчетным моделям [Текст]/М. Б. Корсунский, А. О. Саль, П. И. Теляев//Тр. Союздорнии. Вып. 47.— М., 1971.
3. Лурье, А. И. Теория упругости [Текст]/А. И. Лурье.— М.: Наука, 1970.
4. Илиополов, С. К. Динамика дорожных конструкций [Текст]/С. К. Илиополов, М. Г. Селезнев, Е. В. Углова.— Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2002.— 258 с.

*УГЛОВА Е. В., канд. техн. наук, доц.
Ростовский государственный строительный университет*

Получено 01.10.08

Uglova E. V., candidate of technical sciences, assistant professor, Rostov State Building University, Russia

SIMULATION OF DEFORMATION OF FLEXIBLE PAVEMENTS AT INFLUENCE OF TRAFFIC

The settlement model of deformation of system «a pavement — a ground» is offered. Numerical experiment by calculation of characteristics of deformation of flexible pavements with various thickness of asphalt coverings is executed. On the basis of revealed features of deformation of various road designs are offered the recommendation about increase of their stability to fatigue failure and rutting...

the flexible pavements, the is intense-deformed condition, bowl of the maximum dynamic deflections.

REFERENCES

1. Ivanov, N. N. Designing and calculation of flexible road pavements [Text]/ N. N. Ivanov.— M.: Transport, 1973.— 327 p.
2. Korsunsky, M. B. Reduction of multilayered road pavements to settlement models [Text]/M. B. Korsunsky, A. O. Sal, P. I. Teljaev//Sojuzdornii. Fasc. 47.— M., 1971.
3. Lurje, A. I. Theory of elasticity [Text]/A. I. Lurje.— M.: Science, 1970.
4. Iliopolov, S. K. Dynamics of road pavements [Text]/S. K. Iliopolov, M. G. Seleznev, E. V. Uglova.— Rostov-on-Don: State Building University, 2002.— 258 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.878.2 : 621.396

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

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДАТЧИКОВ СИСТЕМЫ СЛЕДЯЩЕГО ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНЫМИ МАШИНАМИ

Предлагается алгоритм, позволяющий на основе анализа сигналов датчиков системы управления землеройно-транспортными машинами определять текущие координаты и курсовые углы ведущей и ведомой машин в системе их следящего дистанционного управления...

алгоритм, землеройно-транспортные машины, дистанционное управление, системы, координаты.

Важным направлением повышения эффективности применения землеройно-транспортных машин (ЗТМ) и безопасности жизнедеятельности оператора является развитие систем дистанционного радиоуправления [1], которые условно могут быть разделены на средства индивидуального и группового дистанционного радиоуправления [2].

В работе [3] рассматривался вариант системы индивидуального дистанционного управления ЗТМ, которая может иметь весьма широкую область применения при высокой эффективности в случае, когда реальная рабочая обстановка на объекте строительства определяет использование одной такой машины.

При необходимости выполнить большой объем земляных работ перспективными являются системы группового дистанционного управления ЗТМ (типа ведущий — ведомый или ведущий — несколько ведомых), включающие в себя систему ориентации ЗТМ по углу и расстоянию, а также систему передачи команд управления по радиоканалу для ведомой машины [4].

Решение проблемы следящего дистанционного управления (с ведомой ЗТМ) включает ряд задач, среди которых весьма значимой является обработка сигналов датчиков системы ориентации ЗТМ, не получившая на данный момент необходимого освещения в печати.

Алгоритм измерения взаимного положения объектов сводится к вычислению курсовых углов ведущей и ведомой машин и дальности между ними. Будем считать, что начало системы отсчета совпадает с центром масс ведущей ЗТМ. Тогда определение взаимоположения машин сведется к вычислению координат центра масс ведомой ЗТМ. На рис. 1 представлены характеристики положения ведомой ЗТМ относительно ведущей.

Местоположение ведомого объекта B на плоскости определяется координатами θ (курсовой угол ведущего объекта A) и D (дальность между объектами) полярной системы координат. Стрелками обозначены направления движения машин. Если они не совпадают, то угол ψ (с учетом знака) покажет отклонение направления движения ведомой ЗТМ:

$$\psi = \theta - \varphi, \quad (1)$$

где φ — курсовой угол ведомой ЗТМ.

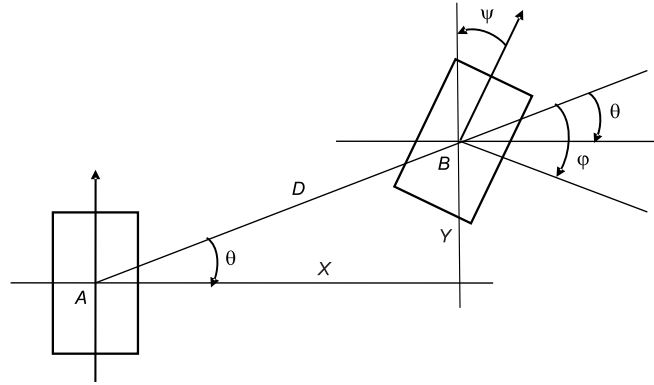


Рис. 1. Характеристики положения ведомой ЗТМ относительно ведущей

Таким образом, описанные величины θ , D , ψ в результате их измерения полностью определяют положение ведомой ЗТМ относительно ведущей.

На объектах A и B установлены датчики системы ориентации [4] ведущей и ведомой ЗТМ, содержащие приемную и передающую антенны.

Значения курсовых углов ведущей и ведомой машин влияют на напряжения $U_{i,j}$ ($i = 1, 2$ относится к полю излучения, $j = 1, 2$ относится к полю приема), наводимые в рамках антенн [4] приемного модуля:

$$\cos\theta\cos\varphi - p\sin\theta\sin\varphi = \frac{U_{11}}{U_0}, \quad (2)$$

$$\cos\theta\sin\varphi + p\sin\theta\cos\varphi = \frac{U_{12}}{U_0}, \quad (3)$$

$$\sin\theta\cos\varphi - p\cos\theta\sin\varphi = \frac{U_{21}}{U_0}, \quad (4)$$

$$\sin\theta\sin\varphi + p\cos\theta\cos\varphi = \frac{U_{22}}{U_0}, \quad (5)$$

где U_0 — нормирующий множитель;

p — коэффициент между магнитными составляющими поля.

Умножив уравнение (2) на $-\sin\varphi$, а уравнение (3) — на $\cos\varphi$ и сложив их, получим

$$p\sin\theta = -a\sin\varphi + b\cos\varphi, \quad (6)$$

где $a = \frac{U_{11}}{U_0}$, $b = \frac{U_{12}}{U_0}$.

Далее умножим уравнение (2) на $\cos\varphi$, а (3) — на $\sin\varphi$ и сложим:

$$\cos\theta = a\cos\varphi + b\sin\varphi. \quad (7)$$

Принимая замены $a = r_\theta\sin\Delta$, $b = r_\theta\cos\Delta$, $r_\theta^2 = a^2 + b^2 = \frac{U_{11}^2 + U_{12}^2}{U_0^2}$, преобразуем правые части уравнений (6), (7):

$$p\sin\theta = r_\theta \left(\frac{b}{r_\theta} \cos\varphi - \frac{a}{r_\theta} \sin\varphi \right) = r_\theta \cos(\varphi + \Delta), \quad (8)$$

$$\cos\theta = r_\theta \left(\frac{a}{r_\theta} \cos\varphi + \frac{b}{r_\theta} \sin\varphi \right) = r_\theta \sin(\varphi + \Delta), \quad (9)$$

где Δ — величина изменения курсового угла в зависимости от взаимного расположения машин.

Из соотношений (8), (9) нетрудно получить

$$\cos\theta = \sqrt{\frac{r_\theta^2 - p^2}{1 - p^2}}. \quad (10)$$

Из уравнений (2), (4) после аналогичных преобразований следует

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{r_\varphi^2 - p^2}{1 - p^2}}, \quad (11)$$

где $r_\varphi^2 = \frac{U_{21}^2 + U_{22}^2}{U_0^2}$.

Возведя в квадрат уравнения (2) и (3) и сложив их, получим

$$\cos^2\theta + p^2 \sin^2\theta = \frac{U_{11}^2 + U_{12}^2}{U_0^2}. \quad (12)$$

Аналогичная операция для уравнений (4) и (5) дает

$$\sin^2\theta + p^2 \cos^2\theta = \frac{U_{21}^2 + U_{22}^2}{U_0^2} \quad (13)$$

и после сложения уравнений (12) и (13) нормирующий множитель U_0 приобретает вид

$$U_0 = \sqrt{\frac{U}{1 + p^2}}, \quad (14)$$

где $U = U_{11}^2 + U_{12}^2 + U_{21}^2 + U_{22}^2$ — суммарная интенсивность наведенных напряжений в рамках антенн приемного модуля системы ориентации.

Теперь r_θ^2 можно переписать в виде

$$r_\theta^2 = \frac{(U_{11}^2 + U_{12}^2)(1 + p^2)}{U} \quad (15)$$

и аналогично

$$r_\varphi^2 = \frac{(U_{21}^2 + U_{22}^2)(1 + p^2)}{U}. \quad (16)$$

Следует отметить, что в приведенном рассмотрении r_θ^2 и r_φ^2 являются нормированными интенсивностями наведенных напряжений в рамках антенн с учетом p .

Таким образом, задавая коэффициент p и измеряя напряжения U_{11} , U_{12} , U_{21} , U_{22} , можно вычислить величины r_θ^2 , r_φ^2 , а затем по формулам (10) и (11) значения θ и $\psi = \theta - \varphi$.

В процесс измерения текущих координат объекта B входит и определение мгновенного расстояния между объектами A и B . Пользуясь соотношением¹

¹ Никольский В. В. Теория электромагнитного поля. М.: Высш. шк., 1961. 430 с.

$$U_0 = \frac{k}{D^3}, \quad (17)$$

где k — коэффициент, определяемый мощностью передатчика системы ориентации, можно найти дальность D в данный момент времени

$$D = \sqrt[3]{\frac{k}{U_0}}.$$

Интервал X и дистанция Y между машинами определяются через дальность соотношениями

$$X = D \sqrt{\frac{r_\theta^2 - p^2}{1 - p^2}}, \quad Y = D \sqrt{\frac{1 - r_\theta^2}{1 - p^2}}. \quad (18)$$

Алгоритм определения положения ведомой ЗТМ относительно ведущей приведен на рис. 2.

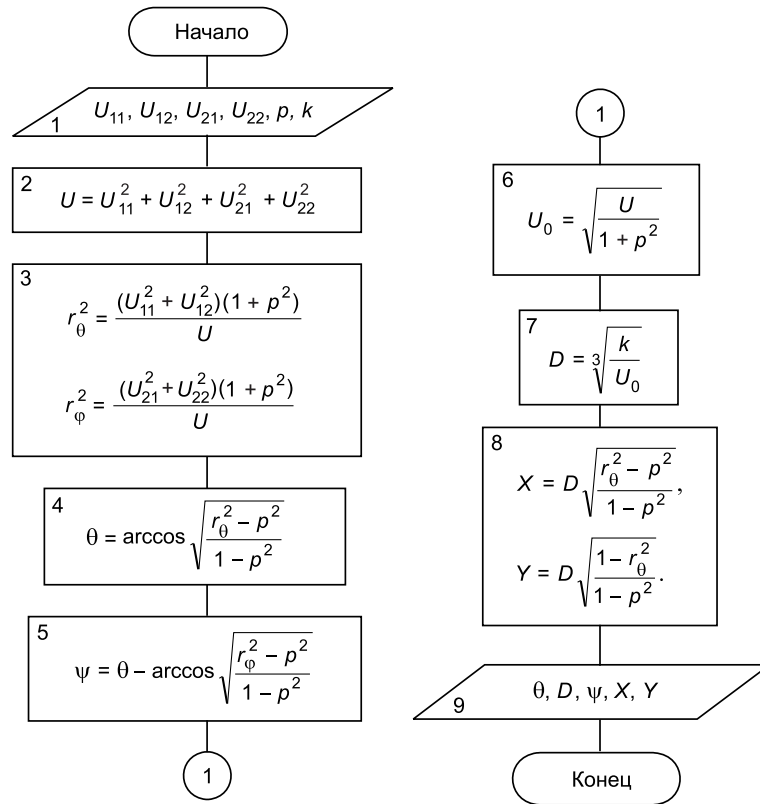


Рис. 2. Алгоритм определения положения ведомой землеройно-транспортной машины относительно ведущей

Исходными данными в алгоритме являются измеряемые напряжения в рамках антенн приемного модуля U_{11} , U_{12} , U_{21} , U_{22} , значение коэффициента между магнитными составляющими поля p и коэффициент k , зависящий от мощности передатчика системы ориентации.

Разработанный алгоритм позволяет на основе анализа сигналов датчиков системы ориентации ЗТМ определять текущие координаты и курсовые углы ведущей и ведомой машин в системе их дистанционного управления, имеет практическое значение и может быть полезен специалистам, работающим в области увеличения эффективности использования ЗТМ при одновременном повышении безопасности жизнедеятельности операторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устинов, Ю. Ф. Основные концептуальные принципы автоматизации и дистанционного управления землеройно-транспортными машинами [Текст]/Ю. Ф. Устинов, И. М. Тепляков, Ю. В. Авдеев и др. // Изв. вузов. Строительство.— 2005.— № 6.— С. 65–67.
2. Устинов, Ю. Ф. Проблема построения систем дистанционного управления землеройно-транспортными машинами [Текст]/Ю. Ф. Устинов, И. М. Тепляков, Ю. В. Авдеев и др. // Изв. вузов. Строительство.— 2006.— № 1.— С. 83–86.
3. Устинов, Ю. Ф. Техническая реализация системы дистанционного управления землеройно-транспортной машиной [Текст]/Ю. Ф. Устинов, И. М. Тепляков, Ю. В. Авдеев и др. // Изв. вузов. Строительство.— 2006.— № 5.— С. 85–88.
4. Устинов, Ю. Ф. Система слеящего дистанционного управления землеройно-транспортными машинами [Текст]/Ю. Ф. Устинов, И. М. Тепляков, Ю. В. Авдеев и др. // Изв. вузов. Строительство.— 2006.— № 8.— С. 73–76.

КОНОНОВ А. Д., канд. физ.-мат. наук, доц.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

АВДЕЕВ Ю. В., канд. техн. наук, доц.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

КОНОНОВ А. А., д-р техн. наук

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 27.11.08

Kononov A. D., candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Voronezh State Architectural-building University, Russia

Avdeev Yu. V., candidate of technical sciences, assistant professor, Voronezh State Architectural-building University, Russia

Kononov A. A., doctor of technical sciences, Voronezh State Architectural-building University, Russia

PROCESSING LOGIC OF SIGNALS OF TRANSMITTERS OF SYSTEM OF TRACKING FULL REMOTE CONTROL BY MOTORGRADERS, SCRAPERS AND BULLDOZERS

The Algorithm Permitting on the Basis of the Analysis of Signals of Transmitters a Management Systems Motorgraders, Scrapers and Bulldozers is Offered to Determine Present Coordinates and Relative Bearings Conducting and Led of Machines in System of Their Tracking Full Remote Control...

algorithm, motorgraders, scrapers and bulldozers, full remote control, system, coordinate.

REFERENCES

1. Ustinov, Yu. F. The basic conceptual principles of automation and full remote control by motorgraders, scrapers and bulldozers [Text]/Yu. F. Ustinov, I. M. Teplyakov, Yu. V. Avdeev and others // News of Higher Educational Institutions Construction.— 2005.— N 6.— P. 65–67.
2. Ustinov, Yu. F. A problem of build-up of remote control systems by motorgraders, scrapers and bulldozers [Text]/Yu. F. Ustinov, I. M. Teplyakov, Yu. V. Avdeev and others // News of Higher Educational Institutions Construction.— 2006.— N 1.— P. 83–86.
3. Ustinov, Yu. F. Engineering embodying of a remote control system by the motorgraders, scrapers and bulldozers [Text]/Yu. F. Ustinov, I. M. Teplyakov, Yu. V. Avdeev and others // News of Higher Educational Institutions Construction.— 2006.— N 5.— P. 85–88.
4. Ustinov, Yu. F. System of tracking full remote control by motorgraders, scrapers and bulldozers [Text]/Yu. F. Ustinov, I. M. Teplyakov, Yu. V. Avdeev and others // News of Higher Educational Institutions Construction.— 2006.— N 8.— P. 73–76.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.04

В. Э. АБСИМЕТОВ, С. В. КЛЮЕВ, А. В. КЛЮЕВ

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

Предложена методика оптимального проектирования стержневой системы. В качестве примера рассмотрено проектирование стальной пространственной башни. Выявлен наилучший вариант, соответствующий минимуму объема материала башни...

оптимальное проектирование, минимальный вес, нагрузка, башня, сталь.

Динамические нагрузки возникают за счет влияния окружающей среды (например, землетрясение или ветер). Поэтому учет динамического поведения несущих конструкций при анализе напряженно-деформированного состояния и оптимизации имеет большое значение.

В ранних исследованиях динамически нагруженные несущие конструкции оптимизировались в основном с дополнительными условиями по частотам собственных колебаний. Так как они не изменяются во времени, процедура оптимизации конструкций упрощается. Одну из первых работ, в которой рассматриваются изменяющиеся во времени нагрузки несущих конструкций посредством динамических нагрузок, опубликовал Кассис в 70-е гг. XX в., описывая проблему как оптимизационную задачу с ограничениями. За счет применения штрафной функции он преобразовал ее в последовательность оптимизационных задач без ограничений. Эти оптимизационные задачи решаются методом Дэвидона — Флетчера — Пауэлла [1].

1. Решение нелинейных задач, связанных с колебаниями.

1.1. Общие соображения. Дискретизация по методу конечных элементов сводит задачу к узловым параметрам $r(t)$, которые удовлетворяют уравнению движения

$$M\ddot{r}(t) + C\dot{r}(t) + Kr(t) = R(t), \quad (1)$$

где $M \in R^{n \times n}$ — матрица массы;

$C \in R^{n \times n}$ — матрица затухания колебаний;

$K \in R^{n \times n}$ — матрица жесткости;

$r(t) \in R^n$ — вектор перемещений;

$\dot{r}(t) \in R^n$ — вектор скоростей;

$\ddot{r}(t) \in R^n$ — вектор ускорений;

$R(t) \in R^n$ — вектор нагрузки;

n — число степеней свободы системы.

При этом $\dot{r}(t) = \frac{dr(t)}{dt}$, $\ddot{r}(t) = \frac{d^2r(t)}{dt^2}$ обозначают производные вектора r

по времени.

© Абсиметов В. Э., Ключев С. В., Ключев А. В., 2009

В линейной задаче матрицы M , C и K являются константами и решения можно получить методом интегрирования по времени. В то же время он обладает определенной универсальностью и может использоваться и для решения нелинейных задач.

1.2. Метод Ньюмарка. Ниже представлена реализация метода Ньюмарка для линейного и нелинейного анализа систем.

Линейное уравнение движения. По методу Ньюмарка предполагается линейное изменение ускорения от времени t до времени $t + \Delta t$:

$$\ddot{r}^{t+\Delta t} = \ddot{r}^t + [(1-\delta)\ddot{r}^t + \delta\ddot{r}^{t+\Delta t}] \Delta t, \quad (2)$$

$$r^{t+\Delta t} = r^t + \dot{r}^t \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{r}^t + \alpha \ddot{r}^{t+\Delta t} \right] \Delta t^2. \quad (3)$$

Параметры α и δ можно представить так, чтобы итерация была достаточно точна и стабильна. Если уравнение (3) для $\ddot{r}^{t+\Delta t}$ решать в зависимости от $r^{t+\Delta t}$ и потом $\ddot{r}^{t+\Delta t}$ подставить в уравнение (2), то получаются уравнения для $\ddot{r}^{t+\Delta t}$ и $\dot{r}^{t+\Delta t}$, которые содержат в качестве неизвестного только перемещения $r^{t+\Delta t}$:

$$\ddot{r}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\alpha \Delta t^2} (r^{t+\Delta t} - r^t - \dot{r}^t \Delta t) - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{r}^t, \quad (4)$$

$$\dot{r}^{t+\Delta t} = \frac{\delta}{\alpha \Delta t} (r^{t+\Delta t} - r^t) + \left(1 - \frac{\delta}{\alpha} \right) \dot{r}^t + \left(1 - \frac{\delta}{2\alpha} \right) \Delta t \ddot{r}^t. \quad (5)$$

Для расчета перемещений, скоростей и ускорений для времени $t + \Delta t$ рассмотрим уравнение движения (1) для времени $t + \Delta t$:

$$M\ddot{r}^{t+\Delta t} + C\dot{r}^{t+\Delta t} + Kr^{t+\Delta t} = R^{t+\Delta t}. \quad (6)$$

При подстановке соотношений (4) и (5) в уравнение (6) получаем:

$$\left[\frac{1}{\alpha \Delta t^2} M + \frac{\delta}{\alpha \Delta t} C + K \right] r^{t+\Delta t} = R^{t+\Delta t} + M \left[\frac{1}{\alpha \Delta t^2} r^t + \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{r}^t + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{r}^t \right] + C \left[\frac{\delta}{\alpha \Delta t} r^t + \left(\frac{\delta}{\alpha} - 1 \right) \dot{r}^t + \left(\frac{\delta}{2\alpha} - 1 \right) \Delta t \ddot{r}^t \right]. \quad (7)$$

Определяем перемещения $r^{t+\Delta t}$, а затем скорости и ускорения для момента $t + \Delta t$ из уравнений (4) и (5).

Интегральные параметры δ и α находятся в пределах: $0 \leq \delta \leq 1$ и $0 \leq \alpha \leq 1/2$, причем метод является безусловно стабильным при $\delta \geq 1/2$ и $\alpha \geq 1/4$.

Нелинейные уравнения движения. В нелинейных динамических задачах матрицы M , K , C и вектор R в уравнении движения могут зависеть от r , \dot{r} и \ddot{r} :

$$M\ddot{r} + C\dot{r} + Kr = R. \quad (8)$$

Система уравнений (7) решается итеративно по следующему итеративному предписанию:

$$[\alpha_0 M + \alpha_1 C + K_{i-1}^{t+\Delta t}] \Delta r_i = R^{t+\Delta t} - F_{i-1}^{t+\Delta t} + M[\alpha_0 r^t + \alpha_2 \dot{r}^t + \alpha_3 \ddot{r}^t] + C[\alpha_1 r^t + \alpha_4 \dot{r}^t + \alpha_5 \ddot{r}^t] - (\alpha_0 M + \alpha_1 C) r_{i-1}^{t+\Delta t}; \quad (9)$$

$$r_i^{t+\Delta t} = r_{i-1}^{t+\Delta t} + \Delta r_i; \quad (10)$$

$$\ddot{r}^{t+\Delta t} = \alpha_0 (r^{t+\Delta t} - r^t) - \alpha_2 \dot{r}^t - \alpha_3 \ddot{r}^t; \quad (11)$$

$$\dot{r}^{t+\Delta t} = \dot{r}^t + \alpha_6 \ddot{r}^t + \alpha_7 \dot{r}^{t+\Delta t}, \quad (12)$$

где $K_{i-1}^{t+\Delta t}$ — тангенциальная матрица жесткости;
 $F_{i-1}^{t+\Delta t}$ — вектор зависящих от $r_{i-1}^{t+\Delta t}$ узловых сил ($F_{i-1}^{t+\Delta t} = K_{i-1}^{t+\Delta t} r_{i-1}^{t+\Delta t}$);
 i — указатель итераций;
 $\alpha_0, \dots, \alpha_7$ — сокращенные обозначения:

$$\alpha_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2}, \quad \alpha_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}, \quad \alpha_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1, \quad \alpha_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1,$$

$$\alpha_5 = \frac{\delta}{2\alpha} - 1, \quad \alpha_6 = (1 - \delta)\Delta t, \quad \alpha_7 = \delta \Delta t.$$

Параметры α и δ должны быть установлены соответственно в пределах:
 $\delta \geq \frac{1}{2}; \alpha \geq \frac{1}{4} \left(\delta + \frac{1}{2} \right)^2$. В случае, когда $\delta = 1/2, \alpha = 1/4$, для введения ма-
лого искусственного затухания эти параметры видоизменяются:

$$\delta = 0,5 + 0,05, \quad \alpha = 0,25(1 + 0,05)^2.$$

1.3. Управление итеративным решением. Ход нелинейного рас-
чета определяется блок-схемой (рис. 1). Здесь K_{r0} — известное значе-
ние для начального условия. Для $K_{r0} > 0$ определяются начальные усло-
вия путем двух статических расчетов, в противном случае начальные зна-
чения для r^0, \dot{r}^0 равны нулю. Число K_N ограничивает максимальное
количество итераций в течение временного шага. Если фактическое чис-
ло итераций $i > K_N$, то или делится пополам на величину шага времени,
или преобразуется модифицированная итерация Ньютона — Рафсона в
обычную итерацию. K_{mn} — параметр итерации. При $K_{mn} = 0$ тангенциаль-
ную матрицу жесткости $K_{i-1}^{t+\Delta t}$ составляют только один раз на каждый шаг
времени; это соответствует модифицированной итерации Ньюто-
на — Рафсона. Итерация заканчивается в случае, если $\frac{|\Delta r_i|}{|r_i^{t+\Delta t}|}$ меньше,

чем заданная величина ϵ .

2. Пример. Рассмотрим динамически нагруженную решетчатую баш-
ню из горячекатаной равнобокой уголкового стали (рис. 2). 154 элемента
системы разделены на 10 групп в зависимости от зоны расположения и на-
значения.

Определим минимальный вес системы под действием нагрузок, пока-
занных в табл. 1, где $T(t)$ есть зависящая от времени функция с макси-
мальным первым значением:

Таблица 1

Нагрузки на башню			
Узлы	$R_x(t)$, кН	R_y , кН	R_z , кН
A	-10,702 $T(t)$	0	-5,356
B	-10,702 $T(t)$	0	-5,356
C	-9,771 $T(t)$	0	-5,356
D	-8,515 $T(t)$	0	-4,817

$$T(t) = \begin{cases} 25t & 0 \leq t \leq 0,04 \\ 25(0,08 - t) & 0,04 \leq t \leq 0,08 \\ 0 & t \geq 0,08 \end{cases}$$

Площади поперечных сечений
10 групп элементов являются опти-
мизационными переменными зада-
чами. Дополнительные условия
связаны с напряжениями в elemen-
тах и перемещениями в направлении оси x узлов A, B, C, D. Расчетное
сопротивление ± 240 МПа, допускаемое перемещение — 10 см.

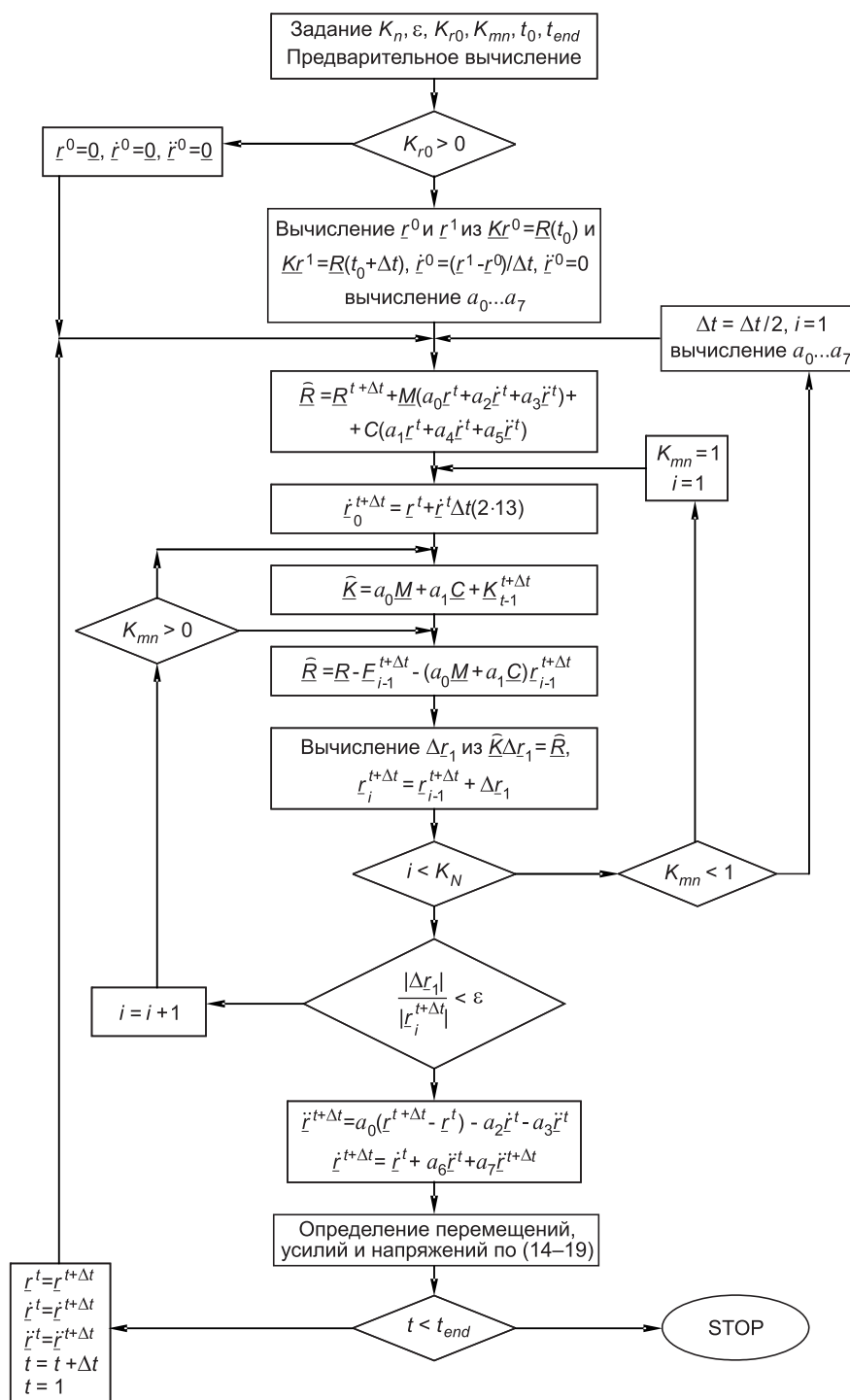


Рис. 1. Блок-схема нелинейного расчета

Данные о материале: $\rho = 7,85 \cdot 10^{-2}$ МПа, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа.

Для определения перемещений узлов системы и напряжений в элементах и деформирования системы использовалось интегрирование по времени по методу Ньюмарка. Интегрирование проводилось во временном пространстве от 0 до 0,1 с с величиной шага $\Delta t = 0,01$ с. По эволюционной стратегии 10+10 система оптимизировалась каждый раз без учета

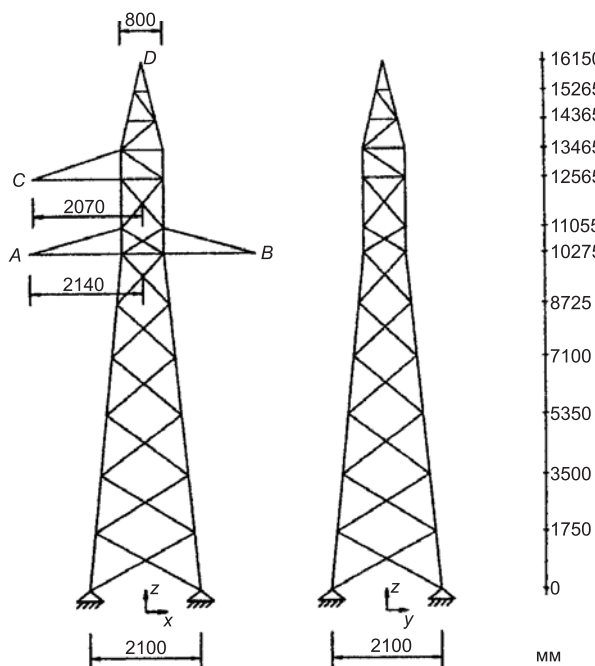


Рис. 2. Решетчатая башня

и с учетом нелинейных колебаний системы. 10 случайно выбранных начальных величин объема для обоих случаев не идентичны. Объем минимальной начальной величины составляет в обоих случаях $V = 0,3514 \text{ м}^3$.

В линейном случае получено решение (система 1 в табл. 2) с объемом $V = 0,0820 \text{ м}^3$. Проведен расчет 736 конечных элементов в 134 генерациях. При этом максимальное и минимальное напряжения по всем элементам составили соответственно 153,5 МПа (элементы 7 и 13 из группы 1) и 173,3 МПа (элемент 25 из группы 3). Максимальные перемещения узлов A, B,

C, D соответственно равны 4,42; 4,57; 6,36; 9,99 см.

В нелинейном случае при 429 конечных элементах и 80 генерациях получено решение (система 2 в табл. 2) с объемом $V = 0,0825 \text{ м}^3$. При этом максимальное и минимальное напряжения по всем элементам со-

Таблица 2
Оптимальные поперечные сечения элементов башни

	Система 1		Система 2	
	L	$A, \text{ см}^2$	L	$A, \text{ см}^2$
x_1	80×8	12,270	80×8	12,270
x_2	80×8	12,270	80×8	12,270
x_3	60×6	6,909	60×6	6,909
x_4	30×3	1,737	30×3	1,737
x_5	20×3	1,119	20×3	1,119
x_6	25×3	1,419	25×3	1,419
x_7	20×3	1,119	30×3	1,737
x_8	20×3	1,119	20×3	1,119
x_9	20×3	1,119	20×3	1,119
x_{10}	20×3	1,119	20×3	1,119
V	0,0820 м^3		0,0825 м^3	
Вес	643,865 кг		647,743 кг	

Таблица 3
Данные контрольных расчетов

Контроль- ный расчет	Система 1		Система 2	
	линей- ный	нелиней- ный	линей- ный	нелиней- ный
$q_A, \text{ см}$	4,42	4,42	4,42	4,42
$q_B, \text{ см}$	4,57	4,57	4,57	4,57
$q_C, \text{ см}$	6,36	6,36	6,36	6,36
$q_D, \text{ см}$	9,99	10,01	9,99	9,99
$\sigma_{\text{max}}^+, \text{ МПа}$	153,5	154,3	152,9	153,6
$\sigma_{\text{max}}^-, \text{ МПа}$	-173,3	-177,2	-169,2	-173,3

ставили соответственно 153,6 МПа (элемент 13 из группы 1) и 173,3 МПа (элемент 25 из группы 3). Максимальные перемещения узлов A, B, C, D соответственно равны 4,42; 4,56; 6,35; 9,99 см.

Для контроля обоих решений проведено дальнейшее исследование, в котором каждый раз приводились линейный и нелинейный итерационные расчеты. Максимальные напряжения и перемещения из контрольных расчетов даны в табл. 3.

На рис. 3 приведен итерационный процесс для обоих случаев. Для обоих решений обозначения профилей и площади поперечных сечений приведены в табл. 2.

В то время как напряжения и перемещения системы 2 из обоих контрольных расчетов лежат в допускаемой области, имеет место небольшое нарушение дополнительного условия относительно перемещений для узла *D* системы 1 при нелинейном контрольном расчете. Практически это нарушение незначительно. Однако различие может иметь большое влияние, если оптимизируемая система была бы жесткой, так как оптимум задач оптимизации конструкций часто лежит на границе допускаемой области и зависит от ее локализации при расчете по методу конечных элементов.

Выводы. Блок-схема итерационного оптимизационного расчета имеет приемлемое согласование с многочленной эволюционной стратегией оптимизации.

На примере проектирования стержневой конструкции произведено сопоставление результатов линейной и нелинейной постановок задач. Незначительное расхождение соответствующих величин объемов позволяет рекомендовать линейный расчет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fretcher, R. A rapidly convergent descent method for minimization [Текст]/ R. Fretcher, M. J. D. Powell//Comp. J.— 1963.— Vol. 6, N 2.— P. 163–168.

АБСИМЕТОВ В. Э., д-р техн. наук, проф., проректор

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

КЛЮЕВ С. В., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

КЛЮЕВ А. В., студент

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

Получено 15.01.09

Absimetov V. E., doctor of technical sciences, professor, prorector, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Klyuyev S. V., candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Klyuyev A. V., student, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

THE OPTIMAL DESIGN OF DYNAMIC LOADED SPATIAL SYSTEMS

The optimal designing technique of spatial system has been suggested. The designing of a steel spatial tower is considered here as an example. The best variant corresponding to the minimum of volume of tower material was revealed...

the optimal design, minimum weight, load, tower, steel.

REFERENCES

1. Fretcher, R. A rapidly convergent descent method for minimization [Text]/ R. Fretcher, M. J. D. Powell//Comp. J.—1963.— Vol. 6, N 2.— P. 163–168.

УДК 624.21.016

С. А. БОКАРЕВ, Л. Ю. СОЛОВЬЕВ, Е. В. РОГОВА

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

Предложена методика оценки грузоподъемности эксплуатируемых сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, разработанная в Сибирском государственном университете путей сообщения, использующая главные положения СНиП 2.05.03–84*, основанная на методе классификации и учитывающая особенности сталежелезобетонных пролетных строений и специфические повреждения, появляющиеся в конструкциях при их эксплуатации...

расчетная нагрузка, метод конечных элементов, железобетонная плита, напряженно-деформированное состояние.

В соответствии с Правилами технической эксплуатации железных дорог России все мосты классифицируют по грузоподъемности с целью определения условий пропуска по ним различных поездных нагрузок, включая тяжелые транспортеры, и для решения вопросов об усилении, ремонте или замене сооружения. Расчеты грузоподъемности выполняют для тех сталежелезобетонных пролетных строений, у которых по результатам обследования выявлены:

а) повреждения в железобетонной плите (слабый бетон, сколы, уменьшающие поперечные сечения, трещины в поперечных швах объединения железобетонной плиты, разрывы стержней продольной арматуры и т.п.);

б) неисправности металлических балок (общие деформации конструкций, местные деформации и погнутости элементов верхнего пояса и стенок балок, влияющие на несущую способность и эксплуатационные качества пролетных строений; отсутствие отдельных элементов или необходимых соединений; некачественное выполнение болтовых и заклепочных соединений (ослабление, отсутствие болтов или заклепок и др.), включая крепления упоров железобетонной плиты);

в) отклонения от проектного положения опорных частей металлических балок;

г) несоответствие проектных и фактических размеров в поперечных сечениях.

В настоящее время нет единого документа, регламентирующего классификацию по грузоподъемности сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов. Оценку грузоподъемности осуществляют, используя основные положения СНиП 2.05.03–84* «Мосты и трубы» [1] и отдельные рекомендации руководств по определению грузоподъемности металлических и железобетонных пролетных строений [2, 3]. Однако эти документы не учитывают ни конструктивные особенности сталежелезобетонных пролетных строений, ни специфические повреждения, появляющиеся в конструкции при ее эксплуатации. Предлагаемая методика оценки грузоподъемности эксплуатируемых сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, разработанная в СГУПС, ис-

© Бокарев С. А., Соловьев Л. Ю., Рогова Е. В., 2009

пользует главные положения СНиП [1], основана на методе классификации и учитывает особенности сталежелезобетонных пролетных строений и повреждения, появляющиеся в процессе эксплуатации.

Определение грузоподъемности сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов производится методом классификации по предельным состояниям, определяющим невозможность эксплуатации (по прочности главных балок) или допускающим эксплуатацию с ограничениями (по прочности железобетонной плиты).

Согласно [1, 4] предельное состояние составной сталежелезобетонной балки определяется следующими критериями:

- достижение значений предельных напряжений в стальных поясах;
- достижение относительными деформациями в центре тяжести сечения железобетонной плиты предельной величины $\epsilon_b = 0,0016$.

Работа железобетонной плиты в составе пролетного строения учитывается воздействием на стальную балку разгружающей силы N_{br}^k , равной внутреннему сжимающему осевому усилию в железобетонной плите и вызывающей в стальной балке растягивающее осевое усилие и отрицательный изгибающий момент. Диаграмма деформирования бетона принимается в форме идеализированной диаграммы Прандтля.

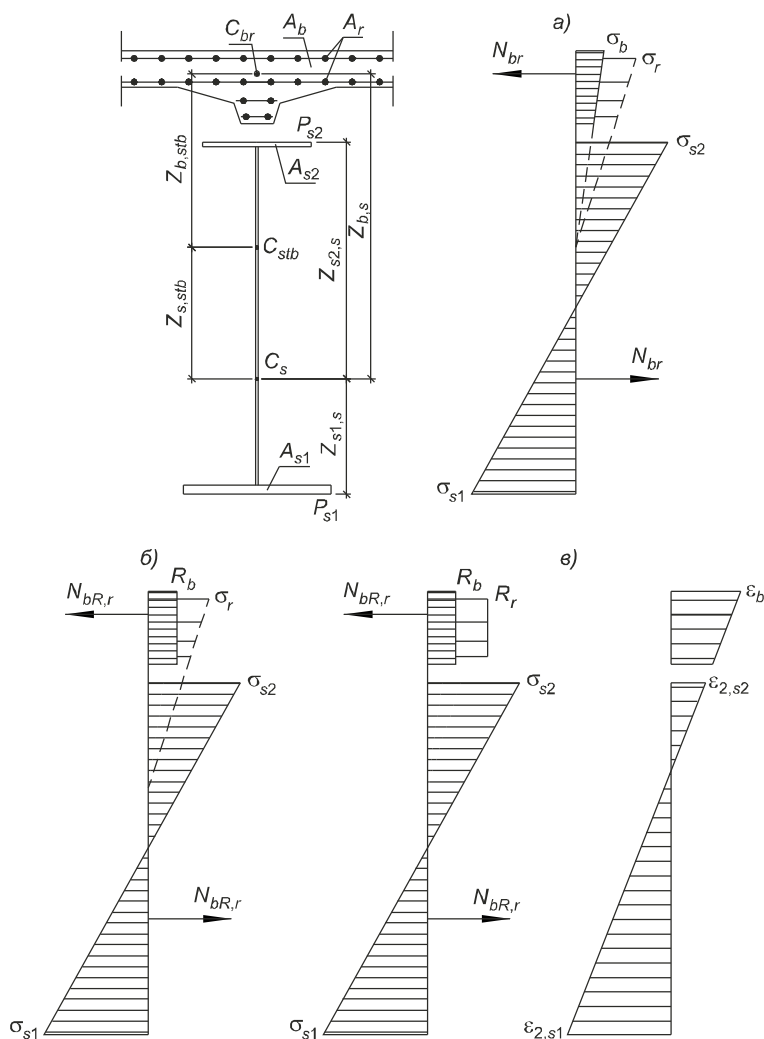


Рис. 1. Эпюры напряжений и относительных деформаций в случаях а–в проверок прочности сталежелезобетонного сечения

При принятых предпосылках работы материалов (стали, бетона) и критериях предельного состояния возможны три основных расчетных случая проверки прочности составной сталежелезобетонной балки (рис. 1). В 1-м случае стальная и железобетонная части конструкции работают упруго (рис. 1, а); во 2-м — стальная часть конструкции и продольная арматура железобетонной плиты работают упруго, а бетон — в пластической стадии (рис. 1, б); в 3-м случае стальная часть конструкции работает упруго, а железобетонная — в пластической стадии (рис. 1, в).

Для определения расчетного случая необходимо вычислить текущие напряжения в бетоне на уровне центра тяжести сечения плиты σ_b и в арматуре σ_r в предположении упругой работы, но с учетом ползучести бетона:

$$\sigma_b = \frac{M_2}{n_b W_{b, stb}} - \sigma_{b, kr} \leq m_b R_b, \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{M_2}{W_{b, stb}} + \sigma_{r, kr} \leq m_r R_r, \quad (2)$$

где $\sigma_{b, kr}$ — величина напряжения на уровне центра тяжести бетона от его ползучести;

$\sigma_{r, kr}$ — величина напряжения в арматуре от ползучести бетона;

M_2 — изгибающий момент второй стадии работы сталежелезобетонного пролетного строения.

Если $\sigma_b < m_b R_b$, используют случай 1 (см. рис. 1, а), при $\sigma_b \geq m_b R_b$ предполагается пластическая работа бетона с прямоугольной эпюрой напряжений. Если при этом $\sigma_r < m_r R_r$, имеет место случай 2 (см. рис. 1, б), а в противном — случай 3 (см. рис. 1, в), предполагающий работу продольной арматуры в пластической стадии. Исходя из сделанных предпосылок, были получены формулы для определения предельно допускаемой временной нагрузки для элементов сечения сталежелезобетонного пролетного строения.

Предельно допустимая временная нагрузка для верхнего пояса стальной балки по нормальным напряжениям может быть определена по формуле

$$k_{\text{впс}2\text{с}} = \frac{1}{\varepsilon_k n_k \Omega} \left[\chi W_{s2,s} m R_{y2} + N_{br}^k \left(Z_{bs} + \frac{\chi_3}{m_1} \frac{W_{s2,s}}{A_s} \right) - \varepsilon_p (n_1 (P_{st} + P_b + P_3) + n_2 P_{bal}) \Omega \right], \quad (3)$$

где ε_k — коэффициент, учитывающий долю временной нагрузки, приходящейся на одну балку;

n_k, n_1, n_2 — коэффициенты надежности к нагрузкам;

Ω — площадь линии влияния изгибающего момента в сечении;

χ — поправочный коэффициент к моменту сопротивления при расчете прочности стального пояса;

$m = 0,9$ — коэффициент условий работы стальной конструкции принимается согласно п. 4.19* [1];

R_{y2} — основное расчетное сопротивление металла листов верхнего пояса;

N_{br}^k — нормальная разгружающая сила;

$A_s, Z_{bs}, W_{s2,s}$ — геометрические характеристики расчетного сечения;

χ_3 — поправочный коэффициент, определяемый согласно указаниям п. 5.19 [1];

ε_p — коэффициент, учитывающий долю постоянных нагрузок, приходящихся на одну балку;

P_{st}, P_b — постоянные нагрузки от собственного веса пролетного строения и собственного веса железобетонной плиты балластного корыта соответственно;

P_3 — постоянная нагрузка от собственного веса перил, тротуаров и других элементов, монтируемых после включения плиты в совместную работу со стальными балками;

P_{bal} — постоянная нагрузка от веса балласта с частями пути.

Коэффициент m_1 , учитывающий разгрузку стального верхнего пояса недонапряженным бетоном при достижении напряжений в металле предела текучести, определяют по формуле

$$m_1 = 1 + \frac{m_b R_b - \sigma_b}{m R_y} \frac{A_b}{A_{s2}}, \quad (4)$$

где $m_b = 0,85$ — коэффициент условий работы бетона, учитывающий возможное снижение прочности бетона в силу влияния неблагоприятных факторов, трудно поддающихся количественной оценке (принимается по таблице 24 [1]);

R_b — расчетное сопротивление бетона на сжатие;

A_b — площадь бетона плиты, включаемая в расчет;

A_{s2} — площадь верхнего пояса.

Если $\sigma_b > m_b R_b$, то принимают $\sigma_b = m_b R_b$. Значение коэффициента m_1 не может быть менее 1,0 и более 1,2.

Предельно допустимая временная нагрузка для нижнего пояса стальной балки по нормальным напряжениям может быть определена по формуле

$$k_{вп\ s\ s} = \frac{1}{\varepsilon_k n_k \Omega} \left[\left(\chi W_{s1,s} m R_{y1} + N_{br}^k \left(Z_{bs} - \chi_3 \frac{W_{s1,s}}{A_s} \right) \right) - \varepsilon_p (n_1 (P_{st} + P_b) + n_2 P_{bal}) \Omega \right], \quad (5)$$

где R_{y1} — расчетное сопротивление листов нижнего пояса.

Предельно допустимая временная нагрузка для бетона плиты определяется по формуле

$$k_{впb} = \frac{1}{100000 \cdot \varepsilon_k n_k \Omega} \left[\left(0,0016 \cdot \frac{E_s}{k} W_{bs} + N_{br}^k \left(Z_{bs} - \frac{W_{bs}}{A_s} \right) \right) - \varepsilon_p n_2 P_{bal} \Omega \right], \quad (6)$$

где k — поправочный коэффициент, учитывающий увеличение деформаций бетона при развитии пластических деформаций в прилегающем к нему стальном верхнем поясе [1, п. 5.19].

Вычислим нормальную разгружающую силу:

$$N_{br}^k = (A_b \sigma_b n_b + A_r \sigma_r) \cdot k_{br}^\Phi, \quad (7)$$

где A_r — площадь арматуры плиты;

$m_r = 0,95$ — коэффициент условий работы арматуры, принимаемый по п. 3.39–3.45 [1];

R_r — расчетное сопротивление арматуры;

k_{br}^Φ — коэффициент, учитывающий степень включения плиты балластного корыта в совместную работу со стальными балками.

Значения коэффициента k_{br}^Φ для «крайних» случаев состояния сталежелезобетонного пролетного строения очевидны (рис. 2: I — исправное — железобетонная плита включена в совместную работу с главными балка-

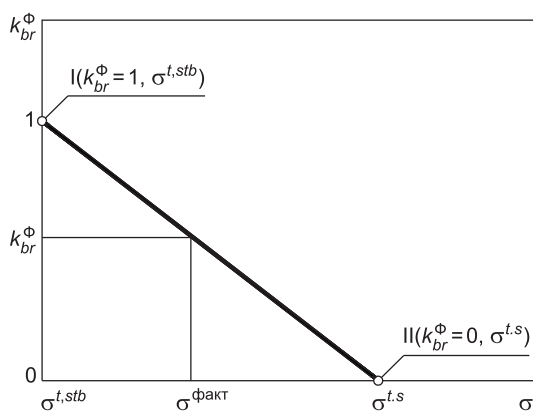


Рис. 2. График изменения значения коэффициента k_{br}^{Φ}

ми; II — дефектное — пролетное строение работает как металлическая балка).

Для промежуточных состояний степень включения плиты балластного корыта в совместную работу со стальными балками может быть определена на основе натурных испытаний по следующей формуле:

$$k_{br}^{\Phi} = 1 - \frac{|\sigma^{\text{факт}}| \cdot k^{\text{стб}} - |\sigma^{\text{т,стб}}|}{|\sigma^{\text{т,с}}| - |\sigma^{\text{т,стб}}|}, \quad (8)$$

где $\sigma^{\text{факт}}$ — фактические напряжения в верхнем поясе

стальной балки, полученные по измеренным деформациям; $k^{\text{стб}}$ — поправочный коэффициент к фактическим напряжениям, исключаяющий влияние балласта и рельсового пути на перераспределение напряжений в поясах главных балок пролетных строений в состояниях, далеких от предельных;

$\sigma^{\text{т,стб}}$ — расчетные напряжения в верхнем поясе стальной балки, подсчитанные в предположении исправной работы пролетного строения;

$\sigma^{\text{т,с}}$ — расчетные напряжения в верхнем поясе стальной балки, подсчитанные в предположении полного выключения плиты из совместной работы.

Поскольку величина допускаемой эквивалентной распределенной временной нагрузки $k_{вр}$ определяется через величины $N_{br,i}^k$, χ_3 и m_1 , которые в свою очередь зависят от величины $k_{вр}$, то значения $k_{вр}$ для каждого элемента расчетного сечения могут быть определены итерационным путем в следующем порядке:

а) назначают первоначальную величину временной вертикальной распределенной нагрузки $k_{вр,1}$;

б) от нагрузки $k_{вр,1}$ вычисляют напряжения в бетоне σ_{bi} , арматуре σ_{ri} , значения теоретической разгружающей силы $N_{br,i}^k$ и коэффициентов χ_3 и m_1 ;

в) подставляя $N_{br,i}^k$, χ_3 и m_1 в формулы, получают допускаемую нагрузку второго приближения $k_{вр,2}$;

г) если разница $|k_{вр,1} - k_{вр,2}| > 0,01$, то используя $k_{вр,2}$ в качестве $k_{вр,1}$, повторяют расчет, начиная с пункта «б».

Переход к классам по прочности выполняют согласно методологии, принятой в Руководствах по определению грузоподъемности [2, 3]. Класс пролетного строения определяют по формуле

$$K = \frac{k_{вр}}{k_n(1 + \mu)}, \quad (9)$$

где k_n — величина эталонной нагрузки;

$(1 + \mu)$ — динамический коэффициент, определяемый по п. 2.6 Руководства [3].

Для оценки выбранного подхода были использованы данные, полученные сотрудниками Сибирского государственного университета путей сообщения, Научно-исследовательского института мостов и дефектоскопии Федерального агентства железнодорожного транспорта и Дальневосточного государственного университета путей сообщения при обследовании и испытаниях сталежелезобетонных пролетных строений, экс-

платируемых на Северном широтном ходу Дальневосточной железной дороги. Определение поправочного коэффициента k^{stb} к фактическим напряжениям производилось на основе созданных конечно-элементных моделей пролетных строений при помощи вычислительного комплекса COSMOSM с моделированием и без мостового полотна и рельсового пути для пролетов 23,0 м (рис. 3), 27,0, 33,6, 45,0 и 55,0 м.

Геометрические параметры созданных моделей пролетных строений полностью повторяют типовые проекты № 3.501-49 инв. № 739/2, 739/3, 739/4, 739/6 и 739/7 для пролетов 23,0 м, 27,0, 33,6, 45,0 и 55,0 м соответственно. Главные балки моделировали 4-узловыми пластинчатыми конечными элементами (КЭ) типа «SHELL4», продольные и поперечные связи — 2-узловыми КЭ типа «BEAM3D». На верхние пояса главных балок установлены железобетонные плиты балластного корыта, которые включены в совместную работу с ними при помощи упоров. Плиты моделировали 8-узловыми объемными КЭ типа «SOLID». Мостовое полотно и рельсовый путь моделировали двумя способами:

1) как массу, приложенную на уровне верха плиты балластного корыта: у КЭ, моделирующих верхний слой плиты, увеличивался параметр плотности «DENS» на величину, определенную массой балласта, находящейся над ними (рис. 3, а);

2) 8-узловыми объемными КЭ типа «SOLID» по опалубочным размерам балластной призмы, представленной в типовых проектах (рис. 3, б).

Закрепление модели пролетного строения было выполнено путем постановки связей, запрещающих вертикальные, горизонтальные перемещения, а также продольные в зависимости от типа опорной части. Связи располагались по узлам нижнего пояса главных балок в местах расположения осей опорных частей. Далее был проведен ряд расчетов на соответствие напряжений в верхнем и нижнем поясах главных балок пролетных строений, зафиксированных при испытаниях и полученных в результате расчетов конечно-элементных моделей от испытательной нагрузки. Результаты по некоторым пролетным строениям приведены в табл. 1.

Анализируя данные табл. 1, можно сделать вывод, что балласт и рельсовый путь воспринимают часть временной вертикальной нагрузки и существенно влияют на распределение напряжений в поясах главных балок пролетных строений в состояниях, далеких от предельных. Чтобы исключить влияние балласта и рельсового пути на перераспределение напряжений в поясах главных балок, в расчетные формулы к фактическим напряжениям был введен поправочный коэффициент k^{stb} . Для определения величины коэффициента k^{stb} были выполнены расчеты конечно-элементных моделей (с мостовым полотном и рельсовым путем и без них) каждого типа пролетных строений с толщинами балласта под шпалой от

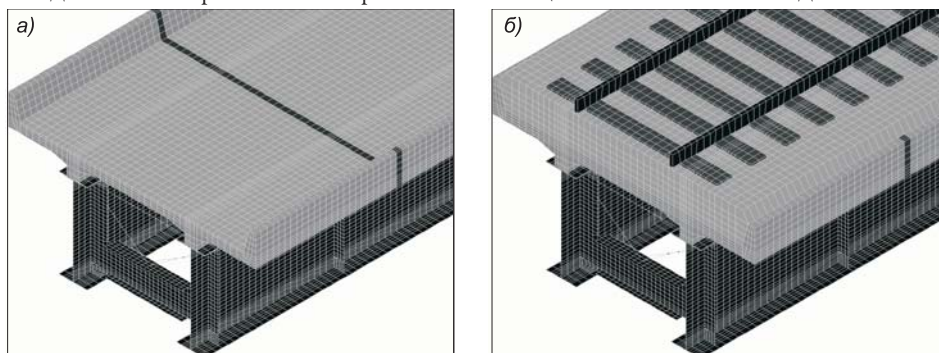


Рис. 3. Модель пролетного строения $L_p = 23,0$ м

Таблица 1

**Измеренные и расчетные напряжения в поясах балок
от статической испытательной нагрузки**

L_p , м	№ п/п	Нагрузка, тип/величина, тс/м	Прочность бетона швов омоноличивания, МПа		Напряжения в балках, кгс/см ²		
			факти- ческая	проект- ная	фактиче- ские	расчетные	
						без МП	с МП
					верх низ	верх низ	верх низ
23,0	1	ЗТЭ10М 7,32	24,0	30,0	-60 410	-112 446	-63 416
	2		26,0		-61 401		
	3	ТЭМ2 6,59	25,0		-58 357	-101 402	-57 381
	4	ЗТЭ10М 7,30	*		-785 590	-1494 715	-576 513
	5	ЗТЭ10М 7,30	*		-745 658	-1494 715	-501 446
27,0	6	ТЭМ2 6,17	19,2		-71 296	-116 338	-95 360
	7	2ТЭ10М 8,21	16,6		-86 379	-155 503	-108 446
	8	ТЭМ2 6,17	*		-554 355	-1091 597	-493 468
	9	2ТЭ10М 8,00	*		-1021 643	-1255 686	-567 539
	10	2ТЭ10М 8,00	*		-909 515	-1255 686	-567 539
33,6	11	ТЭМ2 5,36	38,1	40,0	-74 334	-134 349	-78 335
	12	ТЭМ2 5,36	14,7		-67 254	-126 345	-70 330
	13	ЗТЭ10М 7,32	29,3		-198 564	-225 493	-162 460
	14	ЗТЭ10М 7,32	32,0		-181 523	-220 487	-157 454
	15	ЗТЭ10М 7,32	23,0		-223 571	-236 501	-168 467

Примечание. МП — мостовое полотно и рельсовый путь. Знак «*» означает, что измерить прочность бетона не удалось из-за низкого качества поверхности или разрушения бетона шва. Жирным шрифтом выделены напряжения, превышающие расчетные значения.

15 до 70 см с шагом 5 см. Полученные значения поправочного коэффициента k^{stb} для каждого типа пролетных строений представлены в табл. 2.

Пролетные строения, где были отмечены повышенные напряжения в поясах (см. табл. 1), находятся в неудовлетворительном техническом состоянии. Причем, как правило, по результатам обследования на изменение этих показателей работы пролетных строений в значительной степени влияет наличие трещин раскрытием более 1 мм между бетоном омоноличивания швов и бетоном плит. Практически на всех пролетных строениях, швы омоноличивания которых имели зазоры между бетоном шва и бетоном плиты, зафиксированы повышенные напряжения в поясах, хотя поверхностная прочность бетона омоноличивания швов на этих конструкциях, как правило, была не многим меньше проектной

Таблица 2
Поправочный коэффициент k^{stb}
для измеренных напряжений

Инв. № типового проекта	Расчет- ная дли- на ПС, м	Значение коэффи- циента k^{stb}	
		верхний пояс	нижний пояс
739/2	23,0	1,85	1,12
739/3	27,0	1,61	1,10
739/4	33,6	1,40	1,08
739/6	45,0	1,24	1,05
739/7	55,0	1,19	1,05

Таблица 3
Результаты классификации

L_p , м	Поряд- ковый номер ПС	Классы элементов ПС					
		без учета k_{br}^{Φ}			с учетом k_{br}^{Φ}		
		ниж- ний пояс	верх- ний пояс	бетон плиты	ниж- ний пояс	верх- ний пояс	бетон плиты
33,6	13	9,57	8,30	7,35	9,26	6,48	5,66
	14	8,53	7,71	6,71	8,42	7,04	6,10
	15	7,73	5,44	4,58	7,56	4,47	3,67

прочности бетона (ПС № 13–15, см. табл. 1). В то же время прочность бетона швов омоноличивания на пролетных строениях № 7 и 12 (см. табл. 1) в два и более раз ниже проектной, однако напряжения в поясах главных балок говорят о нормальной работе конструкций. Здесь следует иметь в виду, что измерения, выполненные методом неразрушающего контроля, показывают лишь поверхностную прочность материала и не дают полной информации о прочности всего массива, а следовательно, и о степени включения железобетонной плиты в совместную работу пролетных строений.

Для пролетных строений № 13–15 был подсчитан класс по грузоподъемности с учетом коэффициента k_{br}^{Φ} и без него. Результаты вычислений, приведенные в табл. 3, показывают, что величина класса пролетных строений зависит от нарушения сплошности составных сечений балок и учета степени включения железобетонной плиты в совместную работу, а не от величины поверхностной прочности бетона.

В тех случаях, где бетон омоноличивания швов почти полностью разрушен (ПС № 4, 5, 8–10, см. табл. 1), совместная работа железобетонной плиты и главных балок отсутствует. Класс верхнего пояса по настоящей методике при условной прочности бетона 0 кгс/см² совпадает с классом стальной балки, определенной по Руководству [2].

Анализируя полученные результаты натурных исследований и выполненных расчетов, можно сделать вывод, что предложенная методика достаточно точно отражает истинную работу пролетных строений и может быть применена для классификации сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов по грузоподъемности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 3.06.07–86. Мосты и трубы: Правила обследования и испытаний.— М.: Госстрой СССР, 1987.— 41 с.
2. Руководство по определению грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов/МПС.— М.: Транспорт, 1987.
3. Руководство по определению грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов/МПС.— М.: Транспорт, 1989.— 125 с.
4. Стрелецкий, Н. Н. Сталежелезобетонные пролетные строения мостов [Текст]/Н. Н. Стрелецкий.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Транспорт, 1981.— 360 с.

БОКАРЕВ С. А., д-р техн. наук, проф., проректор
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
СОЛОВЬЕВ Л. Ю., канд. техн. наук, доц.
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
РОГОВА Е. В., асп., мл. науч. сотр.
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено 17.12.08

Bokarev S. A., doctor of technical sciences, professor, prorector, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Solovyev L. Yu., candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Rogova E.V., post graduate student, junior scientist, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

THE METHOD OF AN ESTIMATION OF BEARING STRENGTH OF COMPOSITE SUPERSTRUCTURES OF THE RAILWAY BRIDGES

In article the method of an estimation of bearing strength maintained composite superstructures of the railway bridges, developed in the Siberian Transport University is presented. The principles are based on main positions of Building Code, a method of classification and consider features composite superstructures and the specific defects arising in the constructions during their maintenance...

design load, finite element method, reinforced concrete plate, stress-strain relationship.

REFERENCES

1. Building Code 3.06.07–86. Bridges and pipes: Rules of inspection and tests.— M.: Gosstroy of the USSR, 1987.
 2. The Manual by definition of carrying capacity of steel superstructures of railway bridges/Ministry of Railways.— M.: Transport, 1987.
 3. The Manual by definition of carrying capacity of reinforced concrete superstructures of railway bridges/Ministry of Railways.— M.: Transport, 1989.
 4. Streletskiy, N. N. Combined beams of the railway bridges [Text]/N. N. Streletskiy.— M.: Transport, 1981.
-

УДК 624.042.8

А. И. САПОЖНИКОВ, А. И. МИШИЧЕВ

**ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАБОТЫ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ
ТОРМОЖЕНИЯ КРАНА**

Проводится динамический анализ пространственной работы промышленных зданий под действием торможения грузовой тележки крана и вращения моста крана в плане при преимущественном торможении одной из его сторон при учете степеней свободы, достаточной для отражения расчетом всех возможных форм колебания конструкций.

Такой подход, реализованный компьютерными средствами препроцессора FEMAP с помощью системы NASTRAN, позволил благодаря учету взаимодействия конструкций, биений и перекачки энергии колебаний внести в расчеты деформаций и напряжений здания существенные количественные поправки...

промышленные здания, торможение мостового крана, колебания, пространственная работа, динамический анализ.

Промышленные здания, оборудованные мостовыми кранами, представляют собой набор легких конструкций, соединенных между собой с помощью рационально расположенных связей.

Их работа при динамическом воздействии кранового оборудования столь сложна, что еще недавно она не находила объяснения. Достаточно привести цитату из работы [1], убедительно подтверждающую сказанное: «Какой-либо закономерности в возникновении колебаний каркаса с одной (2,5–3,0 Гц) или другой (4,5–6,0 Гц) частотой не наблюдалось, без видимого изменения условий (эксперимента) колебания с одной частотой переходили в колебания с другой частотой». Следует отметить, что приводимые в [1] формы колебания здания также существенно изменялись. Например, деформации колонн при торможении крановой тележки изменялись от вогнутых форм до выпуклых в сторону ее движения.

Предположение, что речь идет о пространственных колебаниях здания, на формы и частоты которых оказывают влияние местоположение мостового крана, тележки с грузом и характер их перемещения, оказалось плодотворным. Для его подтверждения, поскольку задача оказалась достаточно громоздкой, использовалась «балочная» модель с расположением расчетных точек (РТ) в местах пересечений колонн с подкрановой системой и покрытием. Расчетную схему (РС) всячески упрощали, доведя ее до трех степеней свободы [2]. Процесс упрощения РС строился с учетом поведенческих особенностей конструкции, иначе он бы привел в тупик. По существу, принятыми подходами игнорировалась лишь местная вибрация конструктивных элементов здания, которая, хотя и не может существенно изменить формы его колебания, вызывает сгущение частотного спектра и увеличение амплитуд и напряженного состояния несущих конструкций.

Переход от плоской РС к упрощенным пространственным, а затем и к пространственным РС, учитывающим помимо общего колебания здания и местную вибрацию его конструкций, продиктован стремлением найти причину, объясняющую наличие остаточных деформаций каркаса, вы-

званных нагрузками от торможения крана и тележки. Характерно, что в эксплуатационных условиях единственным средством «борьбы» с остаточной деформацией каркаса является постоянная рихтовка рельсов.

Здесь следует отметить весьма интересную деталь.

Специалисты уже десятки лет начиная с периода использования плоских расчетных схем исследуют крановые горизонтальные нагрузки на поперечные рамы [3 и др.]. Они отмечают, что величины этих нагрузок занижены на 10–35%. При переходе к пространственным РС, учитывающим динамическое воздействие кранов и колебания здания, оказалось, что динамические коэффициенты при торможении тележки крана достигают величин 2, а в отдельных случаях и больших. Однако и в этом случае, если также исходить из значений остаточных деформаций каркаса, наблюдаются перегрузки здания на 10–35%. Это в динамическом решении объясняется параллельным увеличением динамической нагрузки в 2–2,2 раза и соответственно несущей способности поперечных рам, через покрытие, связи и тормозную балку работающих совместно.

Можно предположить, что «привесок» в невязке сил и их восприятия зданием в 10–35% исчезнет, если помимо общей пространственной деформации каркаса будет учитываться местная вибрация его конструктивных элементов. К этому предположению приводит установленное нами ранее явление, что учет вибрации колонн в каркасных зданиях вызвал изменение динамических характеристик колебания зданий¹.

В данной статье выполнен учет широкого набора степеней свободы всего здания и его отдельных конструкций, что стало возможно благодаря применению конечных элементов. Конечно-элементная модель (КЭМ) строилась средствами препроцессора FEMAP из линейных элементов типа BAR (тормозная и подкрановые балки, а также мост крана), BEAM (колонны), ROD (канат). Покрытие описывалось двумерными КЭ типа PLATE. Груз моделировался элементом типа MASS, канатом, соединяемым с тележкой, которая в расчете принималась жестко связанной с мостом крана. Масса по всей конструкции здания являлась распределенной в соответствии с массовой плотностью материалов стержней и покрытия. Общая масса (при плотности металла $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ и бетона 2000 кг/м^3) колонн 311,335 т, подкрановых (с тормозной) балок 102,548 т, покрытия, включая фермы, 675,527 т. Общий вид КЭМ представлен на рис. 1.

Аналізу подвергнуто одноэтажное промышленное здание с размерами в плане $L \times B = 72 \times 24 \text{ м}$, высотой $10,07 + 6,13 \text{ м}$. Каркас металлический с модулем упругости $E_{\text{ст}} = 2 \times 10^{11} \text{ Па}$, покрытие железобетонное $E_b = 2 \times 10^{10} \text{ Па}$. В плоскости поперечной рамы нижняя часть колонны имеет момент инерции $J_{\text{к}}^{\text{н}} = 0,0211 \text{ м}^4$, верхняя — $J_{\text{к}}^{\text{в}} = 0,0034 \text{ м}^4$, подкрановой балки $J_{\text{п.б}} = 0,0306 \text{ м}^4$ (в горизонтальной плоскости $J_{\text{п.б}} = 4,96 \times 10^4 \text{ м}^4$), тормозной балки $J_{\text{т.б}} = 0,00169 \text{ м}^4$ (в вертикальной плоскости $J_{\text{т.б}} = 2,7 \times 10^{-8} \text{ м}^4$). Момент инерции моста крана $J_{\text{кр}} = 0,31 \text{ м}^4$ (в горизонтальной плоскости $J_{\text{кр}} = 0,496 \text{ м}^4$). Колонны здания жестко крепились к основанию.

С целью идентификации каркаса по осям X и Y диагональные связи в продольных рядах рам (на рис. 1 не показаны) обеспечивают жесткость здания в продольном направлении, равную его жесткости в плоскости поперечных рам.

Разработанные модели подверглись расчетам на действие массовых сил, на собственные колебания, и анализировались переходные процессы от динамических воздействий, которые возникают при экстренном тормо-

¹ Сапожников А. И., Мишичев А. И. Сравнительный анализ динамических характеристик рамно-плитных моделей зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 9. С. 6–8.

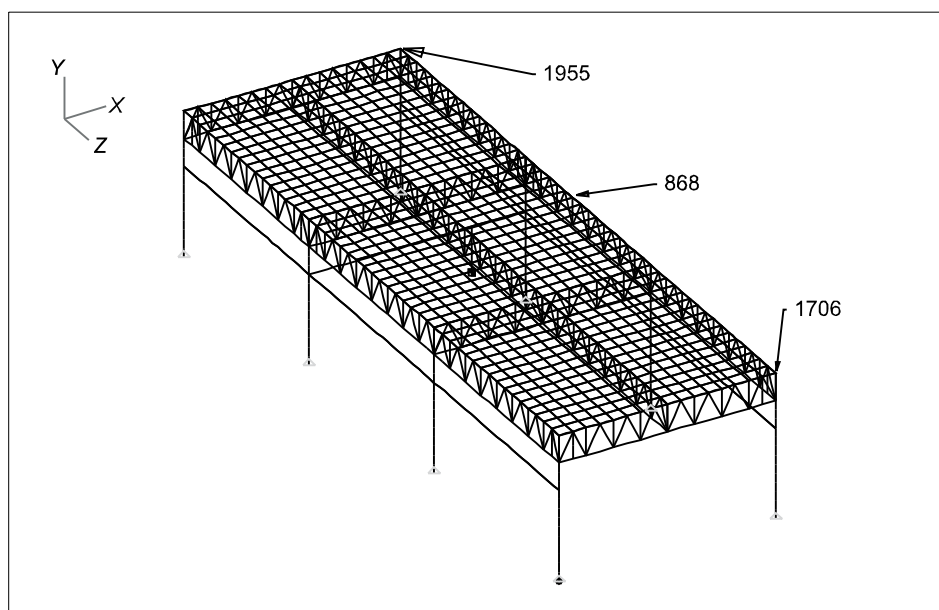


Рис. 1. Общий вид КЭМ здания

Таблица 1

Связь фермы с колонной	Частоты колебания, Гц									
	Номера форм колебаний здания									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Жесткая	1,61	2,01	2,18	3,313	3,36	3,62	3,80	3,86	3,94	4,08
Шарнирная	1,37	1,76	2,01	3,11	3,27	3,58	3,76	3,84	3,93	3,96

жении тележки или крана. Все расчеты выполнялись в САЕ-системе NASTRAN. Полученные значения частот для первых десяти форм колебаний здания при жесткой и шарнирной связи ферм с колоннами сведены в табл. 1.

Отметим, что первые формы — изгибные в плоскости XU (см. рис. 1), вторые — крутильные, третьи — в плоскости YZ , четвертые до 9-й включительно — вертикальные смещения покрытия, а начиная с 10-х форм следуют спектры колебаний подкрановой балки. Благодаря близости частот поступательных (1 и 3 поз.) и крутильных (2 поз.) колебаний могут возникнуть вращения здания в плане, вызывающие перегрузку его торцов.

На базе полученных значений собственных частот модальным методом произведены расчеты переходных динамических процессов. Моделировались процессы аварийных торможений крановой тележки и крана (рис. 2).

В первом случае с учетом данных, полученных в работе [4], к мостовой балке прикладывался крутящий момент $MZ(t)$, действующий в горизонтальной плоскости, возникающий при торможении крана, во втором — поперечная сила $FX(t)$. В обоих случаях принимался закон изменения нагрузки во времени. $FX(t) = FX_{\max} \cdot f(t)$. В табл. 2 приведены численные значения функции изменения нагрузки во времени $f(t)$ при торможении тележки крана.

Величина крутильного момента при торможении крана принималась в соответствии с данными работы [4].

Таблица 2

№	t, c	$f(t)$
1	0	0
2	0,02	1
3	1,99	1
4	2,00	0
5	2,00 и более	0

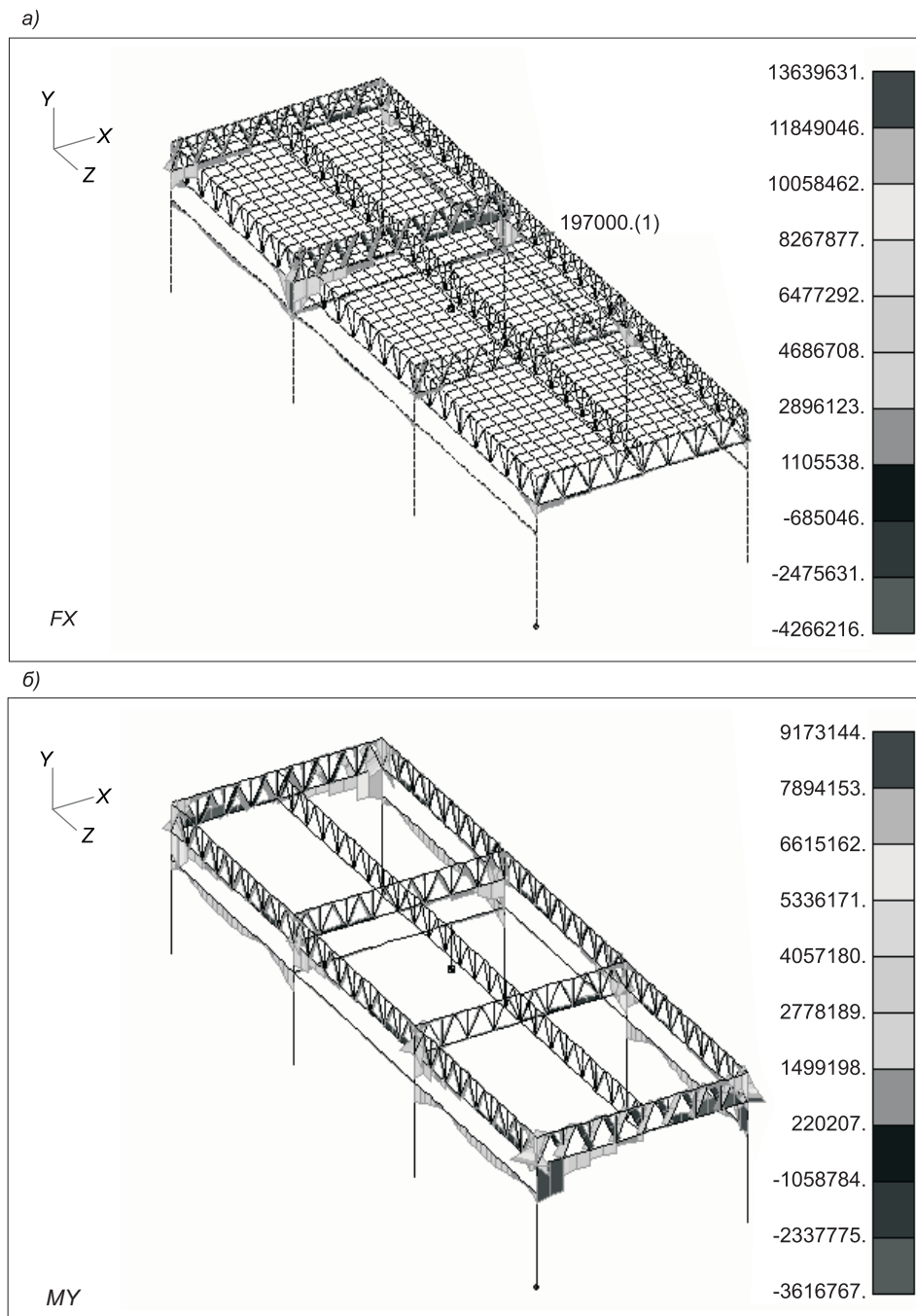


Рис. 2. Наибольшие напряжения (Па) элементов ферм покрытия и подкрановой системы (при $t = 0,28$ с)

a — при торможении крановой тележки; *б* — при торможении крана

Подробно рассматривались поля и эпюры напряжений по конструкции в целом, отмечались опасные зоны, строились графики изменения параметров НДС во времени.

Сравнение наибольших величин напряжений в упомянутых выше зонах и соответствующих конечных элементах моделей показано в табл. 3. Величина $FY = 197$ кН, $MY = 7652$ кН·м [4].

При действии момента MY происходит более равномерное сравнительно с действием силы FX распределение перемещений и напряжений по всей конструкции одноэтажного промышленного здания.

Таблица 3

Конструкция соединения фермы с колонной	Вид нагружения	Наибольшие перемещения $T\bar{v}$, мм	Наибольшие напряжения, МПа		
			в ферме	в колонне	в покрытии
Жесткое	$MY(t)$	5,12	9,17	8,53	0,25
	$FX(t)$	3,14	13,78	8,72	0,15
	MY статика	2,75	15,25*	7,72	0,11
	FX статика	1,57	5,68	7,03	0,07
Шарнирное	$MY(t)$	4,50	7,72	8,95	0,03
	$FX(t)$	3,50	10,79	13,65	0,05
	MY статика	3,46	7,26	7,72	0,033
	FX статика	1,75	3,68	7,81	0,026

* Относительное увеличение напряжения при статической нагрузке объясняется отсутствием инерционного смещения ригеля, в результате чего увеличиваются его, по отношению к колонне, защемляющее действие и напряжения.

Наиболее напряженными зонами здания в условиях динамического воздействия явились:

— при торможении крановой тележки (КТ) основания подкрановых колонн; колонн в местах контакта с краном в узле 868 (рис. 3, а); фермы в месте контакта с подкрановой колонной (см. рис. 2, а);

— при торможении крана основание и верхняя ветвь наиболее удаленных от крана колонн; колонн в месте их контакта с фермой (узлы 1706, 1955) (рис. 3, б); в подкрановой колонне в месте ее контакта с краном (около узла 868) (см. рис. 2, б).

При торможении КТ наиболее нагруженной оказывается рама, ближайшая к крану, при торможении крана — наиболее удаленные от крана колонны. Это объясняется тем, что торможение КТ вызывает более заметное смещение здания, особенно ближайшей к крану рамы, а торможение крана — его (здания) вращение, сопровождающееся наибольшими смещениями его торцов. При этом смещение торца (узел 1955) превышает смещение загруженной рамы (узел 868) на 35% (рис. 4), а увеличение напряжений — на 12%.

Статическая нагрузка, приложенная к зданию, работающему как единая пространственная система, вызывает вдвое более низкие деформации и напряжения, из чего следует необходимость динамического расчета здания.

Для сравнения наибольших величин параметров НДС в здании также определялись максимальные напряжения от массовых сил; наиболее нагруженными конструкциями являются:

- центральная, продольная ферма;
- поперечная торцевая ферма (в плоскости узла 1706);
- верхняя ветвь колонны в раме, расположенной между узлами 868 и 1706.

Статический расчет поперечной (торцевой) фермы был выполнен и при отсутствии горизонтальной фермы-связи, препятствующей выходу из плоскости ее нижнего пояса. Поскольку изгиб центральной продольной фермы сопровождается поворотом ее торца и наклоном торцевой фермы, это привело к увеличению в полтора раза напряжений в ее (торцевой ферме) центральной части, вызванных действием массовых сил.

При установке фермы-связи напряжения в торцевой ферме оказались ниже и близкими к напряжениям в остальных поперечных фермах. Из этого следует, что при опирании продольных ферм на поперечные, торце-

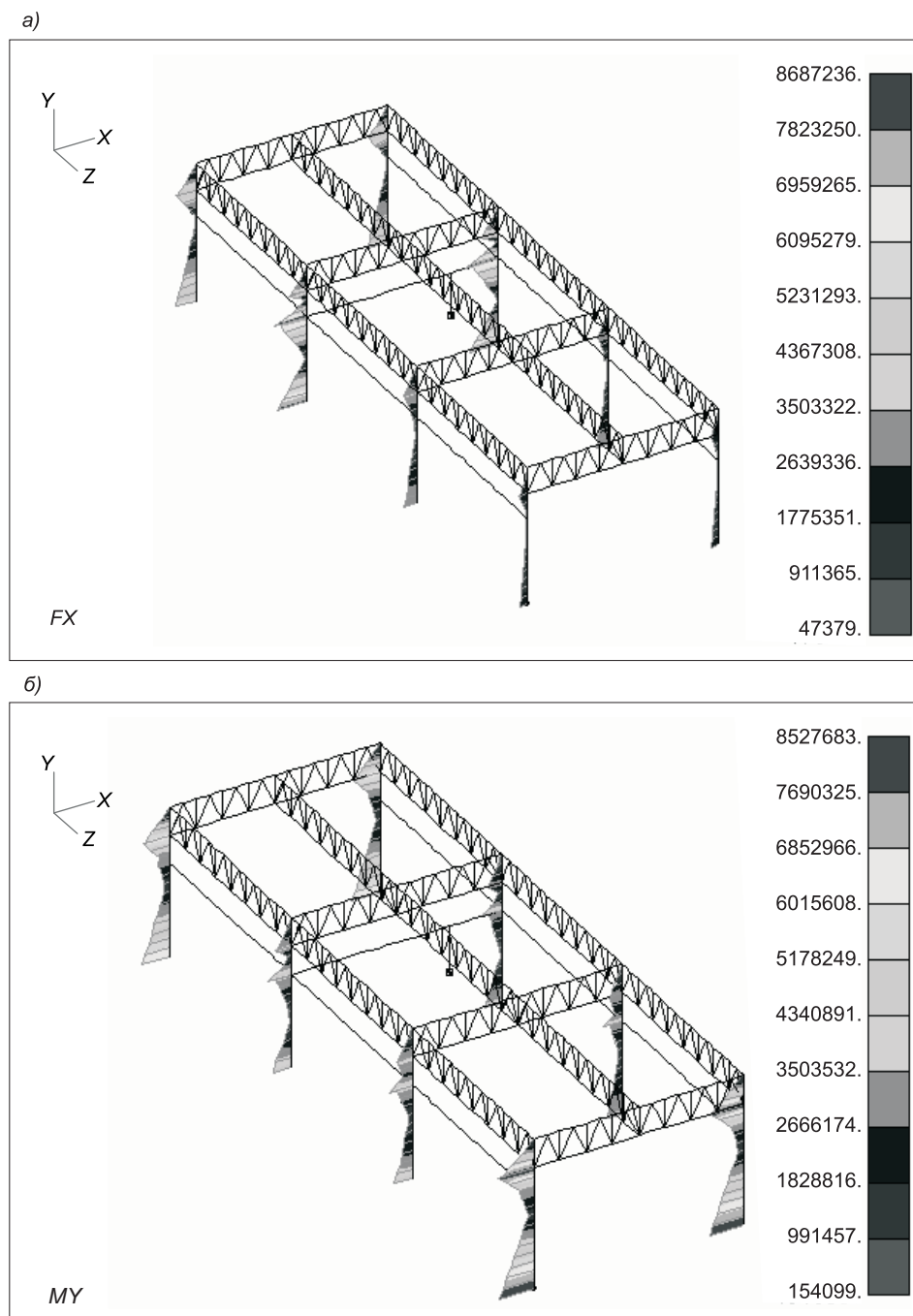


Рис. 3. Наибольшие нагрузки колонн (при $t = 0,28$ с)
 а — при торможении крановой тележки; б — при торможении крана

вые поперечные фермы необходимо усиливать установкой нижней горизонтальной связи и по описанной причине, а не только для восприятия ветрового давления, передаваемого ей торцевой стеной.

Выводы. 1. Различные конструкции здания, в том числе в зависимости от характера нагружения, имеют различные динамические коэффициенты, изменяющиеся от 1,1 до 3,0 (в основном находясь возле величины 2,0).

2. Наибольшие значения динамический коэффициент имеет для ферм покрытия при воздействии FX , что можно объяснить возникающими в них (в частности, благодаря их гибкости и больших значений масс плит

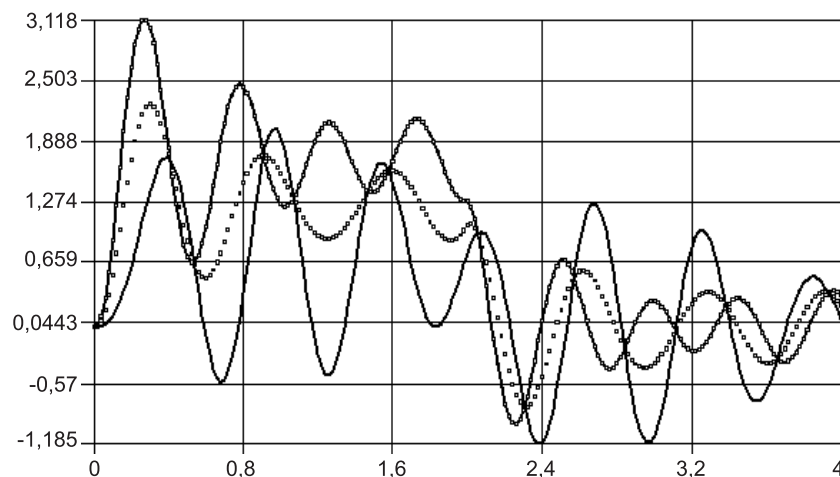


Рис. 4. Зависимость поперечного смещения здания (мм) от времени в узлах 1955, 868 и 1706, на графике расположенных сверху вниз

покрытия) слабозатухающими поперечными (в вертикальной плоскости) колебаниями.

3. Поскольку величина динамических коэффициентов, отличающихся у разных расчетных точек здания, является следствием взаимодействия отдельных конструкций здания, соотношение параметров которых в каждом конкретном случае индивидуально, расчетную схему здания следует принимать наиболее обобщенной, учитывающей наибольшее число степеней свободы.

4. Биения и «перекачка» энергии колебаний с одной конструкции на соседнюю, с одной формы колебания на другую приводят к неодновременному возникновению максимумов отклонений и напряжений в различных точках здания.

5. В силу этого применение квазистатических методов их расчета неприемлемо.

6. При низких частотах биения наиболее характерны для крутильно-поступательных колебаний зданий, а при высоких частотах, начиная с 10-й формы, колебаний для подкрановой системы.

7. «Перекачка» энергии поступательных колебаний здания в крутильные — важнейшая причина перегрузки отдельных конструктивных элементов в торцах здания. Предложенная методика делает их появление предсказуемым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томсон, О. И. Колебания каркасов промышленных зданий [Текст]/О. И. Томсон//Колебания зданий и сооружений.— М.: Госстройиздат, 1963.— С. 5–79.
2. Сапожников, А. И. Учет пространственной работы одноэтажных промышленных зданий, вызванной торможением грузовой тележки [Текст]/А. И. Сапожников//Изв. вузов. Строительство.— 1995.— № 9.— С. 115–120.
3. Мельников, Н. П. Металлические конструкции [Текст]/Н. П. Мельников.— М.: Стройиздат, 1983.— 541 с.
4. Сапожников, А. И. Поперечные колебания производственного здания при холостом движении мостового крана [Текст]/А. И. Сапожников//Мат. междунар. науч.-практ. конференции.— Астрахань: АИСИ, 2007.— С. 149–157.

САПОЖНИКОВ А. И., д-р филос., проф.

Астраханский инженерно-строительный институт

МИШИЧЕВ А. И., д-р техн. наук, проф.

Астраханский инженерно-строительный институт

Получено после доработки 17.12.08

Sapozhnikov A. I., doctor of philosophy, professor, Astrakhan Engineering Building Institute, Russia

Mishichev A. I., doctor of technical sciences, professor, Astrakhan Engineering Building Institute, Russia

DYNAMIC ANALYSIS OF SPATIAL BEHAVIOUR OF INDUSTRIAL BUILDINGS AT DIFFERENT CRANE BRAKING CONDITIONS

Originally a dynamic analysis of spatial behaviour of industrial buildings due to cargo truck braking, to bridge crane rotation and braking one of its sides, taking into account the degrees of freedom sufficient for depicting all waveforms design is made.

Such method is possible due to programmes FEMAP & NASTRAN to bring essential amount of changes into calculation of deformation and tension of structures...

industrial buildings, braking of bridge crane, vibration, spatial work, dynamic analyses.

REFERENCES

1. Thompson, O. I. Reinforced concrete vibrations of industrial buildings [Text]/O. I. Thompson//Buildings and structures vibrations.— M.: Gosstroyizdat, 1963.— P. 5–79.
2. Sapozhnikov, A. I. Analysis of spatial behaviour of one-storey industrial building due to truck braking [Text]/A. I. Sapozhnikov//News of Higher Educational Institutions. Construction.— 1995.— N 9.— P. 115–120.
3. Mel'nikov, N. P. Metal structure [Text]/N. P. Mel'nikov.— M.: Stroyizdat, 1983.— 541 p.
4. Sapozhnikov, A. I. Industrial building cross vibration at idle bridge crane moving [Text]/A. I. Sapozhnikov//Mat. of industrial conference.— Astrakhan: AECl, 2007.— P. 149–157.

НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

В. И. КОСТИН

УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЯ»

Отрасль «Теплогазоснабжение и вентиляция» пережила в России за последние 20 лет бурный подъем. Многократно расширился объем и ассортимент оборудования, как отечественного, так и импортного. Внедрили новые технологии принципов систем климатизации и монтажа. В то же время изданная в советские времена техническая литература во многом устарела, а научные издания стали библиографической редкостью. В этих условиях предпринятый издательством АСВ выпуск учебной литературы для студентов специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция», безусловно, крайне своевременен. Рассмотрим издания последних лет.

1. Ю. Я. Кувшинов. «Теоретические основы обеспечения микроклимата помещения», 2004. Эта книга практически является первым изданием, содержание которого связано с введенным не так давно курсом «Основы микроклимата». Опираясь на работы В. Н. Богословского, М. И. Гримитлина, П. Н. Каменева, И. А. Шепелева, автор дополняет эти исследования описанием результатов новейших исследований, в частности, В. Г. Гагарина, Ю. А. Табунщикова и др. Безусловно, нужным является подробное описание концепции оценки микроклимата П. О. Фангера. Наконец, впервые в отечественной книге по системам создания микроклимата пусть и кратко, но изложено новое направление в расчетах воздухораспределения, опирающееся на решение уравнения Навье-Стокса. Описание основано на отнюдь не самой распространенной (так называемой $k-l$) модели, но обращение к ней позволило изложить идею акад. А. Н. Колмогорова, высказанную им в 1942 г., идею, легшую в основу большинства современных моделей турбулентности.

Интересны примеры, приведенные в разделе «Энергосбережение при обеспечении микроклимата в здании». Хочется пожелать, чтобы автор нашел время для написания более объемного варианта книги. В частности, стоило бы, на наш взгляд, осветить вопрос о возможностях применения моделей турбулентности в расчетах микроклимата. Наличие сложных программ, заимствованных из смежных областей техники, может создать иллюзию того, что с помощью этих программ рассчитываются любые задачи по воздухораспределению. Между тем, это далеко не так. Аэродинамические и тепломассообменные процессы в помещениях, особенно большого объема, порой сложнее, чем это принято в стандартных моделях. Стоило бы еще подробнее осветить технологические требования к микроклимату и рассказать о противопожарных требованиях к нему.

2. П. Н. Каменев, Е. И. Тертичник. «Вентиляция», 2006. Выдержавший в прошлом несколько изданий, этот учебник до сих пор не утратил своей ценности. Поэтому переиздание книги является вполне логичным шагом.

При этом была произведена доработка учебника с учетом достижений отрасли за последние десятилетия. Сделанные добавления, на наш взгляд, здесь нет смысла перечислять. Отметим лишь, что все они произведены с большим тактом, не нарушая первоначальную стилистику книги.

К сожалению, книга несвободна от некоторых, хотя и непринципиальных, но недостатков.

- Приведенные в табл. 6.7 (с. 201) данные о теплонапряженности горячих цехов основаны на исследованиях, проводившихся несколько десятилетий назад, и могут расходиться с современными показателями. Поэтому правильнее было указать, что эти данные носят ориентировочный характер.

- По этим же соображениям вряд ли стоило приводить метод расчета по градиентам температур (с. 269).

- В качестве устройства для изменения частоты вращения вентилятора указан только тиристорный регулятор, в то время как сейчас все большее распространение получает более дешевый, инверторный способ. Кроме того, регулирование вентиляторной установки возможно и комбинированным способом, т.е. одновременным применением количественного и качественного регулирования.

Заметим также, что большой объем рассмотренных в книге вопросов (а это совершенно оправданно) не позволил все осветить достаточно подробно (объем учебника итак составил 615 с.). Поэтому целесообразно было бы в необходимых случаях дать ссылки по тексту на литературу, в которой читатель нашел бы более подробное изложение вопроса.

3. Б. М. Хрусталеv, Ю. Я. Кувшинов, В. М. Копко. «Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование», 2007. В новом, переработанном издании учтены последние технические и научные достижения, современные нормативные требования. Большое внимание уделено вопросам экологической безопасности и энергосбережения. Но если такие разделы, как отопление, теплогазоснабжение, охрана воздушного бассейна изложены достаточно подробно, то вентиляции и кондиционированию воздуха места уделено меньше. Между тем, по этому направлению выполняются два курсовых проекта и курсовая работа. Однако учитывая объем книги (783 с.), видимо, больше места этому направлению уделить было нельзя. Представляется целесообразным при следующем переиздании книги разделить ее на две части: 1. Теплогазоснабжение. 2. Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха.

4. Е. А. Штокман. «Очистка воздуха», 2007. В книге в достаточном для учебного процесса объеме изложены теоретические основы и современные методы очистки воздуха от пыли и других аэрозолей, различных видов газов и паров, радиоактивных и бактериальных загрязнений. По этой книге можно высказать следующие замечания.

- Вряд ли стоило говорить о масляных самоочищающихся фильтрах, которые в наши дни являются анахронизмом.

- При описании разного рода тканевых фильтров ничего не говорится о таком важном показателе тканей, как возможность регенерации (очистки).

- При анализе вариантов очистки следовало указать, что важнейшим показателем способа является получение нейтральных веществ либо веществ, которые могут быть полезно использованы. Правильно указав на необходимость учета стоимости очистки воды при мокром пылеулавливании, автор не указал важнейший вывод: если уловленную сухим спосо-

бом пыль можно использовать повторно, а при мокром способе нельзя, то и нет смысла применять мокрую очистку.

- Неясно, по какому принципу классифицировались типы пылеуловителей в отношении взрыво-пожароопасности. В результате мокрые пылеуловители получили по этому показателю оценку «минимальная», хотя, как известно, за исключением небольшого числа веществ, вода является эффективным средством пожаротушения.

Хорошим дополнением к рассмотренным выше книгам явилась монография В. И. Посохина «Аэродинамика вентиляции» (АВОК-ПРЕСС, 2008). Книги такого рода не издавались в нашей стране уже несколько десятилетий. Как и монография Ю. Я. Кувшинова, данное издание, базируясь на исследованиях ведущих отечественных и зарубежных ученых прошлого, дополняет эти данные результатами, полученными за последние годы.

В книге В. И. Посохина рассмотрены вопросы развития приточных и конвективных струй, течения у всасывающих отверстий, расчеты воздухораспределения, местных отсосов, воздушных завес и душей, расчет воздуховодов, в том числе равномерного притока и вытяжки, а также проблема расчета естественной вентиляции в жилых зданиях повышенной этажности. К сожалению, слишком кратко изложено движение ограниченных приточных струй. Не совсем ясен принцип отбора примеров коэффициентов местных сопротивлений. Почему, например, нет данных по характерным переходам от сети к вентилятору и наоборот (односторонние диффузоры не характерны для применяемых на практике конструкций). Наконец, не расшифрован поток воздуха, обозначенный цифрой 8 на рис. 10.7. Конечно, все эти замечания несущественны, и монография В. И. Посохина будет полезна для использования в учебном процессе. Как, безусловно, полезны будут и ранее выпущенные издательством АВОК-ПРЕСС книги Е. Г. Малявиной «Теплопотери зданий» и И. Ф. Ливчака, А. Л. Наумова «Вентиляция многоэтажных жилых зданий». Здесь можно будет найти материалы и для выпускных работ бакалавров, и для магистерских диссертаций.

Подготовка полноценных специалистов, особенно магистрантов, невозможна, если не знакомить их с новинками техники, с последними инженерными решениями. И здесь неоценимую помощь могут оказать научно-технические журналы, в частности «Журнал АВОК». Автор этих строк в течение ряда лет использует публикуемые в нем материалы в спецкурсе. Особый интерес у студентов вызывают примеры конкретных инженерных решений. Как правило, в каждом номере публикуются статьи гл. редактора журнала проф. Ю. А. Табунщикова, носящие проблемно-концептуальный характер. В них обобщается отечественный и зарубежный опыт, акцентируется внимание на нерешенных проблемах, в том числе и на тех, на которые совершенно незаслуженно сегодня не обращают внимание. Вот, например, названия статей, опубликованных в последних номерах за прошлый год: «Микроклимат и энергосбережение: пора понять приоритеты», «Есть ли предел инженерным возможностям».

В условиях изобилия импортного климатического оборудования у части молодежи возникает пренебрежительное отношение к отечественному опыту. И поэтому весьма своевременно появление в журнале рубрики «Страницы истории специальности», где печатаются статьи отечественных ученых, опубликованных в прошлом, а теперь порой незаслуженно забытых. Статьи сопровождаются комментариями одного из ведущих российских специалистов в области вентиляции Е. О. Шилькрота, кото-

рый совершенно справедливо указал, что «...разработанные в СССР теоретические основы и методы приближенного физического моделирования получили распространение в исследовательских центрах ведущих фирм Европы и мира...» (журн. АВОК, № 6, 2008, с. 90).

Наконец, нельзя не вспомнить, что и некоторые фирмы («Арктика», «Термокул» и др.) тоже издают книги, которые должны знать будущие специалисты в области климатизации. Таким образом, в нашей стране издается много технической литературы по специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция». Важно научить студентов ею пользоваться.

*КОСТИН В. И., д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 02.02.09

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

**НАШ ЖУРНАЛ ПУБЛИКУЕТ ИНФОРМАЦИЮ
О НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАЗРАБОТКАХ
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

Объем представляемых материалов по одной разработке — до 1 стр., включая возможные 1–2 иллюстрации (черно-белые, четкие). Дискету прилагать обязательно.

Информационные материалы *не являются статьями*, не рецензируются, и при их оформлении следует придерживаться следующих правил:

стиль должен быть информационно-описательным (не рекламно-коммерческим), в расчете на интересы потенциального потребителя;

- приводятся сведения технического характера (возможны данные о технической и экономической эффективности), но без формул, ценовых и т. п. показателей;
- указываются разработчики, их контактные телефоны и адреса (почта, e-mail).

К материалам, представляемым в редакцию, должны быть приложены:

- сопроводительное письмо руководства организации, откуда исходит материал;
- экспертное заключение о возможности открытой публикации (не требуется, если разработка зарегистрирована в Госкомизобретений, — об этом должно быть сказано в тексте или сопроводительном письме).