

СССР — МПС

**ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Инженер В. А. СЕМЕНЮТА

**КУПОЛА ИЗ ЖАРОУПОРНОГО
ЖЕЛЕЗОБЕТОНА**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1962

НТБ
ДНУЖТ

1740P

СССР — МПС
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Инженер В. А. СЕМЕНЮТА

**КУПОЛА ИЗ ЖАРОУПОРНОГО
ЖЕЛЕЗОБЕТОНА**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель —
действительный член Академии
строительства и архитектуры СССР,
доктор технических наук, профессор

В. И. МУРАШЕВ

Днепропетровск
1962

17409

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в лаборатории жаростойких и химстойких конструкций
Научно-исследовательского института бетона и железобетона Академии строи-
тельства и архитектуры СССР.

Публичная защита диссертации состоится на заседании Ученого Совета

„ 6 “ декабре 1962 г.

Автореферат разослан

„ 22 “ ноября 1962 г.

Отзывы по настоящему автореферату просьба направлять в адрес Ученого
Совета института: г. Днепропетровск, Севастопольская, 15.

НТБ
ДНУЖТ

ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы во многих областях промышленности связаны с высокими температурами. В большинстве случаев, тепловые установки выполняются из штучной кладки огнеупорного кирпича. Последнее время, при проектировании тепловых установок значительное распространение начинают получать конструкции из жаростойкого бетона и железобетона:

При соответствующем армировании жаростойкого бетона можно получить конструкции, которые не только работают на сжатие, но и воспринимают действие изгибающих моментов и растягивающих сил. Таким образом значительно расширяется диапазон применения жаростойкого бетона и железобетона по сравнению с традиционными огнеупорными материалами.

Внедрение конструкций из жаростойкого железобетона в практику строительства промышленных печей и других тепловых агрегатов расширяется с каждым годом. Новые, более прогрессивные решения корпусов тепловых агрегатов с применением жаростойкого бетона и железобетона дают возможность максимально индустриализировать строительство промышленных печей и получить значительную экономию труда, денежных средств и дефицитных материалов (огнеупорного кирпича, фасонной керамики и металла).

Между тем, внедрение новых конструкций из жаростойкого железобетона часто задерживается из-за отсутствия достоверного метода их расчета на воздействие высокой температуры и внешней нагрузки. Это в первую очередь относится к наиболее ответственным элементам тепловой установки, а именно, к покрытиям и перекрытиям, решенным в виде тонкостенных пространственных оболочек.

Наиболее простым типом оболочки из жаростойкого бетона или железобетона, применяемым в настоящее время для покрытий или перекрытий в ферросплавных электропечах, в печах новой технологии для обжига серного колчедана в кипящем слое, в цилиндрических сушилках, электрофильтрах и др., является сферический купол. Причем, купола которые находятся внутри тепловой установки под воздействием высокой температуры, выполняются с неармированными оболочками и имеют арматуру только в опорном кольце. Конструкция купола служащая покрытием тепловой установки

обычно нагревается с внутренней стороны оболочки. Оболочка при одностороннем нагреве может быть армирована, и арматура устанавливается у внешней поверхности, в зоне пониженных температур. Соответствующим образом армируется и опорное кольцо купола.

Работа сферических куполов из жаростойкого бетона и железобетона при высоких температурах и внешней нагрузке до последнего времени не исследовалась ни у нас, ни за границей. Целью настоящей работы явилось изучение куполов из жароупорного бетона и железобетона при нагреве до 1000° . При проведении исследований были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать работу куполов с оболочкой из жароупорного бетона на равномерный нагрев всей оболочки до температуры 1000°

2. Исследовать работу куполов с оболочкой из жароупорного железобетона, армированных с наружной поверхности оболочки, на односторонний нагрев до 1000°

3. Изучить влияние нагрева на несущую способность куполов.

4. В основу исследований должны быть положены общие методы расчета жаростойких железобетонных конструкций разработанные проф. В. И. Мурашевым.

5. Разработать на основе проведенных исследований практические методы расчета куполов из жароупорного бетона и железобетона на действие высокой температуры.

Расчет куполов из жароупорного железобетона на температурные воздействия

Расчету упругих сферических оболочек на температурные воздействия посвящено большое количество научных работ. Большой вклад в развитие технической и математической теории расчета упругих сферических оболочек был сделан советскими учеными. Получили мировую известность труды Б. Г. Галеркина, В. З. Власова, П. Л. Пастернака, А. Л. Гольденвейзера, А. И. Лурье, В. В. Новожилова.

Все же точный расчет упругих сферических оболочек с помощью сложного математического аппарата представляет значительные трудности и это часто ограничивает применение его инженерами-проектировщиками. Поэтому, приближенные методы расчета упругих оболочек, основанные на некоторых допущениях, приобретают важное значение. Разработанные методы точного и приближенного расчета упругих сферических оболочек дают хорошую сходимость с опытными результатами лишь в случае упругой работы материала оболочки и при отсутствии трещин.

Экспериментальные исследования железобетонных оболочек показали, что в начальный период, при работе конструкции без трещин и при сравнительно малых напряжениях, опытные дефор-

мации совпадают с расчетными, вычисленными в предположении упругой работы оболочки. При дальнейшем повышении нагрузки и появлении в железобетоне трещин наблюдается значительное отклонение теоретических деформаций от опытных.

В расчете куполов из жаростойкого железобетона на действие высоких температур не представляется возможным полностью использовать методы теории упругости. В конструкциях из жаростойкого железобетона, уже при сравнительно небольших температурных перепадах, порядка 40—60°, появляются трещины, а с повышением температуры физико-механические свойства бетона и арматуры резко изменяются.

Обычные соотношения размеров сферических куполов, применяемых в теплотехнических сооружениях, позволяют отнести их к тонким оболочкам. Согласно гипотезы Кирхгофа, в таком случае, при определении напряженного состояния можно пренебречь напряжениями, действующими в плоскости параллельной срединной поверхности купола.

Практически такие оболочки считаются по безмоментной теории с учетом заделки оболочки купола в опорном кольце. Около мест контакта оболочки с опорным кольцом возникают изгибающие моменты, которые быстро затухают по мере удаления сечений от края.

Совместное решение дифференциальных уравнений равновесия оболочки с уравнениями деформаций позволяет определить перемещение края оболочки от воздействия единичных сил. Свободные температурные перемещения определяются из предположения равномерного распределения температуры вдоль меридиана оболочки. Здесь используются общие принципы расчета жаростойких железобетонных конструкций, когда не учитываются дополнительные напряжения, вызванные неравномерным распределением температуры.

Напряженное состояние купола от нагрева оболочки при сопряжении купола только с опорным кольцом, удобно определять методом сил, где за лишние неизвестные выбираются горизонтальный распор H_0 и изгибающий момент M_0 , действующие в месте контакта оболочки с опорным кольцом. Канонические уравнения метода сил запишутся следующим образом:

$$H_0(\delta_{11}^0 + \delta_{11}^k) + M_0(\delta_{12}^0 + \delta_{12}^k) - \Delta_1^0 + \Delta_1^k = 0.$$

$$H_0(\delta_{21}^0 + \delta_{21}^k) + M_0(\delta_{22}^0 + \delta_{22}^k) - \Delta_{2t}^0 + \Delta_{2t}^k = 0,$$

$\delta_{11}^0, \delta_{12}^0, \delta_{21}^0, \delta_{22}^0$ — абсолютные значения деформаций края оболочки от действия единичных сил;

$\delta_{11}^k, \delta_{12}^k, \delta_{21}^k, \delta_{22}^k$ — абсолютные значения деформаций опорного кольца от действия единичных сил;

$\Delta_1^0, \Delta_{1t}^k, \Delta_{2t}^0, \Delta_{2t}^k$ — свободные температурные деформации края оболочки и опорного кольца купола.

В случае, когда у опорного кольца купола сопрягаются более чем два элемента конструкции, удобней вести расчет методом деформаций, предложенным проф. П. Л. Пастернаком.

При работе бетона купола по первой стадии, т. е. тогда, когда в конструкции еще отсутствуют трещины, деформации оболочки могут быть вполне точно вычислены как для однородного упругого элемента. Но как, уже отмечалось выше, в конструкции из жаростойкого железобетона трещины появляются в самой ранней стадии работы, при незначительных температурных перепадах. Таким образом, оболочка почти с самого начала, в сущности еще до нормальной эксплуатации, работает в стадии II, с трещинами в растянутой зоне.

Температурные напряжения в куполе, как и в любой статически неопределимой конструкции зависят от жесткости отдельных элементов конструкции. Ясно, что при нагревании, в связи с появлением трещин и изменением упруго-пластических свойств материала жесткость оболочки и опорного кольца купола будет все время изменяться и, следовательно, оказывать существенное влияние на напряженное состояние. Поэтому, при определении перемещений вызванных действием единичных сил были введены значения жесткости оболочки и опорного кольца, вычисленные в соответствии с теорией жесткости и трещиностойкости В. И. Мурашева.

Купола из жароупорного железобетона, применяемые в теплотехнических сооружениях, имеют значительную толщину соизмеримую с размерами опорного кольца. В подобных вариантах, равнодействующая температурных усилий в оболочке проходит поблизости от центра тяжести опорного кольца и поэтому поворот опорного кольца весьма незначительно оказывает влияние на напряженное состояние купола. При расчете сферических куполов теплотехнических сооружений, в большинстве случаев, можно пренебречь незначительным влиянием изгибающих моментов. После соответствующих упрощений значение горизонтального распора у края оболочки получается в следующем виде:

$$H = \frac{\alpha_{6p} t_6 r_6 - m \alpha_{atc} t_a r_a}{\frac{\sin^2 \alpha_0}{kBs^3} + \frac{r_a^2}{E_{at} F_a}} \psi_{at} \quad (2)$$

t_6 — температура нагрева бетона оболочки;

t_a — температура нагрева арматуры опорного кольца купола;

r_a — горизонтальное расстояние от оси симметрии оболочки до арматуры опорного кольца;

r_6 — горизонтальная проекция радиуса кривизны оболочки;

α_{6p} — коэффициент температурного расширения бетона;

α_{atc} — коэффициент температурного расширения арматуры в бетоне;

z_0 — центральный угол между вертикальной осью симметрии и краем оболочки;

B — жесткость оболочки с учетом действительных характеристик сечения;

k — коэффициент, зависящий от степени заделки оболочки в опорном кольце;

$s = \frac{1.31}{\sqrt{Rh}}$ — геометрическая характеристика оболочки;

F_a — площадь арматуры опорного кольца;

ψ_{at} — коэффициент, учитывающий работу растянутого бетона между трещинами.

Имея значения горизонтального распора, нетрудно получить данные о напряженном состоянии края оболочки и опорного кольца купола.

Методика испытания куполов

Для экспериментальной проверки теоретических положений расчета на действие температурных усилий были изготовлены купола из жароупорного железобетона пролетом 2000 мм — четыре с армированной и четыре с неармированной оболочками (таблица 1)

Армирование куполов

Таблица 1

Марка куполов	Толщина оболочки, мм	Стрела подъема, мм	Арматура опорного кольца		Меридиональная арматура оболочки		Кольцевая арматура оболоч.	
			диаметр мм	армирован. мм	диаметр мм	армирование мм	диаметр мм	армирован. мм
КЖ-1	150	400	3Ø16п	2,68	Ø12п	0,47—0,95	Ø12п	0,47
КЖ-2Х	150	400	3Ø16п	2,68	Ø12п	0,47—0,95	Ø12п	0,47
КБ-3	150	400	3Ø16п	2,68	—	—	—	—
КБ-4Х	100	200	2Ø21п	5,85	—	—	—	—
КБ-5	100	200	2Ø21п	5,85	—	—	—	—
КБ-6	100	200	2Ø16п	3,40	—	—	—	—
КЖ-7	100	200	2Ø16п	3,40	Ø10п	0,44—0,92	Ø10п	0,55
КЖ-8Х	100	200	2Ø16п	3,40	Ø10п	0,44—0,92	Ø10п	0,55

Образцы готовились на портландцементе с шамотными заполнителями и тонкомолотой добавкой. Состав бетона 1:0,5:1,8:2,48 (цемента тонкомолотая добавка песок щебень) по весу, водоцементное отношение 0,97. Одновременно, при бетонировании каждого образца готовились кубы и призмы для определения прочности и упруго-пластических свойств бетона при различных темпе-

ратурах. Прочность бетона предварительно высушенных кубиков на сжатие составила 328—380 кг/см²

Рабочая арматура оболочки и опорного кольца куполов выполнялась из горячекатанной стали периодического профиля марки Ст. 5, арматурные каркасы были сварными.

Купола с бетонной оболочкой испытывались на двусторонний нагрев, с армированной на односторонний. Максимальная температура нагрева составляла 1000°. Разрушались купола при совместном действии температуры и вертикальной нагрузки, создаваемой гидравлическим домкратом. Нагрузка прикладывалась в пяти точках на оболочке купола. Кроме кратковременного испытания на грузкой до разрушения, два купола с бетонной оболочкой испытывались на длительное совместное воздействие нагрева до 1000° и вертикальной нагрузки (таблица 2).

Таблица 2

Виды испытания куполов

Марка куполов	Первое испытание		Второе испытание		Длительное испытание		Примечание
	нагрев, часы	остывание, часы	нагрев без нагр., часы	нагрев с нагруз., часы	нагрев при 1000°, часы	нагрузка, т	
КЖ-1	60	40	14	—	—	—	Разрушен при 1000°
КЖ-2Х	—	—	—	—	—	—	Разрушен без нагрева
КБ-3	24	37	19	—	—	—	Разрушен при 1000°
КБ-4Х	—	—	—	—	—	—	Разрушен без нагрева
КБ-5	20	48	—	14	384	4,60-8,15	Разрушен при 1000°
КБ-6	24	46	—	14	50	15,40	Не разрушался
КЖ-7	17	32	14	—	—	—	Разрушен при 1000°
КЖ-8Х	—	—	—	—	—	—	Разрушен без нагрева

Для испытания куполов была смонтирована специальная установка. Все купола имели шарнирное опирание. Нагрев образцов осуществлялся верхним и нижним нагревателями из жароупорного железобетона не связанными с конструкцией купола. Для одностороннего нагрева куполов монтировался только один нижний нагреватель. Автоматическое регулирование и запись температуры производились специальными щитами управления.

Температура нагрева куполов замерялась хромель-алюмелевыми термопарами, дающими хорошую стабильность показаний с ростом температуры. Деформации арматуры регистрировались рычажными тензометрами. Температура нагрева баз тензометров замерялась термопарами, припаянными к их базам. При обработке экспериментальных данных в показания тензометров вводились соответствующие температурные поправки. Кроме тензометров, деформации опорного кольца замерялись индикаторами часового типа. Про-

гибы оболочки купола также замерялись индикаторами, установленными на металлической раме из уголков. В качестве удлинителей использовались кварцевые трубки, обладающие незначительным коэффициентом температурного расширения. При испытании куполов без нагрева дополнительно применялись электротензодатчики сопротивления.

Физико-механические свойства бетона и арматуры при нагреве

Изучались физико-механические свойства материалов, применяемых при изготовлении куполов. Анализ опытов с призмами и исследований других авторов позволил сделать вывод, что значение коэффициента пластичности бетона λ_6 в зависимости от нагрузки изменяется сравнительно мало. Решающую роль в изменении величины λ_6 играет температура нагрева бетона.

Упруго-пластические свойства бетона изменяются в широком диапазоне и являются главным фактором при определении температурных усилий. При различной скорости подъема температуры конструкции, величина доли пластической деформации будет также неодинаковой. В указаниях по проектированию жароупорных железобетонных конструкций (У 151—56) значения λ_6 соответствуют деформациям ползучести на 5—10 день работы конструкции при определенной температуре. Для практических расчетов это является недостаточным. В соответствующих нормативных материалах необходимо по мере накопления опытных данных приводить сведения об изменении упруго-пластических свойств бетона во времени.

Температурные деформации жаростойкого бетона при первом нагреве являются следствием двух процессов, происходящих в цементном камне: непосредственно температурного расширения и усадки, уменьшающей влияние расширения. Усадочные явления, в основном, происходят при первом нагреве жаростойкого бетона. Исследования обычно проводились на dilatометре Н. В. Соломина с образцами диаметром 10—15 мм и длиной 50 мм.

Поскольку процесс усадки жаростойкого бетона зависит от общего количества влаги в образце, то величина суммарного коэффициента температурного расширения бетона, естественно, будет зависеть от размеров образца. Проведенные опыты с образцами размером 250x100x100 мм позволили несколько уточнить значения коэффициента температурного расширения бетона $\alpha_{бр}$.

Были поставлены специальные эксперименты по изучению коэффициента температурного расширения арматуры в бетоне $\alpha_{атс}$. Опыты помогли установить, что коэффициент температурного расширения незаанкеренной арматуры в бетоне при обычных процентах армирования очень мало отличается от коэффициента температурного расширения свободного металла $\alpha_{ат}$. Дальнейшие исследо-

вания требуют выяснения влияния различных способов анкеровки арматуры на величину α_{atc} .

Для практических методов расчета конструкций из жаростойкого железобетона по несущей способности, коэффициент температурного расширения арматуры в бетоне в предельном состоянии будет равен расширению свободного металла. На величину деформаций, колебания значений температурного расширения арматуры в бетоне, влияют мало. Поэтому во всех стадиях расчета по предельным состояниям имеет смысл коэффициент температурного расширения арматуры в бетоне принимать равным свободному расширению металла.

Изучение совместной работы арматуры и бетон позволили, наряду с общими требованиями, установить следующие минимальные величины защитного слоя бетона в зависимости от нагрева арматуры:

1. Для температуры нагрева до 100° толщина защитного слоя бетона должна быть не менее 1,0 диаметра;
2. Для нагрева до 200° не менее 1,5 диаметров;
3. При нагреве от 200° и выше толщина защитного слоя бетона увеличивается до 2,0 диаметров арматуры.

Одной из характеристик жаростойкого бетона является его прочность на растяжение. С прочностью бетона на растяжение связаны вопросы появления в железобетонных конструкциях трещин и вопросы совместной работы арматуры с бетоном. Насколько известно, прочность жаростойкого бетона на растяжение при изучении свойств бетонов с изменением температуры пока не определялась. Отсутствие таких данных, в основном, вызвано сложностью эксперимента.

Методом раскалывания были получены, в зависимости от температуры, данные о прочности на растяжение жароупорного бетона на портландцементе с шамотным заполнителем.

Результаты испытания куполов на двусторонний нагрев

Испытаниям на двусторонний нагрев подвергались купола с бетонной оболочкой серии КБ. Экспериментально определялись деформации арматуры опорного кольца. При повышении температуры усилия в арматуре опорного кольца нарастали и достигли своего максимума при температурном перепаде между нагревом оболочки и опорного кольца около 350° , что соответствует нагреву оболочки немногим больше 430° .

Теоретические деформации арматуры опорного кольца, вычисленные по формулам, приведенным в главе работы, имеют хорошую сходимость с опытными результатами на первых этапах нагрева до температурного перепада порядка 200° . Затем наблюдается некоторое превышение теоретических деформаций над опытными.

Величины теоретических деформаций подсчитывались из условий действительной жесткости полного бетонного сечения. При повышении температуры, даже в условиях опыта, не удастся добиться абсолютно равномерного распределения температуры в оболочке. Поэтому весьма возможно появление в бетоне оболочки купола растягивающих напряжений и, следовательно, возникновение трещин. В сечении с трещиной жесткость бетонного сечения B стремится к 0. Это изменение жесткости нельзя учесть расчетом, и таким образом опытные усилия в опорном кольце должны быть меньше теоретических.

При расчете упругих конструкций на действие температуры и внешней нагрузки усилия определяются, независимо, как сумма температурных и силовых воздействий. В настоящее время, по инструкции У 151—56 оценка температурных усилий при нагреве производится также без учета влияния внешней нагрузки. Кроме того, расчет температурных усилий в жаростойких железобетонных конструкциях при однократном и повторном нагревах рекомендуется производить только для первого нагрева, так как повторные нагревы до той же температуры не дают заметного увеличения усилий.

Повторный нагрев и последующее приложение нагрузки при постоянной температуре не вызовет увеличения температурных усилий, так как рост температурных усилий будет происходить при жесткости конструкции не превышающей жесткость первого нагрева. Иная картина будет, если внешняя нагрузка действует до начала нагрева конструкции. Нагрузка может изменить жесткость конструкции. Если, кроме того, нагрузка приведет к закрытию усадочных трещин первого нагрева, то при повторном нагреве усилия будут расти пропорционально коэффициенту температурного расширения бетона $\alpha_{\text{сг}}$ без учета усадки.

При повторном нагреве и одновременном действии вертикальной нагрузки испытывались купола КБ-5 и КБ-6. Влияние нагрузки при повторном нагреве привело к усилиям в опорном кольце купола превышающим в 2,5—5,0 раз усилия от первого нагрева.

Результаты испытаний на совместное действие температуры и вертикальной нагрузки подтвердили положение, что при расчете жаростойких железобетонных конструкций не соблюдается принцип независимости действия сил. В каждом отдельном случае необходимо рассматривать возможность влияния внешней нагрузки на величину температурных усилий.

Напряженное состояние нагретой конструкции из жаростойкого железобетона в большой степени зависит от упруго-пластических свойств бетона которые во времени значительно изменяются. Кроме того, при повышенных температурах, в условиях длительной эксплуатации, напряжения в бетоне должны приниматься с учетом допустимой величины деформации под нагрузкой. Для практических выводов большой интерес представляют длительные испыта-

ния конструкций из жаростойкого железобетона, хотя проведение таких испытаний в лабораторных условиях достаточно сложно.

Купол КБ-5 по разработанной нами методике испытывался на совместное действие температуры и нагрузки в течение 384 часов. Начальная нагрузка составляла 4,6 т (9% от разрушающей). В арматуре опорного кольца внешняя нагрузка вызвала напряжения около 150 кг/см². Максимальное значение температурных напряжений в опорном кольце достигло величины 1700 кг/см². Нагрев в течение 280 часов привел к снижению температурных напряжений более чем в четыре раза. Снижение температурных усилий было вызвано ползучестью сжатого бетона нагретой оболочки.

Характер изменения напряженного состояния опорного кольца купола позволяет сделать вывод об исключительной важности расчета режима разогрева конструкций тепловой установки до рабочих температур. Соответствующий учет упруго-пластических свойств материала и особенностей работы конструкции позволяют значительно снизить величину температурных напряжений.

Нагрузка на купол КБ-5 увеличивалась ступенями после затухания деформаций на предыдущей ступени. При нагрузке 4,6—5,8 т что соответствовало средним напряжениям в оболочке 3,2—4,2 кг/см², кривая прогибов оболочки имела затухающий характер. Лишь при дальнейшем увеличении нагрузки до 7,04—8,15 т (напряжения в теле оболочки 5,1—6,0 кг/см²), скорость роста прогибов увеличилась и при длительности испытаний 384 часа не удалось получить затухающий участок кривой деформаций.

Купол КБ-6 подвергался длительным испытаниям при больших нормальных напряжениях в бетоне оболочки. В задачу испытаний входило получить разрушение купола в результате длительного действия относительно высоких напряжений сжатия в нагретом бетоне. Величина внешней нагрузки была увеличена до 15,4 т при напряжениях в бетоне оболочки около 12 кг/см². Прогибы в вершине купола при 1000° стали интенсивно увеличиваться и через 40 часов превысили 30 мм или 1/6 стрелы подъема купола. Большие прогибы в оболочке вызвали перекос в загрузающем устройстве и дальнейшие испытания купола КБ-6 на действие длительной нагрузки были прекращены. В результате исследований была получена зависимость, дающая возможность определить вертикальные деформации купола с учетом ползучести и температурных деформаций бетона.

При нагреве, первые трещины в куполах, зарегистрированные по показаниям приборов, появлялись при перепадах между средней температурой оболочки купола и арматурой опорного кольца около 50—60°. Раскрытие трещин в опорном кольце в момент их появления было различным и зависело от процента армирования опорного кольца. Ширина раскрытия трещин не превышала 0,02—0,05 мм. Появление первых трещин остывания в оболочках куполов визуаль-

но определить было невозможно. Но анализ кривых вертикальных деформаций оболочки купола показал, что процесс трещинообразования в оболочках куполов начинался при температурах на $60\text{--}100^\circ$ меньше максимальной температуры нагрева куполов. Ширина раскрытия трещин остывания зависит от условий охлаждения купола и в среднем не превышала $0,2\text{--}0,4$ мм. Неравномерное охлаждение купола может вызвать появление отдельных трещин с шириной раскрытия до 1 мм.

Испытание куполов на односторонний нагрев

Армированные купола испытывались на односторонний нагрев. Ввиду сравнительно небольшой толщины оболочки, температура арматуры, установленной у внешней грани, была значительной и на последних этапах нагрева поднималась до $320\text{--}350^\circ$

Опытные деформации меридиональной и кольцевой арматуры достигли максимального значения при нагреве горячей грани бетона $450\text{--}550^\circ$. Затем, в связи с ползучестью нагретого бетона в сжатой зоне оболочки и нагревом арматуры, напряжения в арматуре уменьшались. Теоретические деформации арматуры вычислялись с учетом действительной жесткости железобетонного сечения оболочки по растянутой зоне бетона.

До температуры внутренней поверхности оболочки 500° результаты сравнения опытных и теоретических деформаций арматуры опорного кольца были хорошими. С повышением температуры выше 500° теоретические деформации арматуры несколько превышали опытные. При высоких температурах нагрева и, следовательно, больших деформациях бетона сжатой зоны уже не удается путем зависимости от величин ψ_{at} и ξ_{cp} выразить изменение жесткости оболочки на всем диапазоне температур. При высоких температурах будет велико влияние, непосредственно, упруго-пластических свойств сжатой зоны бетона. Уточнение величины жесткости железобетонных сечений выше $500\text{--}700^\circ$ может явиться темой специальных исследований. Тогда как для практических расчетов при определении максимальных величин температурных усилий, а это соответствует нагреву $500\text{--}600^\circ$, с достаточной точностью можно пользоваться нормированными значениями жесткости по растянутой зоне бетона.

Начальная ширина раскрытия трещин в оболочках куполов не превышала $0,02\text{--}0,05$ мм. При дальнейшем нагреве ширина раскрытия трещин увеличивалась вне зависимости от силовых напряжений и при максимальных температурах нагрева достигала величины $0,10\text{--}0,3$ мм.

Ширина раскрытия трещин изучалась во всех армированных сечениях куполов двух серий КБ и КЖ. В основе теоретических исследований трещинообразования была принята теория расчета,

предложенная В. И. Мурашевым. В формулах для определения ширины раскрытия трещин дополнительно учитывалась разность температурных деформаций арматуры и бетона на участке между трещинами. Учет разности температурных деформаций привел к хорошему совпадению опытных и теоретических данных.

Несущая способность куполов

Расчет куполов на действие внешней нагрузки методами упругой теории не всегда достоверно отражает их несущую способность. Использование упругой теории не допускает появления пластических шарниров и в этом случае наиболее напряженные участки в куполе служат факторами, определяющими несущую способность всей конструкции. Работы А. М. Овечкина, а также исследования проведенные нами показали, что упругая теория расчета наиболее часто значительно недооценивает несущую способность куполов.

В своих работах А. А. Гвоздев отмечал, что для расчета определенных конструкций, если метод предельного равновесия остается в силе, границы несущей способности совершенно не зависят от собственных напряжений, таких как температурные напряжения, напряжений вызванных осадкой опор и т. д. Большие местные деформации, происходящие при постоянной величине усилий в наиболее напряженных зонах купола, способны вызвать настолько значительное перераспределение усилий, что влияние предшествующих температурных напряжений может полностью ликвидироваться. Несущая способность купола в таком случае будет определяться только влиянием внешней нагрузки и изменением прочностных и деформативных свойств наиболее напряженных частей конструкции, вызванных нагревом. При кратковременных испытаниях результаты опытов дали хорошую сходимость фактических и теоретических значений несущей способности куполов вычисленных методом предельного равновесия без учета температурных усилий.

Однако, при практическом расчете купола из жаростойкого железобетона одним из предельных состояний может быть ширина раскрытия трещин или величина деформации под нагрузкой. Кроме того, в условиях нагрева, при длительном действии постоянной нагрузки, когда возможны большие деформации системы, расчет методом предельного равновесия вызывает значительные трудности. Поэтому, для унификации расчета, несущую способность куполов следует определять при совместном действии температуры и нагрузки, используя методы, приведенные в этой работе. Во всех случаях расчета жесткость элементов купола необходимо принимать с учетом упруго-пластических свойств материала по В. И. Мурашеву.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили изучить работу куполов из жароупорного железобетона при одностороннем и двустороннем нагревах до 1000° . В итоге могут быть сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Упругий метод расчета куполов без учета пластических свойств материала и возникновения трещин приводит к завышенным значениям температурных усилий, превышающих фактические в несколько раз.

2. Разработанный метод расчета куполов на температурные усилия основан на учете действительных характеристик сечений купола, т. е. жесткость отдельных элементов конструкции и физико-механические характеристики бетона и стали применяются с учетом их изменения от воздействия высокой температуры и нагрузки. Экспериментальные исследования подтвердили пригодность полученного метода определения температурных усилий для куполов с подъемом оболочки не менее $1/10$ пролета.

3. При расчете железобетонных конструкций на совместное действие внешней нагрузки и высокой температуры не соблюдается принцип независимости действия сил. Эксперименты установили необходимость проверки влияния внешней нагрузки на величину жесткости отдельных элементов конструкции купола при которой будет происходить изменение температуры.

4. В результате экспериментов получено, что начальные температурные напряжения не влияют на предельную несущую способность куполов. При незначительных деформациях купола во время загрузки, разрушающую нагрузку можно определить методом предельного равновесия с учетом изменения свойств материала при нагреве.

5. Длительные испытания куполов при одновременном действии температуры и нагрузки показали, что для жароупорного бетона на портландцементе с шамотным заполнителем затухающие деформации прогибов оболочки при температуре 1000° можно получить при напряжениях сжатия в бетоне оболочки не более 3 кг/см^2 .

6. В практических методах расчета, в соответствии со СНиП конструкция купола должна рассчитываться по трем предельным состояниям: по несущей способности, деформациям и по раскрытию трещин. Усилия в куполе должны вычисляться при совместном действии температуры и нагрузки с учетом упруго-пластических свойств материала и наличия трещин. Ширина раскрытия трещин должна проверяться с учетом разности коэффициентов температурного расширения бетона и арматуры в бетоне.

Результаты проведенной работы использованы при составлении «Инструкции по проектированию жаростойких железобетонных конструкций», выпускаемой взамен «Временных указаний по проектированию жароупорных железобетонных конструкций (У 151—52).

Основные положения диссертации изложены в следующих опубликованных работах:

1. Семенюта В. А. «Испытание куполов из жароупорного железобетона». — «Бетон и железобетон», 1961, № 9.

2. Семенюта В. А., «Купола из жаростойкого железобетона» — В кн.: Сборник научных трудов кафедры железобетонных и каменных конструкций, вып. 19, 1962, (Днепропетровский инженерно-строительный институт)

3. Семенюта В. А., «Купола из жароупорного железобетона» — В кн.: Сборник тезисов координационного совещания по вопросам исследования, проектирования, строительства и эксплуатации тепловых агрегатов из жароупорного бетона и железобетона». АСИА, НИИЖБ, 1960.

4. Семенюта В. А., «Температурные деформации жаростойкого бетона» — В кн.: Сборник научных трудов кафедры железобетонных и каменных конструкций, вып. 19, 1962, (Днепропетровский инженерно-строительный институт).