

Инженерно-строительный журнал

научно-прикладное издание

ISSN
2071-4726

№8(10) декабрь 2009

СОБЫТИЯ

РАСЧЕТЫ

ТЕХНОЛОГИИ

КОНСТРУКЦИИ

ОРГАНИЗАЦИЯ





Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
**«Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет»**
Инженерно-строительный факультет
**Отделение повышения квалификации и
профессиональной переподготовки**

Профессиональная переподготовка специалистов

Программа предназначена для специалистов строительных и проектных организаций, не имеющих базового строительного образования, а также для лиц, желающих получить дополнительное образование по направлению «Строительство».

Форма обучения вечерняя. По окончании обучения выдается диплом о переподготовке государственного образца с правом на ведение нового вида профессиональной деятельности. Программа рассчитана на 500 ак. часов, обучение проводится в течение одного учебного семестра.

Стоимость обучения 46000 рублей.

Переподготовка ведется по четырем направлениям:



Строительство зданий и сооружений	Экономика и управление в строительстве
■ <i>Строительные конструкции и материалы</i> ■ <i>Выполнение строительно-монтажных работ</i> ■ <i>Контроль качества строительно-монтажных работ</i> ■ <i>Управление строительной организацией</i> ■ <i>Функции участников инвестиционно-строительного проекта</i> ■ <i>Основы расчета строительных конструкций</i> ■ <i>Проектирование зданий и сооружений с использованием современных программных продуктов</i>	■ <i>Основы строительного дела</i> ■ <i>Технология строительного производства и системы управления качеством в строительстве</i> ■ <i>Основные функции участников инвестиционно-строительного проекта</i> ■ <i>Функции заказчика-застройщика</i> ■ <i>Управление строительной организацией</i> ■ <i>Сметное дело в строительстве</i> ■ <i>Календарное и сетевое планирование в строительстве с использованием MS Project</i>
Проектирование и конструирование зданий и сооружений	Инженерные системы зданий и сооружений
■ <i>Основы сопротивления материалов и механики стержневых систем</i> ■ <i>Проектирование и расчет оснований и фундаментов зданий и сооружений</i> ■ <i>Проектирование и расчет железобетонных конструкций</i> ■ <i>Проектирование и расчет металлических конструкций</i> ■ <i>Проектирование зданий и сооружений с использованием AutoCAD</i> ■ <i>Расчет строительных конструкций с использованием SCAD Office</i>	■ <i>Основные понятия механики жидкости и газа</i> ■ <i>Системы вентиляции и кондиционирования. Проектирование, монтаж и эксплуатация</i> ■ <i>Системы отопления. Проектирование, монтаж и эксплуатация</i> ■ <i>Системы водоснабжения и водоотведения. Проектирование, монтаж и эксплуатация</i> ■ <i>Проектирование и монтаж систем электроснабжения</i> ■ <i>Проектирование инженерных сетей и систем с использованием современных программных продуктов</i>

[Http://www.engstroy.spb.ru](http://www.engstroy.spb.ru) – полнотекстовая версия журнала в сети Интернет. Бесплатный доступ, обновление с каждым новым выпуском.

Инженерно-строительный журнал

научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

Специализированный научный журнал

Периодичность: 8 раз в год

Учредитель и издатель:

ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Адрес редакции:

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 204

Главный редактор:

Вера Михайловна Якубсон

Редакционный совет:

Д.э.н., проф. ГОУ СПбГПУ, вице-губернатор Санкт-Петербурга
А.И. Вахмистров
Академик РАН, д.т.н., проф., президент ГОУ СПбГПУ
Ю.С. Васильев
Член-корр. РАН, д.т.н., проф., проректор ГОУ СПбГПУ по научной и инновационной деятельности
А.И. Рудской
Д.э.н., проф., директор Санкт-Петербургского союза строительных компаний «Союзпетрострой»
Л.М. Каплан
Д.т.н., проф., декан ИСФ ГОУ СПбГПУ
А.И. Альхименко
Д.т.н., проф., зав. каф. ТОЭС ГОУ СПбГПУ
Н.И. Ватин
И другие. Полный список редсовета и редколлегии – на веб-сайте журнала.

Установочный тираж 800 экз.

Контакты:

Тел. 297-59-49

E-mail engstroy@inbox.ru

[Http://www.engstroy.spb.ru](http://www.engstroy.spb.ru)

Содержание

СОБЫТИЯ

Новая Неделя науки	2
Энергоэффективность зданий и строительная теплофизика	4

ТЕХНОЛОГИИ

И.А. Войлоков. Применение фибры при изготовлении свай	6
В.Ю. Смоленков. Использование микросвай при ремонте набережных	9

ПРЕДСТАВЛЯЕМ КОЛЛЕГ

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства	12
--	----

МАТЕРИАЛЫ

О.В. Тараканов, Е.О. Тараканова. Формирование микроструктуры наполненных цементных материалов	13
В.А. Пинскер, В.П. Вылегжанин, Г.И. Гринфельд. Теплофизические испытания фрагмента кладки стены из газобетонных блоков марки по плотности D400	17

КОНСТРУКЦИИ

М.В. Кнатько, А.С. Горшков, П.П. Рымкевич. Лабораторные и натурные исследования долговечности (эксплуатационного срока службы) стеновой конструкции из автоклавного газобетона с облицовочным слоем из силикатного кирпича	20
П.Н. Недвига, В.А. Рыбаков. Эмпирические методы оценки несущей способности стальных тонкостенных просечно-перфорированных балок и балок со сплошной стенкой	27

РАСЧЕТЫ

В.М. Жгутов. Прочность и устойчивость упругих ортотропных и изотропных ребристых оболочек. II	31
В.М. Жгутов. Метод конструктивной анизотропии для ортотропных и изотропных ребристых оболочек	40
И.А. Лундышев. Методика расчёта толщины слоя монолитного пенобетона, применяемого для теплоизоляции трубопроводов	47
Л.Л. Гошка. Климатические системы: расчет воздухообмена в помещении	52

ОРГАНИЗАЦИЯ

Г.И. Абдуллаев. Оценка уровня надежности с учетом организационно-технологических параметров строительства линейно-протяженных сооружений	62
--	----

При перепечатке ссылка на издание обязательна

Новая Неделя науки



С 30 ноября по 5 декабря в ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ) проходила XXXVIII международная научно-практическая конференция «Неделя науки СПбГПУ». Это ежегодная конференция, в которой участвуют студенты, аспиранты и преподаватели ГОУ СПбГПУ, а также других вузов Санкт-Петербурга и России.

На кафедре «Технология, организация и экономика строительства» (ТОЭС) с этого года Неделя науки проходит в новом формате. Каждая из 5 секций является, по сути, отдельной конференцией, с научным руководителем—председателем секции и организацией—генеральным партнером. Так, например, генеральным партнером подсекции «Несущие

конструкции» секции «Строительные конструкции зданий и сооружений» стало ОАО «Группа ЛСР», а научным руководителем — к.т.н., докторант кафедры Владимир Михайлович Жгуттов (статьи В.М. Жгуттова по материалам его выступления см. на стр. 31, 40).

Основное количество докладов подсекции было посвящено методам расчета строительных конструкций. Так, например, доцент кафедры ТОЭС Илья Анатольевич Войлоков выступил с докладом «Расчет конструкций промышленных полов с учетом динамического воздействия нагрузок от перемещения грузоподъемного транспорта». Статью И.А. Войлокова на эту тему см. в №7, 2009 нашего журнала. Также большое внимание было уделено вопросам усиления строительных конструкций и близким темам. Так, студентка 3 курса кафедры ТОЭС Ксения Анатольевна Дроздова рассказывала о конструктивных методах защиты зданий от сейсмических воздействий. В докладах об усилении строительных конструкций рассматривались различные методы, в том числе, с использованием композиционных материалов и постнапряжения железобетона (подробнее об этом см. №3, 2009, посвященный усилению строительных конструкций).

В целом, секция «Строительные конструкции зданий и сооружений» была самой популярной среди выступающих и слушателей. Интересной оказалась подсекция «Ограждающие конструкции», руководителем которой был к.т.н., докторант кафедры ТОЭС Александр Сергеевич Горшков. Выбор конструктивных типов, а также материалов для ограждающих конструкций сейчас очень велик, и постоянно появляются новые материалы и технологии, которые зачастую никак не обоснованы с научной точки зрения. В основном такая ситуация характерна для рынка теплоизоляционных материалов. Сейчас он активно развивается в связи с повышением требований по сопротивлению теплопередаче и широким использованием многослойных ограждающих конструкций. При этом, по мнению А.С. Горшкова, большинство теплоизоляционных материалов не удовлетворяет требованиям по долговечности. Известно, что чем ниже плотность, тем ниже прочность, а значит, и долговечность материала, что неизбежно создает проблемы касательно теплоизоляционных материалов. Статью А.С. Горшкова об экспериментальном исследовании долговечности ограждающей конструкции см. на стр. 20.



Важной характеристикой, влияющей, в том числе, и на долговечность строительных материалов, является влажность. Доклад Глеба Иосифовича Гринфельда, исполнительного директора Национальной ассоциации производителей автоклавного газобетона, начальника отдела технического развития ООО «АЭРОК СПб», был посвящен исследованиям эксплуатационных характеристик газобетона, в том числе, влажности. По его словам, при высокой влажности материала теплотери, а значит, затраты на отопление в первый отопительный сезон будут значительно выше расчетных (статью Г.И. Гринфельда о теплотехнических свойствах газобетона см. на стр. 17).

В качестве некоторого итога подсекции можно было рассматривать доклад магистра кафедры ТОЭС Алины Анатольевны Гладких, посвященный сравнительному экономическому анализу использования различных типов ограждающих конструкций. Цель исследования состоит в том, чтобы оценить экономическую эффективность не только с точки зрения капитальных затрат при строительстве, но и с точки зрения затрат на энергопотребление в процессе эксплуатации. Вопрос действительно актуальный, т.к. объектом исследования являются малоэтажные здания, собственники которых заинтересованы в снижении эксплуатационных затрат.

Третья подсекция, «Легкие стальные тонкостенные конструкции», проходила уже в виде международной конференции. В качестве научного руководителя выступил Григорий Иванович Белый, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Металлические конструкции и испытание сооружений» ГОУ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ). Международную часть конференции

представляли немецкие специалисты по ЛСТК, производители и исследователи. Так, Франк Барт, специалист отдела конструктивных расчетов SSI SCHÄFER GMBH, рассказал о производстве легких стальных профилей в Германии и о проблемах их расчета. Как выяснилось, в Европе нормативная база по расчету ЛСТК хотя и существует, в отличие от России, но еще недостаточно разработана. Например, в Германии специально была создана ассоциация FEM, призванная создавать методики расчета конструкций, в том числе, ЛСТК.

Об основных проблемах в сфере расчета ЛСТК в России рассказал Г.И. Белый. По его словам, тонкостенные стержни действительно требуют особого внимания при расчете, т.к. являются стержнями-оболочками. Особо важным вопросом при расчете ЛСТК является местная устойчивость, которая для обычных металлических конструкций менее важна, чем общая. Другой сложный вопрос – места соединений легких профилей в конструкции. Г.И. Белый рассказал о проведенном в ГОУ СПбГАСУ исследовании ЛСТК, включавшем разработку алгоритма расчета и испытания конструкций в лаборатории для проверки сходимости расчета. В том числе, было показано, что сварка по сравнению с болтовым соединением существенно снижает несущую способность конструкций. Докладчик коснулся и вопроса нормативной базы: по его словам СНиП «Металлические конструкции» в ближайшее время будет переработан, в том числе будут введены более адекватные коэффициенты, не занижающие несущую способность таких конструкций.



Многие доклады в секции ЛСТК стали логическим продолжением докладов на конференции «Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК): история, практика, проблемы и перспективы применения на отечественном строительном рынке», проходившей в сентябре в Ленэкспо (см. Санкт-Петербург как российский центр изучения ЛСТК // Инженерно-строительный журнал, №6, 2009).

2 декабря в рамках Недели науки на кафедре ТОЭС проходила другая конференция – I Международная научно-техническая конференция НОР, секция «Нанотехнологии в строительном материаловедении». Основная часть конференции НОР (Нанотехнологического общества России) прошла в октябре 2009 г. в Москве. Председателем секции строительного материаловедения стал к.т.н., профессор ГОУ СПбГПУ, генеральный директор ООО «НТЦ прикладных нанотехнологий», член Центрального правления НОР Андрей Николаевич Пономарев. Его доклад был посвящен применению нанотехнологий в создании высококачественных бетонов (статью А.Н. Пономарева на эту тему см. в №6, 2009 Инженерно-строительного журнала).

Большинство докладчиков на конференции отмечали необходимость упорядочения исследовательских и производственных процессов в нанотехнологии. Так, Михаил Николаевич Ваучский, д.т.н., профессор ГОУ Военный инженерно-технический университет, посвятил свой доклад понятийному аппарату наномира. По его мнению, для успешного функционирования исследований в области нанотехнологий необходима, прежде всего, нормализация терминологии. В связи с тем, что эта научная область сравнительно молодая, сейчас зачастую используются разные термины для обозначения одних и тех же понятий, а некоторые названия являются откровенно неправильными и звучат для знающего человека бессмысленно. Все это, безусловно, усложняет научный обмен в этой сфере, а также дает дорогу откровенным профанациям.

Другой стороной проблемы является отсутствие какой-либо нормативной базы, например, касательно наномодифицирующих добавок к бетонам. Сейчас уже не так мало организаций в нашей стране занимается производством таких добавок, при этом четкие требования к ним до сих пор не сформулированы. По мнению

Дмитрия Николаевича Коротких из ГОУ «Воронежский государственный архитектурно-строительный университет», основными критериями определения качества добавок должны стать структурообразующие, технологические, экономические и экологические. Было решено составить меморандум конференции и передать его в Президиум НОР для обработки.



В заключение можно сказать, что Неделя науки ГОУ СПбГПУ не только прошла интересно для студентов и преподавателей Политехнического университета, но также привлекла известных ученых, специалистов строительных и проектных организаций из разных городов России и из-за границы. Материалы всех докладов опубликованы в Сборнике тезисов XXXVIII Недели Науки ГОУ СПбГПУ, а в электронном виде находятся на кафедре и могут быть предоставлены по запросу.

Вера Якубсон

Энергоэффективность зданий и строительная теплофизика

10-11 декабря 2009 г. в Ленэкспо проходила выставка «ЖКХ России» и Конгресс «Энергоэффективность XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий». В рамках этих мероприятий вела свою работу II Всероссийская научно-техническая конференция «Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий». Первая такая конференция проходила полтора года назад под руководством Санкт-Петербургского зонального научно-исследовательского и проектного института жилищно-гражданских зданий (СПбЗНИИПИ, о нем см. рубрику «Представляем коллег» в №5, 2009). На этот раз организаторами являлись уже 5 организаций, среди которых ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.



Вопросы строительной теплофизики, ранее известные и интересные лишь узкому кругу специалистов, в последние годы становятся все более актуальными. Это связано, прежде всего, с повышением требований к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций зданий. В 2000 г., с началом борьбы за энергоэффективность в нашей стране этот нормативный показатель был увеличен в среднем в два-три раза. Здесь руководство страны во многом оглядывалось на опыт Европейского союза, где повышение требований к теплозащите ограждающих конструкций идет еще с 70-х годов. Тем не менее, подобный шаг, по мнению большинства докладчиков, не кажется разумным.

Так, выступавший на конференции Владимир Геннадьевич Гагарин, один из известнейших специалистов в этой области, д.т.н., профессор, заведующий лабораторией теплофизических испытаний НИИСФ РААСН, отметил, прежде всего, nepазволительную поспешность этого шага. В отличие от западноевропейских стран, у нас повышение требований прошло резко, одним скачком, поэтому строительная отрасль вынуждена была мгновенно перестроиться, не осуществив предварительной исследовательской и экспериментальной работы. В связи с этим, по словам В.Г. Гагарина, все современное строительство, использующее в качестве ограждающих многослойные конструкции, является, по сути, экспериментальным.



В своем докладе В.Г. Гагарин рассказал об обследовании 51 здания с тремя типами ограждающих конструкций, проведенном в Москве в 2008 г. По самым приблизительным оценкам теплопотери всех трех типов зданий - с облицовкой из кирпичной кладки, с навесными фасадными системами с тонким штукатурным слоем и с навесными фасадными системами с вентилируемой воздушной прослойкой – существенно ниже расчетных. Это, очевидно, объясняется, прежде всего, некачественным строительством. При этом был проведен расчет максимально достижимого сопротивления теплопередаче таких стен, который показал, что ни один из этих конструктивных типов не дает требуемого СНиП значения, хотя выше минимального допустимого. То есть они могут использоваться только при соблюдении требований к удельному расходу тепловой энергии на отопление здания (т.н. потребительский подход).

Несмотря на такие факты, сейчас звучат призывы к дальнейшему повышению требований к теплозащите зданий. Кроме того, что, очевидно, ни одна из имеющихся конструктивных систем не обеспечивает даже нынешнего нормативного значения, существует и другое препятствие. В своем докладе Александр Сергеевич Горшков, к.т.н., докторант ГОУ СПбГПУ, привел график зависимости теплового потока от сопротивления теплопередаче. Он представляет собой гиперболическую функцию, т.е. начиная с определенного значения сопротивления теплопередаче при его дальнейшем увеличении тепловой поток через конструкцию стены падает незначительно. Нормативное для Санкт-Петербурга значение $3,8 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ уже находится на этом участке графика.



Другой стороной проблемы является долговечность фасадных систем нового типа. А.С. Горшков отметил некорректность использования термина «энергоэффективность» в современной трактовке. Сейчас многие используют слова «энергоэффективность» и «энергосбережение» как синонимы, в том числе, говорят и о теплоизоляционных материалах как об энергоэффективных. При этом, по словам А.С. Горшкова, энергоэффективность – это только то энергосбережение, которое имеет экономический эффект. Поэтому, говоря об энергоэффективной конструкции, нужно учитывать затраты на эксплуатацию, которые напрямую связаны с долговечностью: если через 10 лет здание потребует капитального ремонта, экономия на электроэнергии за прошедшие годы будет не так важна.

При этом, поскольку современные фасадные системы являются новинкой, по крайней мере, для климатических условий России данных об их долговечности пока нет: большинство из них эксплуатируются не более 7 лет. Также не существует и общепринятой методики прогнозирования долговечности конструкций. А.С. Горшков рассказал об опыте испытания стеновой ограждающей конструкции в лабораторных условиях с целью создания такой методики. Статью по материалам этого исследования см. на стр. 20.

Так или иначе, теплоизоляционные материалы применять можно и нужно, но только те, срок эксплуатации которых больше срока окупаемости. Кроме того, только повышением теплозащиты ограждающих конструкций достичь энергоэффективности зданий невозможно. Необходимо применять также инженерные энергосберегающие методы. Так, при строительстве зданий с высокими теплосберегающими показателями особое внимание нужно уделять системе вентиляции. Также обязательными являются мероприятия по оптимизации затрат энергии на отопление, например, регулирование параметров теплоносителя по температуре воздуха. В противном случае может возникнуть перетоп, и все сэкономленное тепло уйдет на обогрев улицы, когда жильцы здания откроют окна для проветривания.

По мнению большинства докладчиков, на рынке строительных материалов присутствует перекося в пользу новых теплоизоляционных материалов. При этом часто незаслуженно забывают традиционные материалы, такие как керамический кирпич, газобетон, материалы на основе натурального сырья. Они хорошо зарекомендовали себя в массовом жилищном строительстве, и сейчас активно развиваются, в том числе, повышаются теплозащитные свойства стеновых конструкций на их основе.

Как мы уже отметили, большинство докладчиков критически высказывались относительно нормативной базы в области строительной теплофизики. От противоположной стороны, т.е. органов власти, на конференции выступил начальник методического управления Комитета по строительству Санкт-Петербурга Игорь Иванович Шикалов. Как известно, в последние годы нормативная база строительства претерпевает крупные перемены. Это происходит как на федеральном, так и на местном уровнях. В Санкт-Петербурге сейчас ведется разработка Региональных методических документов (РМД) – нормативных документов, пришедших на смену ТСН. РМД будут носить не обязательный, а рекомендательный характер. Тем не менее, в контрактах по государственному заказу следование РМД будет обязательным, также сейчас ведется работа с саморегулируемыми организациями города, которые, вероятно, будут принимать РМД в качестве стандартов организации. Идет разработка РМД и по тепловой защите зданий: в подготовке документа принимают участие, в том числе, специалисты ГОУ СПбГПУ и ГОУ СПбГАСУ. Уже понятно, что РМД будет основываться, скорее всего, на потребительском подходе, т.к. энергоэффективности строительных конструкций не достичь одними лишь высокими показателями сопротивления теплопередаче.



Вера Якубсон

Применение фибры при изготовлении свай

Доцент И.А. Войлоков*,

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Как показывает практика, изготовление фундаментов, особенно в нашей геологической обстановке, редко обходится без применения различного рода свай. В настоящее время в нашем городе со сваями работает несколько крупных строительных организаций, в прямом и переносном смысле подходящих к данному процессу грамотно и инновационно.

На примере других мегаполисов приходится признать, что современное развитие города невозможно без масштабного освоения подземного пространства. Но Петр Великий заложил наш город на болотистых почвах, и условия строительства в Санкт-Петербурге гораздо сложнее, чем в большинстве регионов нашей страны.

Это обусловлено, прежде всего, специфическими геологическими условиями. Значительная часть территории города сложена слабыми водонасыщенными тиксотропными грунтами, которые изменяют свои характеристики при различного рода воздействиях, от природных до техногенных. Кроме этого, большинство зданий постройки XVIII, XIX, начала и середины XX веков находятся в крайне сложном техническом состоянии, имеют многочисленные трещины и повреждения в несущих конструкциях. Для таких зданий любая дополнительная осадка во время производства котлованных работ традиционным способом (устройство шпунтового ограждения, отрывка грунта, понижение грунтовых вод открытым водоотливом и т.д.) может повлечь непредсказуемые последствия [1].

Если оглянуться на историю свайного фундаментостроения, то оно прошло, как и вся строительная отрасль, через множество витков совершенствования технологий. Начало было положено простыми деревянными сваями, их погружали при помощи забивки.

Археологические раскопки на территории нынешней Швейцарии показали, что сваи использовались человеком и в глубокой древности – в эпоху неолита. Первоначально они использовались в качестве стоек, позволявших защитить жилище от грунтовых вод. В древнем Риме инженер Витрувий (I в. до н. э.) подчеркивал необходимость использования деревянных свай при строительстве на наносных или болотистых грунтах для передачи нагрузки от зданий на так называемый «материк». Позднее применение свай позволило возводить на слабых грунтах все более и более массивные сооружения [2].

По понятным соображениям нельзя обойти вниманием опыт Нидерландов, где болотистая почва сделала сваи необходимой составляющей строительства. По свидетельству П. П. Гнедича, только «благодаря сваям нидерландцы защитились от моря и отвоевали у него значительную площадь суши. Амстердам со своим населением в четверть миллиона человек весь стоит на сваях».

Петр I начал усиленно применять передовой опыт голландцев, о чем свидетельствует его письмо к И. Коробову, в котором он дает указание изучить «манер голландской архитектуры, а особливо фундаменты» из-за схожести грунтов. В 1715 г. Петром издается приказ о подготовке к сентябрю, где есть следующая цитата: «...каждый против своего дома саженные сваи для обивки берегов, мерою трехсаженные, числом сколько против каждого двора оных бы столбов могло пойти». И в ноябре этого же года – новый приказ «Об окончании Санкт-Петербургскими жителями к будущей весне бития свай против домов своих, по берегам большой и малой Невы и протокам, под опасением отобрания тех дворов». Согласно ему каждый житель обязан был бить сваи, закладывая за ними связки фашичника и утрамбовывать землю на берегу напротив своего участка [2].

Изначально все сваи изготавливались методом забивки. И долгое время забивка свай осуществлялась вручную. Первое описание примитивного ручного копра относится к 1660 г. Изобретение станины с направляющими для бабы и присоединение для ее подъема различных приспособлений позволило увеличить мощность снаряда. Несомненным достижением технической революции было изобретение Нэсмитом (Великобритания) паровой бабы. В 1889 г. эта конструкция была усовершенствована русским инженером С.А. Арцишем, что позволило значительно увеличить ее производительность.

Вплоть до 1838 г. применялись только забивные сваи. Они также эволюционировали. Сначала было дерево, затем сталь, потом бетон. Со временем модернизировались и деревянные сваи, при забивке свай в гравелистые и твердые грунты для деревянных свай стали использовать железные башмаки. В 1838 г. Митчелл (Mitchall) предложил завинчивать сваи в грунт, для чего их нижняя часть снаряжалась винтом. Наконечники свай имели разный вид в зависимости от свойств грунта. В. Карлович в монографии «Основания и фундаменты» (1869 г.) признает преимущества винтовых свай перед забивными при применении их в некрепких грунтах, так как «концы их передают давление на большую площадь». Именно тогда, двести лет назад, было положено начало использованию буронабивных и винтовых свай.

Классификация свай

Данная классификация производится по способу заглубления и приводится согласно Своду правил СП 50-102-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов»:

- забивные (вдавливаемые) – железобетонные, деревянные и стальные, погружаемые в грунт без его выемки или в лидерные скважины с помощью молотов, вибропогружателей, виброудавливающих, виброударных и вдавливающих устройств;
- сваи-оболочки – железобетонные, заглубляемые вибропогружателями с выемкой грунта и заполняемые частично или полностью бетонной смесью;
- набивные – бетонные и железобетонные, устраиваемые в грунте путем укладки бетонной смеси в скважины, образованные в результате принудительного отжатия (вытеснения) грунта;
- буровые – железобетонные, устраиваемые в грунте путем заполнения пробуренных скважин бетонной смесью или установки в них железобетонных элементов;
- винтовые;
- бурозавинчиваемые.

В свою очередь, набивные сваи по способу устройства подразделяются на:

- набивные, устраиваемые путем погружения инвентарных труб, нижний конец которых закрыт оставляемым в грунте башмаком или бетонной пробкой, с последующим извлечением этих труб по мере заполнения скважин бетонной смесью;
- набивные виброштампованные, устраиваемые в пробитых скважинах путем заполнения скважин жесткой бетонной смесью, уплотняемой виброштампом;
- набивные в выштампованном ложе, устраиваемые путем выштамповки в грунте скважин с последующим заполнением их бетонной смесью.

Буронабивные сваи по способу устройства подразделяются на:

- буронабивные сплошного сечения с уширениями и без них, бетонируемые в скважинах, пробуренных в глинистых грунтах выше уровня подземных вод без крепления стенок скважин, а в любых грунтах ниже уровня подземных вод – с укреплением стенок скважин глинистым раствором или инвентарными извлекаемыми обсадными трубами;
- буронабивные полые круглого сечения, устраиваемые с применением многосекционного вибросердечника;
- буронабивные сваи с уплотненным забоем, устраиваемые путем втрамбовывания в забой скважины щебня;
- буронабивные с камуфлетной пятой, устраиваемые путем бурения скважин с последующим образованием уширения взрывом и заполнением скважин бетонной смесью;
- буроинъекционные диаметром 0,15–0,25 м, устраиваемые в пробуренных скважинах путем нагнетания (инъекции) в них мелкозернистой бетонной смеси или цементно-песчаного раствора, или буроинъекционные с уплотнением окружающего грунта путем обработки скважин по разрядно-импульсной технологии;
- буроинъекционные, устраиваемые полым шнеком;
- сваи-столбы, устраиваемые путем бурения скважин с уширением или без него, укладки в них омоноличивающего цементно-песчаного раствора и опускания в скважины цилиндрических или призматических элементов сплошного сечения со сторонами или диаметром 0,8 м и более;
- буроопускные сваи с камуфлетной пятой.

Возможность применения фибры в изготовлении свай

Применение и использование различного рода свай в строительстве невозможно без использования армирования. В нашей практике в основном используется классическое стержневое армирование. Но, как показало время и практика, применение дисперсного армирования не только возможно, но и нужно. Первооткрывателями в данной области были наши исследователи из ЛИСИ, ныне СПбГАСУ.

Как уже писалось ранее, применение свайных фундаментов взамен ленточных позволяет, по некоторым данным, уменьшить объем земляных работ на 50–70%, расход железобетона – на 30 % и более, трудоемкость – на 25 % и сметную стоимость – на 30%. В современных условиях устройство свайных фундаментов и, следовательно, изготовление свай можно вести круглогодично без снижения темпов работ в зимних условиях.

К сожалению, отмеченный экономический эффект часто не достигается из-за многочисленных случаев преждевременного разрушения оголовков, а иногда и стволов железобетонных свай, в результате чего они не могут быть погружены до проектных отметок, что приводит к снижению расчетных сопротивлений и надежности свайных фундаментов. Результаты обследования свайных полей в Санкт-Петербурге показали, что при погружении забивных свай в тяжелые и средние грунты около 30% железобетонных свай не достигают

Войлоков И.А. Применение фибры при изготовлении свай

проектных отметок и более чем у 80% свай приходится срезать головы и стволы перед устройством ростверка. Поэтому одна из важных проблем – это забивка свай до проектной отметки.

На основании проведенных исследований ОАО «Фундаментпроект», ОАО «ЦНИИПромзданий», ООО НИИЖБ и ОАО «СПбЗНИИПИ» (бывший ЛенЗНИИЭП) разработали рабочие чертежи для широкой номенклатуры свай с применением сталефибробетона, а на «Экспериментальном заводе» (Санкт-Петербург) разработана промышленная технология и организовано первое в России производство сталефибробетонных свай [4]. Изготавливаемые на «Экспериментальном заводе» сваи с применением сталефибробетона прошли проверку в условиях реального строительства, в результате которой установлено, что они обладают высокой ударостойкостью, обеспечивающей бездефектное погружение до проектных отметок и возможность отказа от применения свай-дублеров. Новые сваи можно забивать на одинаковую глубину, что позволяет избежать срезки стволов перед устройством ростверка. Способность к восприятию значительной энергии удара сокращает время погружения свай на 50%, повышает возможности сваебойного оборудования и производительность сваебойных работ. Таким образом, открывается возможность решения механической системы «молот–свая–грунт» с наилучшими технико-экономическими показателями

Применение сталефибробетона в сваях снижает трудоемкость и стоимость изготовления свай, существенно повышает их ударостойкость, что позволяет бездефектно погружать сваи в грунт до проектных отметок. Применяются также призматические и пирамидальные сваи сплошного квадратного сечения со сталефибробетонным оголовком и железобетонным стволом, а также сваи, целиком изготовленные из сталефибробетона. Призматические сваи имеют длину 8-14 м и сечение 35х35 см, пирамидальные – длину 6 м, сечение оголовка 40х40 см и тупого конца 20х20 см.

Испытания показали высокую эффективность свай с применением сталефибробетона. Ударная вязкость сталефибробетона в два и более раз выше, чем железобетона при равном расходе стали. Для снижения стоимости сталефибробетонных свай в некоторых случаях советские первоткрыватели применяли не только фибру из проволоки диаметром 1,5-2 мм, но и фибру из отработанных канатов.

В качестве примера успешного использования сталефибробетона в сваях можно привести данные, согласно которым на объектах строительства Санкт-Петербурга и Ленинградской области забито более 30 000 свай различной конструкции с применением этого материала, что обеспечило 30%-ую экономию средств [5].

Если рассматривать дальнейшее развитие применения фибры в сваях, то несомненный интерес представляет ее применение как в буронабивных сваях всех типов, так и в буроинъекционных и винтовых сваях. Несколько экспериментов были с успехом проведены специалистами ООО «Геоизол» совместно со специалистами ГОУ ВИТУ. В качестве дисперсной арматуры применялось базальтовое волокно. Благодаря усилиям В.Ю. Смоленкова и Б.И. Петракова было изготовлено несколько буронабивных свай, при этом получены неплохие результаты.

Ведь технология проста: заливка фибробетона, а затем арматурный каркас и привязка к нему плиты или фундамента. Но увы, для таких экспериментов нужна обширная, даже государственная программа. Как тут не вспомнить программу, принятую еще в 80-х годах прошлого века в Советском Союзе. Ведь благодаря ей и был заложен фундамент нынешнего развития российского фибробетона.

За границей также доказана целесообразность применения данной технологии. Французы в 1989 г. провели успешные испытания буронабивных свай, изготовленных с применением сталефибробетона [6]. Данные отчета убедительно показывают, что применение фибры в качестве арматуры положительно сказывается на многих свойствах свай. В частности, свая из фибробетона может деформироваться, но не ломается и в 3 раза надежнее, чем свая из железобетона такого же диаметра.

В заключение хочется сказать, что тема применения фибры в сваях еще далека от исчерпана, и надеемся, в ближайшем будущем будет освещена нами более подробно.

Литература

1. Мангушев Р.А. Технологические методы устройства подземных пространств на примере Санкт-Петербурга.
2. Осокин А.И., Серебрякова А.Б. Современные технологии свайного фундаментостроения // <http://library.stroit.ru/articles/sovsvai/index.html>.
3. СП 50-102-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов».
4. Пухаренко Ю.В., Стерин В. С., Леголов И. Н. Опыт проектирования и производства эффективных строительных конструкций из фиброармированных бетонов // Популярное бетоноведение, №4 (24). 2008.
5. Пухаренко Ю.В. Эффективные фиброармированные материалы и изделия для строительства и реставрации // Материалы научно-практической конференции «Реставрация в храме-памятнике» № 2, 2006. СПб, 2006.
6. Jean Hurtado, Wolfgang Jalil, Xavier Destree «Developpements recents des pieux a la tariere creuse». Analises №472 fevrier 1989.

**Илья Анатольевич Войлоков, Санкт-Петербург
Тел. моб.: +7(921)944-52-99; эл. почта: ilya@voilokov.ru*

Использование микросвай при ремонте набережных

Технический директор В.Ю. Смоленков,
ООО «Геоизол»*

В мае 2003 года Санкт-Петербургу исполнилось 300 лет. Практически все строительные и проектные организации города принимали участие в программе подготовки города к торжественным мероприятиям. ООО «Геоизол», Санкт-Петербургская строительная компания, специализирующаяся на решении геотехнических проблем, участвовала в работах по реконструкции зданий и сооружений на 10 объектах.

Одним из объектов, имеющих особое значение для подготовки города к празднику, был участок Дворцовой набережной, капитальный ремонт которого проводило ООО «Геоизол».

Дворцовая набережная является памятником истории и культуры XVIII века федерального значения.

Начало строительства Дворцовой набережной относится к Петровскому времени. Первое распоряжение о регулировании берегов Невы и создании «набережной улицы» от Адмиралтейства до Почтового двора, находившегося на месте Мраморного дворца, датировано 24 января 1715 г. Первоначально берега Невы укреплялись деревянными сваями и стенками. Деревянные набережные быстро разрушались и требовали постоянного ремонта. Начиная с 1720 г. стенки набережных стали возводить из камня. Строительство Дворцовой набережной с облицовкой из гранита началось в 1763 году под руководством архитектора Ю.М. Фельтена. В 1763 г. развернулось грандиозное по тому времени строительство набережных, одетых тесаным «диким морским камнем» – гранитом. Гранит для набережных выламывался на островах в Финском заливе и доставлялся в Петербург водным путем.

Основание каменной стенки представляло собой 7 рядов свай. В первом ряду сваи забивались через 70 см одна от другой, за ними следовал в сторону берега второй сплошной ряд, и затем еще 5 рядов. На первый ряд укладывался брус, по следующим трем рядам к сваям железными болтами прикреплялся ростверк и возводилась стена набережной, еще три ряда выполняли функцию контрфорса.

Пустоты между сваями заполнялись диким камнем и щебнем, на которые опускались камни первого ряда кладки. По первому ряду на слой мха укладывался второй ряд камней. Выше возводилась стена из плит с облицовкой гранитными блоками. Каменная стена завершалась «кордонным камнем» – карнизом, отделяющим его от парапета. Гранитная Дворцовая набережная, построенная в XVIII веке, до нашего времени сохранила свой первоначальный вид, однако конструкция стены и основания с течением времени потребовали ремонта и усиления.

В 1929 г. был произведен капитальный ремонт наклонного участка Дворцовой набережной у дома № 6. Гранитную стенку разобрали, укрепили свайное основание и заново сложили. Причиной повреждения основания набережной явилось гниение оголовка свай и деревянных ростверков. Работы по реконструкции Дворцовой набережной проводились под руководством инженера Б.Д. Васильева.

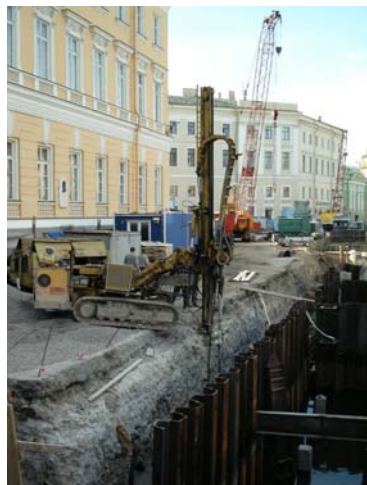
По проекту, разработанному Б.Д. Васильевым, деревянный ростверк, состоящий из поперечных и продольных бревен, врубленных между собой, и посаженных на шипы свай, удалялся. Три ряда старых свай основания сохранялись, но их головы специально обрабатывались. Это свайное основание усиливалось добавлением в первый ряд новых забиваемых свай длиной в 4 сажени (8,5 м) диаметром 27 см.

На это свайное основание укладывалась массивная бетонная подушка толщиной 1 м. Выше на нее укладывалась облицовка с использованием старого гранита. Б.Д. Васильевым была реконструирована и кладка стенки набережной. Кладка верхней части стенки, где не сказывается одновременное действие мороза и воды, выполнялась из известняка. От бетонной подушки на высоту, превышающую на один метр уровень горизонта воды, велась кладка из рваного гранитного камня на цементно-песчаном растворе.

Следующий капитальный ремонт набережной производился в 1950 г. По проекту 1950 г. тело набережной разбиралось до основания, дополнительные ряды свай не возводились, бетонный ростверк укладывался на подготовку из щебня, подпорная стенка выполнялась из бетона М150 до отметки 1,2 м, а выше – из бута. Гранитная облицовка закреплялась с помощью анкеров из полосовой стали и скреплялась между собой скобами.

Участок Дворцовой набережной, подлежащий капитальному ремонту, расположен в районе дома № 6 (напротив Мраморного дворца) и имеет протяженность около 80 м. Стенка набережной делится на участок переменной высоты, длиной 51,8 м, с понижением уровня от Троицкого моста вниз по течению, и горизонтальный участок. В августе-сентябре 2001 г. специалистами ООО «Геоизол» было выполнено обследование участка набережной. По результатам обследования, в зоне перехода от горизонтального участка к наклонному произошли значительные деформации гранитной облицовки со смещением нижних камней по вертикали до 15 см, за грань стенки – до 9 см. На данном участке наблюдается просадка гранитной мостовой и брусчатки. Участок со значительными деформациями признан аварийным. На остальных участках Смоленков В.Ю. Использование микросвай при ремонте набережных

подпорная стенка получила незначительные деформации, однако наметилась тенденция выпадения облицовочных гранитных камней нижнего ряда, гранитное и брусчатое мощение деформированы, состояние швов камней облицовки неудовлетворительное.



Основные конструктивные решения

Традиционное решение вышеописанных проблем при капитальном ремонте набережных таково: разборка стенки набережной, устройство свай диаметром не менее 350 мм, устройство ростверков и подпорной стенки под прикрытием шпунтового ограждения в русле реки. Выполнение традиционно применяемых технологий требует размещения тяжелого оборудования на площадке с закрытием движения транспорта по набережной на длительный срок. В феврале 2003 г. времени и средств на традиционные методы ремонта участка набережной у города не было.

ООО «Геоизол» разработал проект по капитальному ремонту участка Дворцовой набережной с использованием «щадящих» технологий, позволяющих произвести работы в кратчайшие сроки, с минимальными затратами и без остановки движения транспорта по набережной. К производству работ ООО «Геоизол» приступил в феврале 2003 г и закончил в мае 2003 года.

Были разработаны и выполнены следующие мероприятия.

1. Устройство инъекционных скважин

Тело подпорной стенки за исключением аварийного участка усиливалось инъекционными скважинами. Задачей данных работ является восстановление сплошности, прочности и водонепроницаемости подпорной стенки щадящими методами. Сущность метода заключается в том, что в кладку через пробуренные скважины нагнетается раствор, который после твердения превращается в плотный материал, заполняющий трещины и пустоты.

Во избежание выпадения гранитных камней облицовки при нагнетании раствора были предложены и выполнены инъекционные работы в два этапа. На первом этапе устраиваются инъекционные скважины первой очереди (ЦС-1), на втором - скважины второй очереди (ЦС-2). Предложенный метод впервые был применен для усиления стенок набережных в Санкт-Петербурге.

Перед инъектированием проводилось гидроопробование для определения сплошности тела кладки опытным нагнетанием воды в пробуренные скважины. Гидравлическое опробование проводилось с целью определения водопроницаемости и сплошности тела подпорной стенки опытным нагнетанием воды в пробуренные скважины.

Гидравлическое опробование проводилось при наибольших допустимых величинах давления и расхода (при этом достигался наибольший радиус влияния нагнетания и, следовательно, объем изучаемого участка стены). За наибольшее допустимое давление нагнетания воды $P_{\text{доп}}$, не вызывающее гидравлического разрыва кладки стены, приняты величины $P_{\text{доп}}=0,3$ МПа для I-го этапа работ и $P_{\text{доп}}=0,5$ МПа для II-го этапа работ. За наибольший допустимый расход воды $Q_{\text{доп}}$ принята величина $Q_{\text{доп}}=20$ л/мин.

Продолжительность нагнетания в один интервал принималась 10 минут независимо от того, устанавливался или не устанавливался расход воды. Все измерения давления и расхода воды записывались в «Журнал наблюдений».

Буроинъекционные работы велись по захваткам по результатам гидроопробования. Весь участок работ был разбит на 6 захваток. Захватка, на которой велись работы, освобождалась от гранитных плит тротуара – 2 ряда. Кардонные и парпетные плиты не снимались и оставались на месте. Снятые плиты нумеровались согласно чертежу и отдельно складировались.

После всех подготовительных работ пробуривались инъекционные скважины первой очереди ЦС-1. Бурение скважин ЦС-1 проводилось пневмоперфораторами диаметром 42 мм, под углом наклона 15 градусов. Бурение и последующее инъектирование цементным раствором по скважинам первой очереди производилось в 2 яруса. Скважины первого яруса были глубиной 2 м, скважины второго яруса выполнялись после цементации первого яруса с повторным разбуриванием на глубину 3 м. Во время нагнетания раствора в зону инъекции величины давления и расхода нагнетаемого раствора не превышали предельно допустимых значений, установленных для опытного нагнетания воды.

Смоленков В.Ю. Использование микросвай при ремонте набережных



Цементирующая установка была снабжена устройством для измерения расхода нагнетаемого раствора. Для фиксации давления нагнетания манометры устанавливались в двух точках цементационной системы.

В процессе нагнетания раствора его расход и давление нагнетания наблюдались непрерывно. Начатое нагнетание раствора продолжалось непрерывно до наступления отказа или до вынужденного перерыва в нагнетании. За отказ принималось поглощение раствора менее 3 л/мин при проектном предельно допустимом давлении (1 атм.), выдержанном в течение 5 минут. Для инъекции тела подпорной стенки применялись цементные растворы на портландцементе марки 400 с добавкой хлористого кальция (2% от массы цемента).

Назначение добавки хлористого кальция – противоморозная и пластифицирующая добавка, ускорение сроков схватывания и твердения цемента, повышение адгезионной способности цементного камня к старому бетону, повышение водонепроницаемости цементного камня.

Начальный состав нагнетаемого раствора назначается по результатам гидравлического опробования зоны цементации (табл.1).

Таблица 1. Начальная концентрация раствора при удельном водопоглощении

Удельное водопоглощение q , л/(мин·м ²)	< 0,1	0,1...0,5	0,5...1,0	1,0...2,0	2,0...4,0
Концентрация раствора (цемент : вода)	1:10	1:5	1:3	1:2	1:1

Цементационные скважины второй очереди ЦС-2 выполнялись аналогично ЦС-1 в два яруса пневмоперфораторами диаметром 42 мм перпендикулярно поверхности тротуара.

Состав работ по инъектированию тела подпорной стенки:

- бурение инъекционных скважин;
- оборудование скважин иньекторами;
- приготовление инъекционного раствора;
- нагнетание инъекционного раствора;
- ликвидация скважин.

2. Устройство буроинъекционных свай

В качестве свай использовались буроинъекционные сваи $\varnothing$ 180 мм. Только на аварийном участке ($l=5,5$ м) производилась разборка стены набережной со снятием парапетных плит и массивной гранитной облицовки до основания. Разборка тела стенки ниже уровня воды в Неве велась под прикрытием шпунтового ограждения. После разборки стены было установлено: бетонный ростверк под аварийным участком стены отсутствует.

После определения фактического положения деревянных свай были выполнены буроинъекционные сваи $\varnothing$ 180 мм $l=5,5$ м в количестве $n=11$ шт. в промежутках между деревянными сваями. Легкое буровое оборудование размещалось прямо на набережной. После устройства ростверка производилось послойное бетонирование подпорной стенки с одновременной установкой облицовочных плит гранитной облицовки.

3. Вертикальная планировка. Водоотведение с набережной

До проведения ремонтных работ на участке набережной отсутствовал сток дождевых и талых вод в систему ливневой канализации. В отдельных местах уклон тротуара был направлен к парапету. Все это приводило к постоянному размыву тела подпорной стенки набережной.

Для организации поверхностного стока с набережной выполнена вертикальная планировка, обеспечивающая сток дождевых вод с пешеходной зоны на проезжую часть и в дождеприемный колодец.

Продольные уклоны гранитного мощения повторяют существующие величины и направления уклонов верха парапета. Поперечные уклоны гранитного мощения выполнены с уклоном 15% в сторону проезжей части.

** Вячеслав Юрьевич Смоленков, Санкт-Петербург*

Тел. раб.: +7(812)3375313; эл. почта: info@geoizol.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

На базе строительного факультета Индустриального института в 1958 г. был образован Пензенский инженерно-строительный институт (ИСИ) – 14-й специализированный строительный вуз СССР.

Его основу в момент организации составили около 700 студентов дневного отделения и 153 студента заочного отделения, а также 5 кафедр: архитектуры, инженерных конструкций, оснований и фундаментов, строительного производства и геодезии, на которых работало немногим более 20 штатных преподавателей, из них только четверо имели ученые степени и звания.

В 1994 г. Пензенский ИСИ переименован в Пензенский государственный архитектурно-строительный институт (ПГАСИ), а в 1996 г. после успешной государственной аттестации Пензенскому ГАСИ предоставлен статус академии, и он переименован в Пензенскую государственную архитектурно-строительную академию (ПГАСА).

В 2003 г. академия переименована в Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС).

В настоящее время в состав Пензенского государственного университета архитектуры и строительства входят 4 института: автомобильно-дорожный, инженерно-строительный, институт инженерной экологии, институт экономики и менеджмента; 7 факультетов: технологический, архитектурный, факультет управления территориями, факультет заочного и открытого образования, факультет обучения иностранных граждан, факультет дополнительного профессионального образования.

Основной задачей университета всегда была и остается подготовка специалистов с учетом запросов региона. В настоящее время она осуществляется по следующим направлениям:

- ✓ экономика;
- ✓ эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования;
- ✓ защита окружающей среды;
- ✓ архитектура;
- ✓ строительство;
- ✓ метрология, стандартизация и сертификация;
- ✓ информатика и вычислительная техника;
- ✓ организация перевозок и управление на транспорте;
- ✓ транспортное строительство;
- ✓ менеджмент;
- ✓ геодезия и землеустройство;
- ✓ культура и искусство;
- ✓ воспроизводство и переработка лесных ресурсов.

В университете работают специализированные советы по защите кандидатских и докторских диссертаций в области исследований строительных конструкций, разработки новых строительных материалов, водоснабжения и водоотведения.

Необходимый уровень подготовки (обучения) выпускаемых университетом специалистов обеспечивается современным уровнем лабораторного оборудования, широкой компьютеризацией учебного процесса (специализированные классы оборудованы современными компьютерами), внедрением активных форм обучения (деловые игры, решение инженерных задач, создание реальных курсовых и дипломных проектов и т. п.). К услугам студентов библиотека, насчитывающая более 400 тысяч томов. Ежегодно издательство университета выпускает более 50 наименований учебных и научных пособий и около 100 наименований методических пособий.

Достаточно высокий уровень профессиональной подготовки специалистов всегда подтверждался гарантированным спросом на выпускников университета. Об этом же свидетельствуют блестящая карьера лучших из них.

Из числа выпускников ПГУАС выросли руководители министерств и ведомств, видные государственные и общественные деятели, крупные ученые, военные строители и руководящие работники Пензы, области и ее районов.

Подготовил И.А. Войлоков

Формирование микроструктуры наполненных цементных материалов

Д.т.н., профессор, декан факультета «Управление территориями» О.В. Тараканов,
студентка Е.О. Тараканова,*

ГОУ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

В современной технологии бетонов интенсивно развивается направление производства многокомпонентных цементных материалов, модифицированных минеральными и комплексными добавками, позволяющими направленно воздействовать на процессы структурообразования и твердения цементных растворов и бетонов и получать материалы с заданными физико-механическими свойствами.

Свойства цементных материалов во многом определяются химико-минералогическим составом вяжущего, гранулометрическими характеристиками заполнителей, активностью минеральных добавок, водоцементным отношением и многими другими факторами.

Важную роль в процессах формирования микро- и макроструктуры, прочности и основных свойств наполненных цементных материалов играет структурная топология. Поэтому исследования процессов кристаллизации гидратов, формирования структуры цементных материалов на микро- и макроуровнях, характера распределения микрочастиц и агрегатов в наполненной цементной матрице, их формы, взаимного расположения и влияния имеют важное теоретическое и практическое значение.

В наполненных цементных системах оптимальные условия для активации процессов твердения, агломерации и срастания частиц могут быть достигнуты применением микрозаполнителей различного фракционного состава. В этом случае между частицами, сближенными до минимальных расстояний, места контактов при кристаллизации гидратов могут являться активными зонами, связывающими микрокристаллы, образующиеся на поверхности частиц в агломераты и микрочастицы между собой.

Наиболее предпочтительной теорией твердения вяжущих систем является сквозьрастворная, предполагающая кристаллизацию гидратов из пересыщенных растворов. Однако следует отметить, что пересыщение в системе может определяться не только различием растворимостей исходной фазы и гидратов, но и избытком твердой фазы (вяжущего), обеспечивающим непрерывный выход в раствор вещества при одновременной кристаллизации гидратов.

В цементной системе постоянно поддерживается определенное значение пересыщения, которое, учитывая неоднородность поверхности цементного зерна и микрозаполнителей, является переменной величиной. Состояние каждой частицы в любой момент времени определяется пространственными координатами, объемом или эквивалентными параметрами (например, радиусом сферы и т.д.), структурой и свойствами гидратной воды, зарядовым состоянием поверхности, характером контактирования гидратными оболочками и др. Состояние агрегатов частиц определяется совокупностью параметров, характеризующих состояние каждой из частиц входящих в агрегат.

Поверхность любой частицы в начальный период гидратации гидроксигирована, что приводит её в активное состояние по сравнению с поверхностью безводных частиц.

Введение в изначально нестабильную систему химических добавок и микрозаполнителей различной структуры и свойств способствует не только изменению уровня пересыщения среды в целом, но и образованию локальных областей пересыщения, зависящих от взаимного расположения, свойств частиц и окружающей среды. В системах, состоящих из совокупности исходных фаз с различной растворимостью, каковой является гидратирующаяся цементная суспензия, существенное влияние на процессы кристаллизации оказывает пространственное расположение частиц по отношению к потоку растворителя и относительно друг друга.

Квазистационарные структуры цементной системы в процессе гидратации уступают место новым структурам, состояния и свойства которых зависят от интенсивности растворимости исходных фаз и скорости кристаллизации гидратов. В цементной системе растворимости исходных фаз различны, поэтому при локальном изменении пересыщения и уменьшении количества гидратированных ионов и молекул в растворе некоторые родственные фазы, находящиеся в ненасыщенной среде, растворяются и исчезают, и в системе остаются фазы с наименьшей растворимостью. Подобное образование и растворение фаз можно рассматривать как форму структурного упорядочивания системы.

О своеобразной цикличности и нестабильности гидратационного процесса можно судить по нестабильному характеру изменения пластической прочности цементно-песчаного раствора 1:2 как контрольного состава, так и с добавками умеренных ускорителей твердения бетона – ацетатов натрия и кальция (рис. 1).

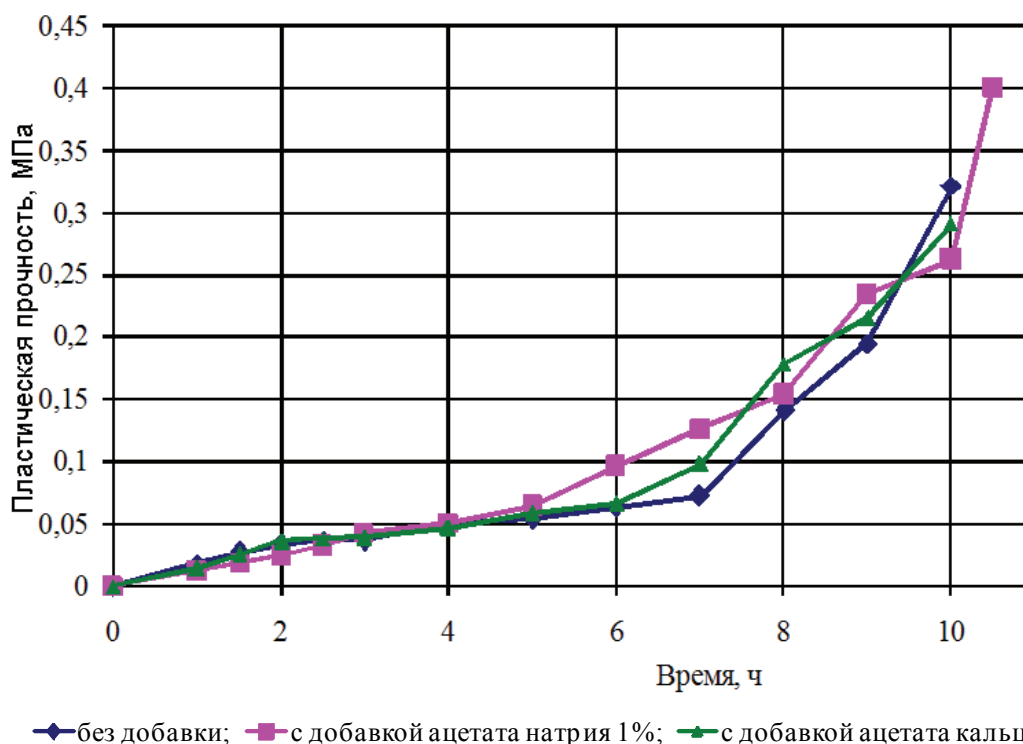


Рисунок 1. Кинетика изменения пластической прочности цементно-песчаного раствора 1:2, В/Ц=0,5

Еще более наглядно нестабильность твердеющей структуры характеризуют электронные снимки поверхности гидратированного C_3A (рис. 2 и 3). При анализе структуры сформированных гидратов отмечается, что характерных для АFm-фаз гексагональных пластинок правильной формы практически не обнаружено. Отмеченное на рис. 2 «вихреобразное» формирование гидратов может быть следствием образования областей с различным уровнем пересыщения, в результате чего кристаллы растут в вихревом потоке, образуя различные пространственные формы. Колебания среды являются сильнодействующим фактором, который может вызвать колебания скорости зарождения новой фазы на несколько порядков. В наполненных системах при сближении частиц и высокой вероятности формирования фазовых контактов скорость образования гидратов возрастает вследствие уменьшения зазоров между частицами, и в пределах зазора возможно образование кристаллизационных мостов, скрепляющих частицы и повышающих прочность системы (рис. 4).

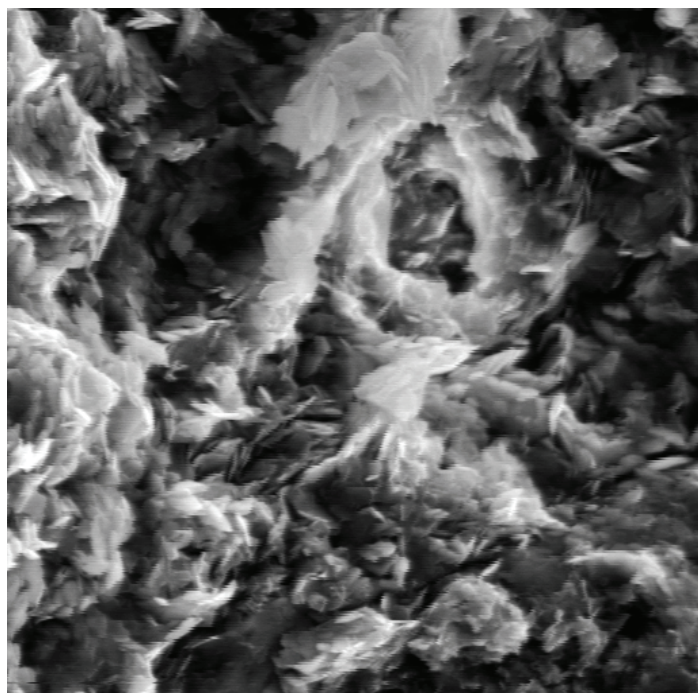


Рисунок 2. Поверхность гидратированного C_3A ($\times 3000$). СЭМ

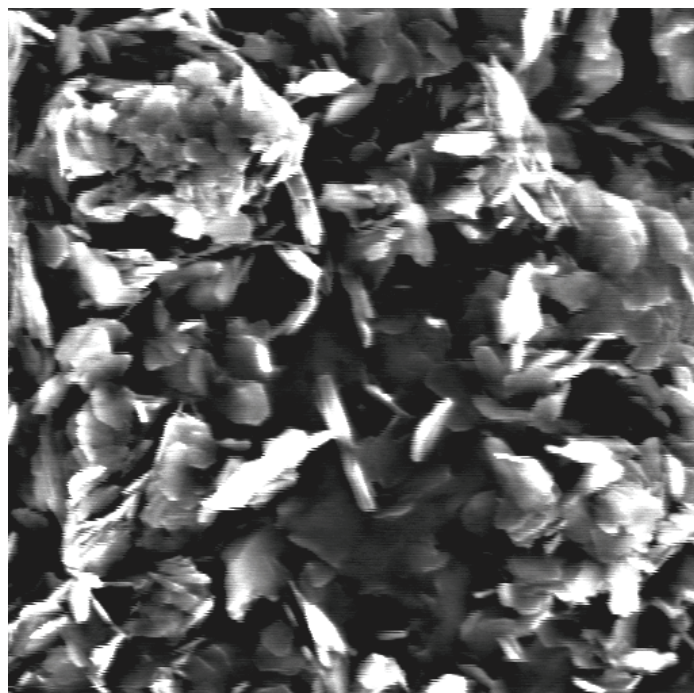


Рисунок 3. Поверхность гидратированного C_3A ($\times 4500$). СЭМ

Основными механизмами повышения прочности наполненных цементных систем является уплотнение структуры, при котором создаются условия для сближения частиц, образование контактных кристаллизационных мостов, а также переплетение гидратных фаз, имеющих различную структуру и геометрические размеры.

Исследование кинетики твердения и прочности цементно-песчаных растворов с добавками тонкодисперсного карбонатного шлама химводоочистки предприятий энергетики ($S_{уд} = 15$ тыс. $см^2/г$) и гранитной каменной муки ($S_{уд} = 7$ тыс. $см^2/г$) показали, что при использовании добавок совместно с суперпластификатором С-3 создается возможность повышения прочности материала в 2-4 раза (табл. 1).

Следует отметить, что применение тонкодисперсных микронаполнителей, особенно на основе плотных и прочных горных пород, позволяет значительно улучшать реологические характеристики смесей за счет увеличения цементно-минеральной матрицы – главной составляющей, ответственной за реологическое состояние системы. При этом при увеличении доли каменной муки повышается эффективность действия пластифицирующих добавок и суперпластификаторов.

Фактором межкристаллического взаимодействия в цементной системе определяется характер формирования и свойства структуры более высокого уровня, т.е. структуры, состоящей из цементных частиц и расположенных между ними частиц микронаполнителей.

Для неупорядоченных наполненных цементных систем в процессе гидратации и твердения происходит непрерывное изменение состояния и топологии структуры. Эти параметры характеризуются развитием неупорядоченного структурообразования при кристаллизации в виде скоплений микро- и макрочастиц, наноструктур и флуктуаций плотности. Процесс изменения топологии цементных систем на наноуровне осложняется формированием гидратных фаз с различным кристаллическим строением (иглы, волокна, пластинки, кубические структуры и т.д.), вносящих определенную нестабильность и неупорядоченность в формирующуюся структуру. Кроме того, процессы перекристаллизации гидратов (например, гидроалюминатов кальция) могут изменять топологию структуры при изменении условий твердения (температура, влажность и др.).

В большинстве случаев мы рассматриваем топологию макрочастиц цемента с наполнителем, не оценивая должным образом характер образования гидратных фаз, формирующихся на их поверхности, в значительно большей степени, чем контактные взаимодействия макрочастиц, влияющие на склеивание и срастание их между собой.

Особая роль в процессах структурообразования и твердения принадлежит связанной воде и гидратированным ионам, определяющим как процессы растворения, так и в последующем, при встраивании в кристаллическую решетку, характер кристаллизации и образования гелевой фазы.

В свою очередь, гелевая фаза является основным элементом формирующейся системы, определяющей характер изменения её реологических свойств и на более позднем этапе развития – физико-механических свойств.

Моделирование в гетерогенной, многофазовой и нестабильной цементной системе достаточно сложно, вследствие её многокомпонентного состава, полидисперсности и постоянно изменяющегося характера кристаллизации гидратов. Формирующаяся система имеет вероятностную структуру на всех уровнях развития и постоянно претерпевает изменения.

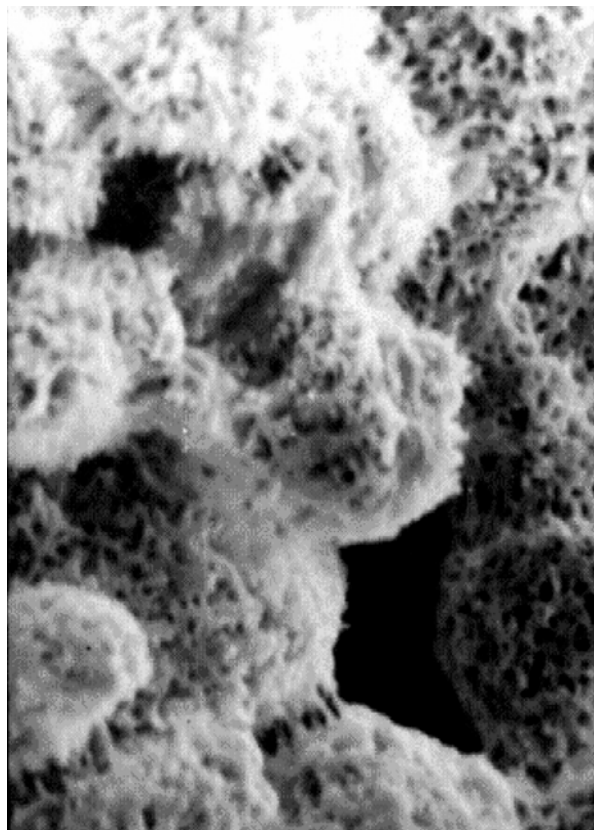


Рисунок 4. Частицы гидратированного C_3S ($\times 7000$). СЭМ

Таблица 1. Влияние минеральных добавок и суперпластификатора С-3 на прочность цементно-песчаных растворов

№ п/п	Состав	Кол-во добавки, % от массы цемента	Прочность при сжатии, МПа, через сут		
			7	14	28
1	Старооскольский ПЦ500Д0 1:2:0,5 Без добавки	–	4,0	5,6	18,0
2	То же С добавкой карбонатного шлама С-3	5 0,5	<u>10,0</u> 250	<u>14,6</u> 262	<u>22,6</u> 125
3	То же С добавкой карбонатного шлама С-3	10 0,5	<u>8,5</u> 212	<u>12,0</u> 214	<u>23,4</u> 130
4	То же С добавкой гранитной каменной муки С-3	5 0,5	<u>14,9</u> 374	<u>21,3</u> 380	<u>29,0</u> 161
5	То же С добавкой гранитной каменной муки С-3	10 0,5	<u>20,4</u> 510	<u>26,2</u> 467	<u>27,4</u> 152
6	То же С добавкой карбонатного шлама С добавкой гранитной каменной муки С-3	5 5 0,5	<u>16,4</u> 410	<u>20,2</u> 360	<u>25,0</u> 139

Примечание: в таблице над чертой – прочность, МПа, под чертой – прочность, %, по сравнению с контрольными образцами.

В то же время, задаваясь определенной формой, размерами и объемным содержанием частиц в системе, расчеты позволяют анализировать характер изменения расстояний между элементами системы. Подобные расчеты показывают что при увеличении доли песка в составе цементно-песчаного раствора например, от Ц/П=0,5 до Ц/П=0,25 расстояние между зернами песка сокращаются от 10-13 мкм до 2-3 мкм в то время как расстояния между частицами цемента и тонкодисперсного наполнителя могут изменяться от 5-7 мкм до 10-12 мкм, что позволяет этом размещать в цементной матрице дополнительное количество микронаполнителя.

Несмотря на то, что до настоящего времени не сформированы многие принципы и законы структурообразования неупорядоченных систем, структурная топология на уровне моделирования с определенными допущениями (форма частиц, характер распределения по размерам, однородность структуры и др.) позволяет анализировать возможный характер изменения свойств твердеющей системы и с учетом расчета параметров структуры оценивать возможность протекания химических процессов образования гидратов, формирования экранирующих фазово-выраженных гидратных пленок на частицах вяжущего, образования структур срастания и прорастания и, в целом, характер изменения прочности и основных свойств цементных материалов.

Литература

1. Ратинов В.Б. Добавки в бетон. [Текст]/В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. М.: Стройиздат, 1989.
2. Тейлор Х.Ф. Химия цементов. М.: Мир, 1996.
3. Тараканов О.В. Бетоны с модифицированными добавками на основе вторичного сырья. Пенза: ПГУАС, 2004.

* Олег Вячеславович Тараканов, г. Пенза

Тел. раб.: +7(8412)494847; эл. почта: zigk@pguas.ru

Теплофизические испытания фрагмента кладки стены из газобетонных блоков марки по плотности D400

*К.т.н., научный руководитель В.А. Пинскер,
к.т.н., директор В.П. Вылегжанин,*

Центр ячеистых бетонов;

начальник отдела технического развития Г.И. Гринфельд,
ООО «АЭРОК СПб»*

Большинство газобетонных заводов, построенных в последние 5 лет, имеют возможность выпускать пазогребневые блоки [1], выполненные из автоклавного газобетона, имеющие с одной торцевой стороны гребни, с другой – пазы (рис. 1). При кладке стен из таких блоков торцевые пазогребневые соединения (вертикальные швы) выполняются без заполнения клеем. Применение таких блоков и кладки из них без заполнения вертикальных пазогребневых швов не рассматриваются в Российских нормативных документах по проектированию из-за отсутствия достоверных экспериментальных данных о характере распределения температур в таких швах и влияния их на термическое сопротивление кладки.

Чтобы заполнить этот пробел в нормативных документах, по заказу «АЭРОК СПб» Центром ячеистых бетонов была разработана программа теплофизических испытаний, основанная на [2, 3] и осуществленная испытательным центром ОАО «СПбЗНИИПИ»

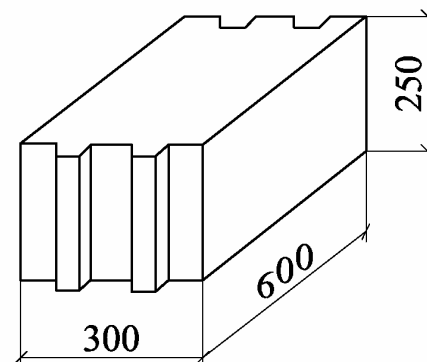


Рисунок 1. Эскиз пазогребневой структуры блока

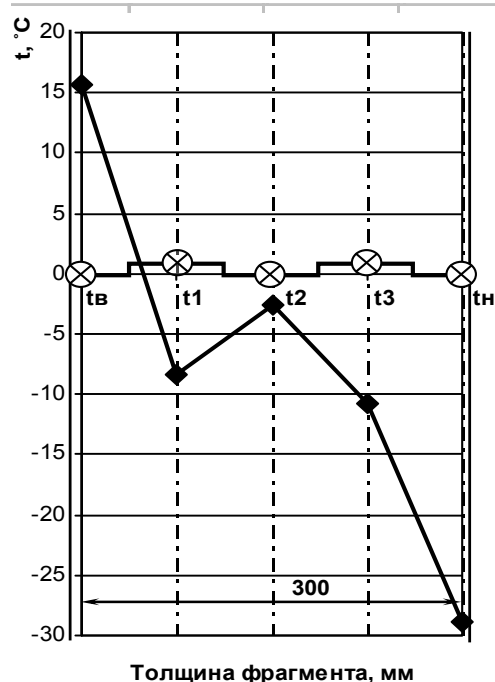
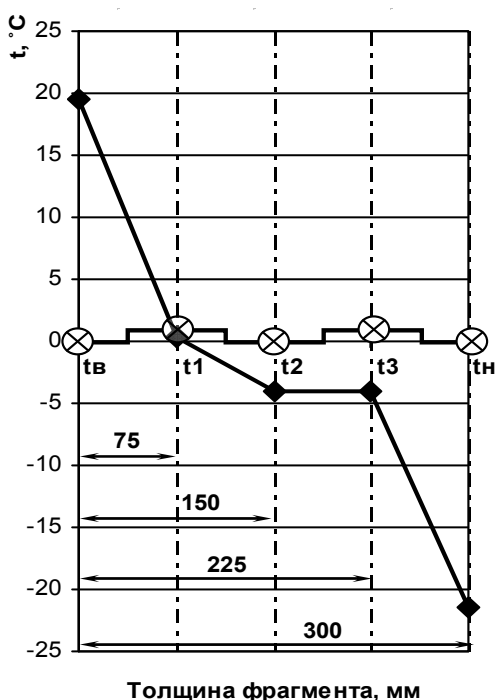
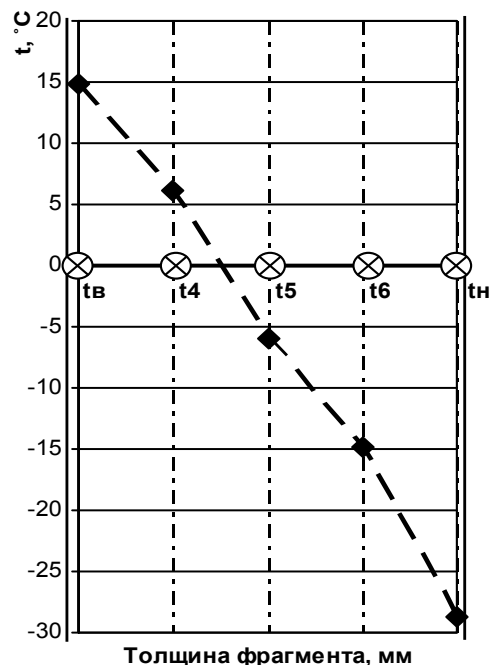
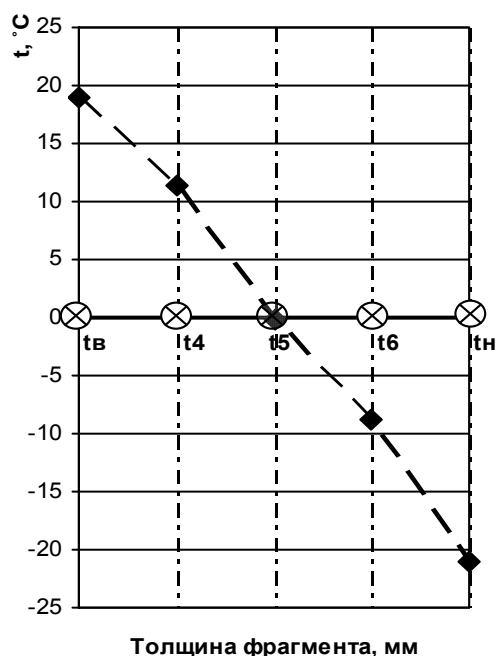


Рисунок 2. Фрагмент стены из пазогребневых блоков при проведении теплофизических испытаний

Были проведены испытания фрагментов кладки, выполненные из пазогребневых блоков марки по плотности D400 размером 300*250*625 мм. Вертикальные швы кладки клеем не заполнялись, горизонтальные швы выполнены на клею. Размер фрагмента - высота 1600 мм, длина 2300 мм. Испытывали фрагмент в вертикальном положении, тепловой поток имел горизонтальное направление. Зона воздействия отрицательных температур определяется площадью размером 1000*1000 мм, расположенной в центре фрагмента. Отрицательные температуры создавались в климатической камере TBV-1000 с полезным объемом 1,0 м³. Холодное и теплое отделения климатической камеры оснащены контрольно-управляющей связью ПК. В теплом отделении установлено оборудование для поддержания заданных температур и передачи текущих температур и передачи текущих температурных характеристик. При проведении испытаний измерялись тепловые потоки с помощью тепломеров ИТП-МГЧ «Поток» и температуры как на поверхности кладки, так и внутри нее с помощью термопар. Термопары размещались на поверхности теплового и холодного отделения на вертикальных и горизонтальных швах и в центре на поверхности блока (рис. 2). По толщине термопары располагались в вертикальном шве, пазах и посередине сечения на расстояниях от теплой поверхности фрагмента 75, 150, 225 мм (рис. 3). На таком же расстоянии от теплой поверхности фрагмента размещались термопары по толщине кладки в массиве блока. Время испытания определялось из расчета тепловой инерции кладки и составило 7 суток.

На первом этапе испытания поверхность фрагмента кладки была без штукатурки, на втором этапе с целью выявления влияния штукатурки на теплофизические характеристики кладки, поверхность фрагмента оштукатуривалась с обеих сторон.

На рис. 3 приведены кривые, характеризующие изменение температуры по толщине в кладке фрагмента в зоне вертикального пазогребневого шва и в массиве блока. На рис. 3а приведены показатели температуры для фрагмента без штукатурки, на рис. 3б – для фрагмента, оштукатуренного с двух сторон.



а) Кладка без штукатурки

б) Кладка оштукатурена с двух сторон

— кривая изменения температуры в пазогребневом шве
 --- кривая изменения температуры в массиве
 tв, t1, t2, t3, t4, t5, t6, tн - расположение термодатчиков по толщине кладки

Рисунок 3. Распределение температуры по толщине кладки фрагмента стены из пазогребневых блоков D400 (вертикальный пазогребневый шов без клея)

Из приведенных данных следует, что в пазогребневых швах в зонах паз-гребень t_1 , t_2 , t_3 , в процессе испытания температура была близка к нулевой или отрицательной и достигал положительных показателей на участке 0–50 мм. Причем на характер изменения кривой не влияет оштукатуривание поверхности фрагмента. В то же время характер изменения температуры в массиве по толщине фрагмента носит прямопропорциональную зависимость. Оштукатуривание поверхности фрагмента практически не влияет на характер их изменения.

Расчет сопротивления теплопередаче кладки R_0 исходя из температур холодной и теплой поверхности фрагмента и замеренного теплового потока, показал, что величины R_0 в зонах шва и массива мало отличаются друг от друга (на 1-2 %) и составляет для фрагмента без штукатурки $R_0=3,10 \text{ м}^2\cdot\text{°C/Вт}$, у оштукатуренного фрагмента $R_{\text{ош}}=3,72 \text{ м}^2\cdot\text{°C/Вт}$ (весовая влажность газобетона в блоках на период испытания составляла 4 %).

Выводы

2. Отрицательные температуры в шве паз-гребень без клея могут привести к конденсации паров и как следствие к увеличению влажности газобетона в его зоне, что в холодный период года может вызвать промерзание стены.
3. Увеличение влажности газобетона в зоне пазогребневого шва может снизить термическое сопротивление газобетонной кладки.
4. Для оценки изменения влажности газобетона в шве паз-гребень требуются более длительные теплофизические испытания на натурных объектах при обеспечении расчетных параметров внутреннего воздуха помещений.

Литература

1. ТУ 5741-001-15224739-2005 Блоки из ячеистого бетона стеновые мелкие.
2. ГОСТ 26254-84 Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.
3. СТО 501-52-01-2007 Проектирование и возведение ограждающих конструкций жилых и общественных зданий с применением ячеистых бетонов в Российской Федерации.

**Глеб Иосифович Гринфельд, Санкт-Петербург*

Тел. раб.: +7(812)640-33-40; эл. почта: gleb.grinfeld@aeroc.ru

Лабораторные и натурные исследования долговечности (эксплуатационного срока службы) стенной конструкции из автоклавного газобетона с облицовочным слоем из силикатного кирпича

*К.ф.-м.н., зам. генерального директора по науке М.В. Кнатько,
ОАО «СПбЗНИИПИ» (ранее ЛенЗНИИЭП);
к.т.н., докторант А.С. Горшков*,
ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;
к.ф.-м.н., профессор П.П. Рымкевич,
Военная инженерно-космическая академия им. А.Ф. Можайского*

Под долговечностью наружных ограждающих конструкций следует понимать срок их службы с сохранением в требуемых пределах эксплуатационных характеристик в данных климатических условиях при заданном режиме эксплуатации зданий. При этом срок службы отдельных элементов и заполнений ограждающих конструкций должен быть не ниже срока службы всей конструкции.

Ограждающие конструкции зданий (стены, кровля, окна) подвергаются воздействию внешних климатических и техногенных воздействий и обеспечивают поддержание в зданиях требуемых параметров микроклимата. Очевидно, что в процессе эксплуатации вследствие негативного влияния факторов окружающей среды (знакопеременные температурные воздействия, периодические увлажнения и высушивания конструкций, воздействие агрессивных сред окружающей среды, солнечной радиации и пр.) происходит постепенная деградация (снижение) эксплуатационных характеристик ограждающих конструкций. При достижении показателей, количественно отражающих остаточный ресурс эксплуатационных характеристик ограждающих конструкций, принимаются меры по их восстановлению (в ходе текущего и капитального ремонтов), а в случае значительного износа – по сносу или реконструкции здания.

Объективная оценка долговечности стеновых ограждающих конструкций позволяет, с одной стороны, рассчитать затраты на проведение текущих и капитального ремонтов здания, и как следствие, численные значения ежегодных амортизационных отчислений, а с другой стороны, позволяет произвести оценку эффективности мероприятий, связанных с внедрением энергосберегающих технологий.

Если фактический срок службы до первого капремонта ограждающей стеновой конструкции окажется меньше периода окупаемости мероприятий, направленных на повышение ее энергоэффективности, все сэкономленные в результате уменьшения затрат энергии на отопление здания материальные средства будут потрачены на проведение его текущих и капитального ремонтов. При этом нельзя забывать, что затраты на проведение последующих ремонтов здания фактически означают те же затраты энергии: на демонтаж и утилизацию вышедших из строя конструктивных элементов здания, на производство новых материалов (добыча полезных ископаемых, доставка их на завод, переработка и т.д.), на доставку материалов к объекту строительства, на работу машин и механизмов и т.д.

Таким образом, срок службы (долговечность) ограждающих стеновых конструкций является систематическим и комплексным критерием их энергоэффективности.

В нашей стране значительный вклад в развитие учения о прогнозировании долговечности различных строительных материалов и конструкций внесли многие видные ученые [1-8]. Среди исследований последних лет следует выделить следующие работы [9-17].

Методика проведения испытаний

В настоящей работе описывается методика оценки эксплуатационного срока службы двухслойной стеновой конструкции по аттестованной во ФГУП «ВНИИФТРИ» методике выполнения измерений МВИ 23-5117-2005 [18]. Одновременные лабораторные и натурные испытания проводились в течение 4,5 лет в Испытательном Центре (руководитель Пестряков И.И.) ОАО «СПбЗНИИПИ» (ранее ЛенЗНИИЭП) под общим руководством заместителя генерального директора по науке Кнатько М.В.

Предлагаемая методика проведения испытаний на долговечность [18] базируется на интегральном механизме накопления повреждений. В основе методики лежит модель, согласно которой эксплуатационный срок службы (долговечность) испытываемой стеновой конструкции зависит от интенсивности, амплитуды и времени воздействия на конструкцию знакопеременных температурных колебаний наружного воздуха. Однако в отличие от распространенных методик оценки морозостойкости различных строительных материалов (ГОСТ 10060.0-4, ГОСТ 31359 и др.) данная методика учитывает конкретные параметры климатической

активности выбранного региона, а также более точно моделирует процессы воздействия внешних и внутренних параметров окружающей среды на материал стены. При испытании на морозостойкость материал обычно подвергается объемному замораживанию, а в процессе испытания в климатической камере – одностороннему, т.е. так же, как и в реальных условиях эксплуатации, что более объективно отражает процессы разрушения материалов в результате изменения фазового состояния накопленной ими влаги.

При воздействии отрицательных температур на внешнюю поверхность стены в различные периоды времени года с отрицательными температурами происходит постоянное перемещение по толщине стены фронта отрицательных температур. При замерзании влаги происходит ее увеличение в объеме, что может приводить к разрушению межпоровой структуры материала. В результате появляются центры концентрации напряжений в материале (микродефекты), которые при последующем попадании в них влаги и замораживании с неопределенной вероятностью могут разрастаться, а в общем случае и объединяться с другими такими же центрами. Кроме того, при одностороннем замораживании-оттаивании различные слои испытываемой стеновой конструкции неравномерно изменяются в объеме по толщине (чего при объемном замораживании практически не происходит). В результате неравномерного по толщине изменения объема материала появляются дополнительные механизмы разрушения стеновой конструкции на границе раздела фазового состояния влаги в поровом пространстве материала стены.

Описание испытываемой стеновой конструкции

Объектом исследования является стеновая конструкция, состоящая из внутреннего слоя, сложенного из газобетонных блоков автоклавного твердения марки по плотности D500 (толщиной 400 мм), облицованных снаружи силикатным одинарным пустотелым лицевым кирпичом (в полкирпича).

Слои скреплены между собой посредством гибких металлических связей (не менее 3 штук с площадью поперечного сечения связей не менее $0,5 \text{ см}^2$ на 1 м^2 поверхности стены в соответствии с требованиями СТО 501-52-01-2007). С внутренней стороны стена оштукатурена. Суммарная толщина конструкции составляет 540 мм.

Выбор испытываемой стеновой конструкции обусловлен широким применением ее в практике строительства в выбранном климатическом регионе. Схематично разрез испытываемой стеновой конструкции показан на рис. 1.

Характеристики газобетонных блоков (из паспорта изделия):

- размер изделия: $400 \times 250 \times 625 \text{ мм}$;
- проектный класс – В2;
- прочность – 3,4 МПа;
- морозостойкость – F35;
- нормируемая объемная масса – 500 кг/м^3 .

Характеристики облицовочного силикатного кирпича (в соответствии с данными, приведенными в сертификате качества):

- условное обозначение изделия СОРЛ 150/75;
- размер изделия: $250 \times 120 \times 65 \text{ мм}$;
- водопоглощение – 11,7 %;
- коэффициент теплопроводности – $0,67 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$.

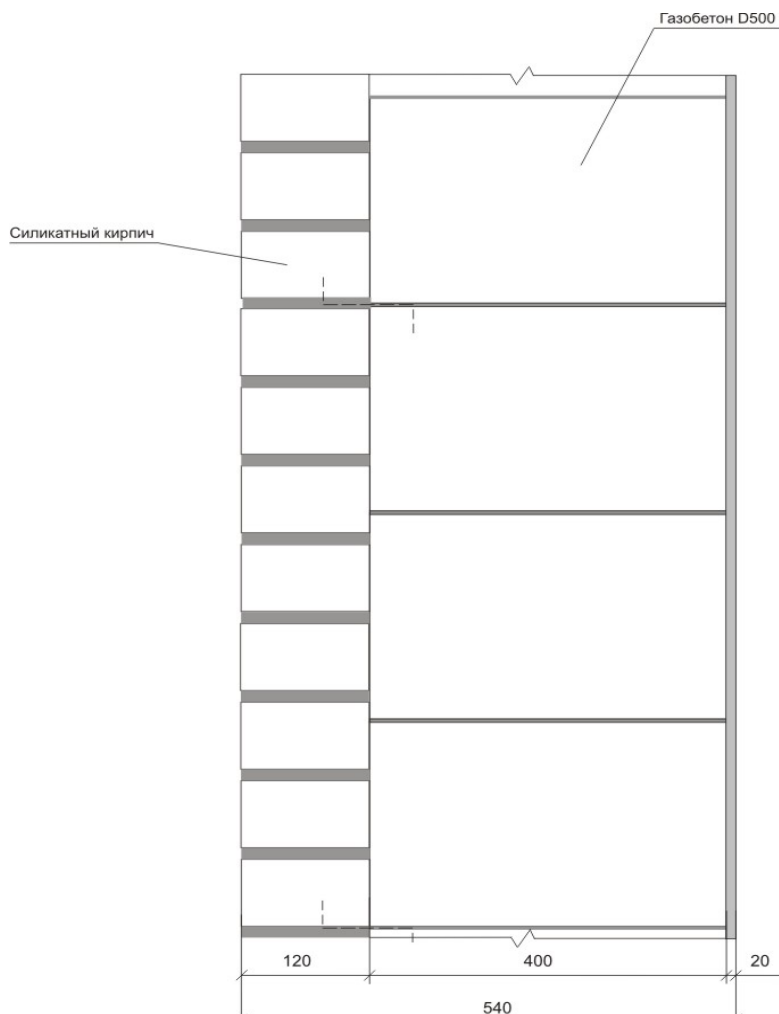


Рисунок 1. Схематическое изображение испытываемой конструкции

Условия проведения испытаний

Для повышения достоверности результатов испытаний одновременно испытываются два фрагмента стеновой конструкции: один в лабораторных условиях, другой – в натурных. С этой целью фрагмент стеновой конструкции, аналогичный испытываемому в лабораторных условиях, размещается в проеме существующего здания (фото 1). В течение всего периода проведения испытаний на натурном фрагменте в различные периоды времени года исследуются процессы распределения влажности и температуры по его толщине. Полученные на основании натурных исследований данные используются, в том числе, для корректировки лабораторных испытаний.



Фото 1



Фото 2



Фото 3

Достоверность полученных в ходе лабораторных исследований данных существенным образом зависит также от степени адекватности лабораторных условий реальным эксплуатационным воздействиям. Сложившаяся к настоящему времени практика проведения таких исследований основана на использовании климатических камер. В климатических камерах осуществляется моделирование эксплуатационных воздействий на крупноразмерные фрагменты стеновых конструкций (КФСК). Фрагменты стеновых конструкций изготавливаются в виде прямоугольных параллелепипедов (фото 2, 3), при этом их размеры (длина и ширина) в соответствии с ГОСТ 26254 не менее чем в четыре раза превышают их толщину и составляют не менее 1500×1000 мм.



Фото 4



Фото 5



Фото 6

Испытания проводятся в климатической камере (фото 4), состоящей из двух отсеков – теплого и холодного, в которых имитируются, соответственно, температурно-влажностные условия помещений квартиры и улицы в наиболее неблагоприятные с точки зрения эксплуатационных воздействий периоды года.

Для удобства работы и обработки информации климатическая камера оснащается автоматизированной системой управления (фото 4), а также компьютерной системой сбора, обработки и накопления измерительной информации (датчики температуры и влажности – фото 5).

Эксплуатационные воздействия

В «теплом» отсеке климатической камеры поддерживается температура воздуха $20 \pm 1^\circ\text{C}$ и влажность 45...60%. Климатические и техногенные воздействия в «холодном» отсеке камеры моделируются в лабораторных условиях путем проведения следующих видов испытаний:

- попеременное дождевание-высушивание, в том числе в агрессивной среде, характерной для воздушной среды Санкт-Петербурга;

Княтько М.В., Горшков А.С., Рымкевич П.П. Лабораторные и натурные исследования долговечности (эксплуатационного срока службы) стеновой конструкции из автоклавного газобетона с облицовочным слоем из силикатного кирпича

- попеременное охлаждение-нагревание, моделирующее влияние на строительные конструкции суточных и сезонных колебаний температуры воздуха в кратковременные периоды времен года – заморозков в осенний период и оттепелей в весенне-зимний период;
- глубокое замораживание-оттаивание, моделирующее влияние на строительные конструкции самых низких отрицательных температур окружающего воздуха, характерных для выбранного региона строительства (в данном случае – для климатических условий Северо-Запада).

Для составления программы испытаний стеновой конструкции на долговечность были использованы результаты обработки метеорологических данных климатической активности в Санкт-Петербурге за последние 15 лет, собранные в Главной Геофизической Обсерватории им. А.И. Воейкова.

Параметры дождевания испытываемой стеновой конструкции были рассчитаны на основании сбора информации об объемах осадков, выпадающих в течение двух месяцев, предшествующих началу заморозков. С учетом данных об объемах осадков и средней скорости ветра за рассматриваемый период времени была вычислена доля осадков, которые увлажняют во время прохождения дождей вертикальные поверхности стен. Полученные таким образом данные были использованы впоследствии для расчета производительности дождевальной установки (фото 6).

В состав воды для дождевания добавляются химические вещества. Состав и концентрация добавок в водный раствор соответствуют их количественным и качественным показателям в дождевой влаге рассматриваемого района строительства. Состав для дождевания готовится из смеси дистиллированной воды и соответствующих агрессивных веществ, оказывающих разрушающее действие на материалы испытываемой стеновой конструкции.

Контролируемые параметры

Эксплуатационными (контролируемыми в процессе проведения испытаний) параметрами испытываемой стеновой конструкции являются основные факторы, обеспечивающие безопасность и комфортные условия проживания, а именно

1. Прочность. В процессе проведения циклических испытаний прочность определяется отдельно для каждого слоя стеновой конструкции с использованием неразрушающих методов контроля (метода ударного импульса (фото 1, 2) для облицовочного слоя из силикатного кирпича, метода вырывания анкерного устройства (фото 7) для газобетонной части стеновой конструкции), и кроме того, малоформатные фрагменты стеновой конструкции испытываются на прессе до разрушения.
2. Сопротивление теплопередаче. Сопротивление теплопередаче определяется после каждого цикла испытаний, соответствующего определенному периоду эксплуатации испытываемой конструкции.



Фото 7

Обработку результатов измерений выполняют после проведения соответствующих циклов испытаний образцов, вычисляя значение контролируемого параметра как среднее арифметическое результатов для всех образцов с точностью до одного знака после запятой, и границы его доверительного интервала при надежности 0,95.

Для оценки достоверности полученных результатов используются методы статистической обработки результатов испытаний. Достоверность разницы между средними арифметическими значениями какого-либо контролируемого параметра, измеренного методами неразрушающего контроля после проведения заданного количества циклических климатических и техногенных воздействий, подсчитывается по следующей эмпирической формуле (с поправкой на малое число измерений):

$$\frac{M_1 - M_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}} \geq 3 + \frac{6}{n-4}, \quad (1)$$

где M_1 и M_2 – средние арифметические значения контролируемого параметра, например, прочности, измеренной с помощью приборов неразрушающего контроля, до (M_1) и после (M_2) заданного количества циклов воздействий;

m_1 и m_2 – средние ошибки средних арифметических M_1 и M_2 соответственно;

n – число наблюдений (при различном числе наблюдений в формулу подставляют меньшее значение);

$6/(n-4)$ – поправка на малое число наблюдений.

Численные значения эксплуатационных параметров (прочности, сопротивления теплопередаче) определяются до начала проведения испытаний, а также после заданного количества циклических климатических воздействий, соответствующих определенному количеству лет эксплуатации испытываемой стеновой конструкции. Параметры соответствия моделируемых климатических воздействий и заданного срока эксплуатации испытываемой конструкции (например, соответствующего одному году эксплуатации) приведены в МВИ 23-5117-2005 [18]. Испытания проводятся до тех пор, пока достоверность изменения контролируемого параметра во времени не достигнет заданного уровня, достаточного для объективной оценки эксплуатационного срока службы конструкции. После обработки результатов испытаний строится регрессионная зависимость, характеризующая степень снижения контролируемого параметра в зависимости от заданного количества циклов испытаний, т.е. от времени эксплуатации.

При построении регрессионной модели были использованы следующие виды функциональных зависимостей:

- линейная;
- степенная;
- экспоненциальная;
- полиномиальная 3-й степени;
- логарифмическая.

В качестве критерия при окончательном выборе регрессионной зависимости с целью последующей оценки на ее основе долговечности испытываемой стеновой конструкции был принят минимум среднеквадратического отклонения функции регрессии от фактических (измеренных в процессе проведения испытаний) эксплуатационных параметров.

При достижении численным значением эксплуатационного параметра заданного критического уровня производится оценка долговечности (эксплуатационного срока службы, например, до первого капремонта) в условных годах эксплуатации. В качестве критического уровня может быть выбрана та или иная степень снижения несущей способности стеновой конструкции или уменьшения сопротивления теплопередаче до допустимого нормами уровня (минимально допустимого для заданного климатического района – $1.94 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$).

Результаты испытаний

Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	Испытываемая конструкция (или ее часть, фрагмент)	Параметр, по которому производится оценка долговечности	Приближенная оценка эксплуатационного срока службы (до первого капремонта) стеновой конструкции, в условных годах эксплуатации (УГЭ)
1	2	3	4
1.	Стеновая конструкция (в целом)	Сопротивление теплопередаче R	> 100 лет
2.	Наружный облицовочный слой из силикатного кирпича	Прочность (методом ударного импульса)	87 лет
3.	Кладка из газобетона (часть кладки, обращенной в сторону внутреннего помещения) $\approx \frac{2}{3}$ толщины	Прочность методом вырывания анкерного устройства	> 100 лет
4.	Кладка из газобетона (часть кладки в месте примыкания ее к наружному облицовочному слою) $\approx \frac{1}{3}$ толщины	Прочность (методом вырывания анкерного устройства)	60 лет
5.	Стеновая конструкция (в целом)	Прочность (при испытаниях фрагментов стены на прессе)	Достоверность результатов недостаточна для оценки долговечности с требуемой надежностью

Обсуждение результатов испытаний

Испытания показали, что кладка из газобетонных блоков разрушается неравномерно (см. рис. 2 и данные таблицы 1): внутренняя ее часть ($\approx 2/3$ толщины) подвергается разрушению менее интенсивно по сравнению с ее наружной частью ($\approx 1/3$ толщины), которая примыкает непосредственно к наружному облицовочному слою. Более интенсивное разрушение наружной части кладки из газобетона происходит вследствие накопления повышенного содержания влаги на этом участке стеновой конструкции в зимний период эксплуатации (до 16 % по массе). В результате совместного воздействия влаги и знакопеременных температур наружная часть стеновой конструкции разрушается более интенсивно. Накопление влаги связано с различием коэффициентов паропроницаемости газобетона и силикатного кирпича. Примыкание силикатного кирпича к кладке из газобетона создает дополнительный барьер на пути движения водяного пара в результате его диффузии из помещений наружу. При этом влажность внутренних слоев газобетона не превышает 3-4%. Средняя, равновесная по толщине газобетонной части стеновой конструкции, весовая влажность по окончании первого отопительного периода составила 12,2%, по окончании второго – 7,1%, т.е. с течением времени происходит уменьшение равновесного содержания влаги в поровом пространстве материала. Однако тенденция к более интенсивному накоплению влаги на границе раздела сред с различными коэффициентами паропроницаемости сохраняется.

Оценка эксплуатационного срока службы (долговечности)

На основании полученных результатов прогнозируемый срок службы испытанной стеновой конструкции до первого капремонта составит 60 лет (в УГЭ). Данное положение основано на следующем предполагаемом механизме разрушения стеновой конструкции, аналогичной испытываемой:

- в результате снижения прочности той части кладки из газобетона, которая примыкает к наружному облицовочному слою (см. рис. 2), еще до исчерпания окончательного ресурса наружной облицовкой из силикатного кирпича (≈ 87 лет в соответствии с результатами испытаний) может произойти отделение отдельных фрагментов облицовки от газобетонной части стены;

- в результате частичного обрушения наружного облицовочного слоя могут

возникнуть благоприятные условия для дальнейшего обрушения облицовки; кроме того, на отдельных участках стеновой конструкции уменьшится ее толщина, что приведет к снижению теплозащитных свойств данной ограждающей конструкции.

Таким образом, основным разрушающим критерием испытываемой стеновой конструкции, по которому следует в данном случае производить оценку ее эксплуатационного срока службы до первого капремонта, применительно к выбранной модели разрушения следует принять долговечность кладки из газобетона, конкретнее, той ее части, которая примыкает к наружному облицовочному слою.

При этом следует отметить, что при правильной эксплуатации, т.е. при условии ненакопления влаги в наружной части газобетонной кладки, ресурс стены из газобетонных блоков составит 100 и более лет эксплуатации.

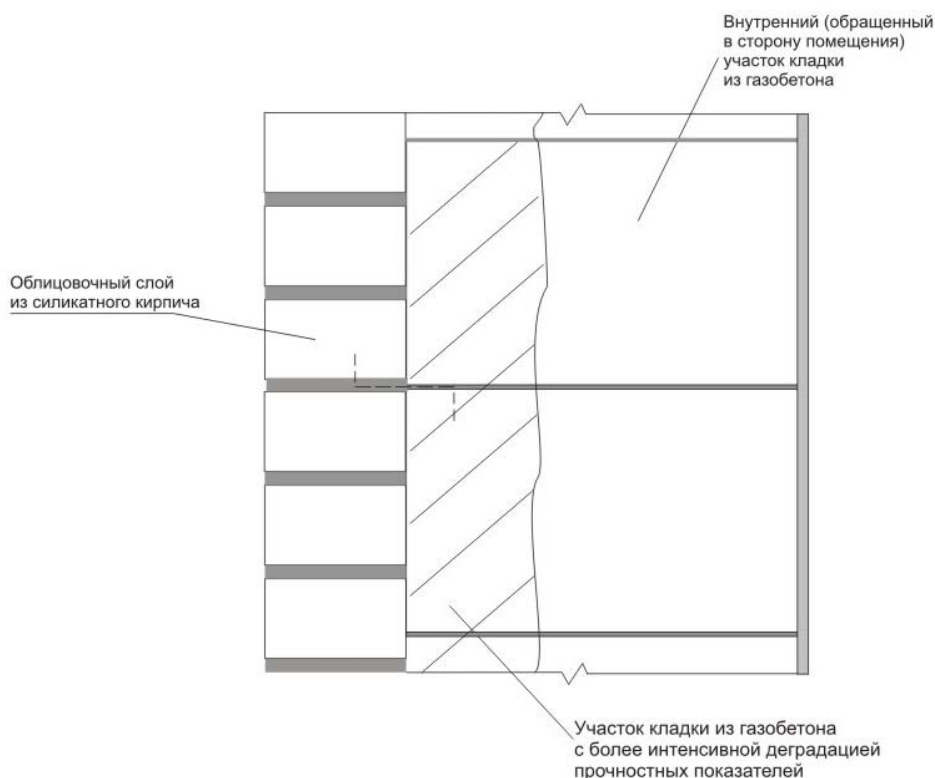


Рисунок 2. Схема разрушения испытываемой стеновой конструкции

Выводы

Эксплуатационный срок службы до первого капремонта стеновой конструкции из газобетона, облицованной снаружи силикатным кирпичом, без воздушного зазора между слоями составляет 60 лет.

Ресурс (долговечность) при правильной эксплуатации испытанной стеновой конструкции составляет более 100 лет.

Для увеличения срока службы стеновой конструкции из газобетонных блоков с кирпичной облицовкой необходимо создавать условия для эффективного удаления влаги, особенно с той ее части, которая примыкает к облицовочному слою. Для этого в процессе проектирования и возведения кладки необходимо предусматривать воздушный вентилируемый зазор между слоями кладки (20-40 мм). Кроме того, для крепления облицовочного слоя к кладке из газобетонных блоков необходимо использовать гибкие металлические связи со сроком эксплуатации не менее 50 лет.

Литература

1. Власов О.Е. и др. Долговечность ограждающих и строительных конструкций (физические основы). М.: Стройиздат, 1963. 115 с.
2. Силаенков Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
3. Колотилкин Б.М. Долговечность жилых зданий. М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. 254 с.
4. Колотилкин Б.М. Проблемы долговечности и надежности жилых зданий. М.: Изд-во «Знание», 1969. 46 с.
5. Александровский С.В. Метод прогнозирования долговечности наружных ограждающих конструкций. – В кн. Исследования по строительной теплофизике (Сб. трудов НИИСФ). М.: Госстрой СССР, 1984. С. 81-95.
6. Александровский С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций. М.: РААСН, 2004. 332 с.
7. Бобров Ю.Л. Долговечность теплоизоляционных минераловатных материалов. М.: Стройиздат, 1987. 168 с.
8. Бобров Ю.Л., Рябчиков С.Л. Инженерный метод прогнозирования долговечности минераловатных изделий в ограждающих конструкциях. М.: МИСИ, 1983. 263 с.
9. Ясин Ю.Д., Ясин В.Ю., Ли А.В. Пенополистирол. Ресурс и старение материала. Долговечность конструкций // Строит. материалы. 2002. №5. С. 33-35.
10. Лобов О.И., Ананьев А.И. Долговечность облицовочных слоев наружных стен многоэтажных зданий с повышенным уровнем теплоизоляции // Строит. материалы. 2008. №4. С. 56-59.
11. Ананьев А.А., Козлов В.В., Дуденкова Г.Я., Ананьев А.И. Долговечность лицевого кирпича и камня в наружных стенах зданий // Строит. материалы. 2007. №2. С. 56-58.
12. Ананьев А.А., Дуденкова Г.Я., Козлов В.В. Долговечность керамического кирпича и камня в наружных стенах. – Жилищное строительство. 2007. №3. С. 13-15.
13. Батрак В.Е., Бобряшов В.В., Бобряшов В.М. Метод оценки долговечности теплоизоляции при действии эксплуатационных нагрузок // Труды I Всероссийской научно-технической конференции «Строительная теплотехника: актуальные вопросы нормирования». Санкт-Петербург, 26-27 июня 2008 г. С. 76-85.
14. Батрак В.Е., Бобряшов В.В., Бобряшов В.М. Метод оценки работоспособности полимерных заполнителей трехслойных панелей при действии длительных эксплуатационных нагрузок // Кровельные и изоляционные материалы. 2009. №1. С. 57-59.
15. Инчик В.В. Влияние метеорологических факторов на долговечность зданий и сооружений Санкт-Петербурга // Труды I Всероссийской научно-технической конференции «Строительная теплотехника: актуальные вопросы нормирования». Санкт-Петербург, 26-27 июня 2008 г. С. 102-107.
16. Бессонов И.В. Фасады тонкие, но стойкие...// Строительство. 2008. №10. С. 123-125.
17. Бессонов И.В., Алехин С.В. Оценка стойкости к климатическим воздействиям фасадных систем наружного утепления с тонким штукатурным слоем // Кровельные и изоляционные материалы. 2009. №1. С. 12-15.
18. МВИ 23-5117-2005 «Ограждающие стеновые конструкции. Метод определения сопротивления климатическим воздействиям и оценка долговечности при ускоренных испытаниях». СПб.: СПбЗНИИПИ, 2006. – 29 с.

**Александр Сергеевич Горшков, Санкт-Петербург*

Тел. раб.: +7(812) 297-59-49; эл. почта: alsgor@yandex.ru

Эмпирические методы оценки несущей способности стальных тонкостенных просечно-перфорированных балок и балок со сплошной стенкой

**Магистр П.Н. Недвига,
аспирант В.А. Рыбаков*,**

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

В последние годы проблематика расчета и проектирования легких стальных тонкостенных конструкций (далее ЛСТК) становится все более актуальной. На эту тему проходят семинары и конференции, готовятся и защищаются диссертации. В Санкт-Петербургском государственном политехническом университете начиная с 2006 г. было защищено несколько магистерских работ по ЛСТК, готовятся к защите кандидатские диссертации. Но большинство этих работ имеют один существенный недостаток, точнее неполноту, - полное отсутствие экспериментальных результатов, полученных лично авторами. А, как известно, данный аспект является немаловажным, с учетом специфической сложности и наукоемкости самих тонкостенных конструкций.

Также стоит отметить, что на данную тему с 2009 года читаются лекции и проводятся практические занятия, что в ближайшем будущем может повлечь за собой введение в учебный план и лабораторных работ по ЛСТК. И этот факт также вызывает необходимость создания методики испытаний профилей.

Поэтому настоящая статья посвящена созданию методики испытаний стальных тонкостенных просечно-перфорированных балок и балок со сплошной стенкой.

Итак, целью готовящихся к проведению испытаний образцов балок является получение зависимостей между несущей способностью балок и рядом параметров. К задачам работы относятся следующие.

1. Оценка прочности тонкостенных профилей по предельным состояниям первой и второй групп, к которым отнесено: формосохранение и способность восприятия постоянных и временных нагрузок без изменения формы сечения, других конструктивных геометрических параметров; обрушение или раскол; способность выдержать следующую ступень приложения нагрузки.
2. Проверка прочности профилей при переходе на измененные параметры геометрии сечения и формы профиля: по толщинам профилей; по высоте боковой стенки профилей; наличие/отсутствие просечек на стенках профилей; наличие/отсутствие ребер жесткости.
3. Определение зависимостей, связывающих характеристики прочности балок с переменными конструктивными и технологическими параметрами.

Таблица 1. Список испытываемых образцов

№ п/п	Назначение	Тип профиля	Длина, мм	Количество, шт		Примечание
				С ребрами жесткости	Без усиления	
1	испытываемый образец	ПС 150-0,8	3000	5	5	
2	то же	ПС 150-1,5	3000	5	5	
3	то же	ПС 250-0,8	3000	5	5	
4	то же	ПС 250-1,5	3000	5	5	
5	то же	ТС 150-0,8	3000	5	5	
6	то же	ТС 150-1,5	3000	5	5	
7	то же	ТС 250-0,8	3000	5	5	
8	то же	ТС 250-1,5	3000	5	5	
9	ребра жесткости	У 50х50х1,0 шаг 0,6м.	147	120	-	К поз.1,2,5,6
10	то же	У 50х50х1,0	247	120	-	К поз.3,4,7,8

Общий расход металла: 585 кг

За основу опытной модели принимаем схему (рис. 1, 2) однопролетной шарнирно опертой балки проектной длиной не менее 3000 мм, производства ООО «БалтПрофиль», исполненной по ТУ 1121-001-13830080-2003. Данная схема часто встречается в перекрытиях, покрытиях и стропильных системах из легких стальных тонкостенных профилей (далее ЛСТК).

В основе испытаний принято положение о том, что реальная стропильная система имеет раскрепления по верхней и нижней полкам балок (обычно шаг прогонов, установленный проектным расчетом каркаса покрытия, составляет от 300 до 600 мм по собственным осям на плане кровли).

Края образца балки не должны подвергаться какой-либо обработке. Свободные деформации краевых зон должны ограничиваться закреплением, исключающим деформации сечения на концах испытываемого образца, что соответствует его работе в реальной конструкции. При этом закрепление должно соответствовать схеме шарнирно-опертой балки (см. далее), при допущении, что изгибными – стесняющими деформациями крепежных элементов можно пренебречь.

Задаваемыми в ходе экспериментов параметрами являются исключительно геометрические - высота поперечного сечения балки, толщина стенок, наличие просечек. Параметры используемых материалов остаются постоянными. Использование ребер жесткости при испытании образцов служит для достижения при испытаниях 1 предельного состояния.

Испытания проводятся в два этапа:

- 1) испытание профилей без перфорации разных типоразмеров с ребрами жесткости и без них;
- 2) испытание профилей с перфорацией для выявления соответствующих зависимостей.

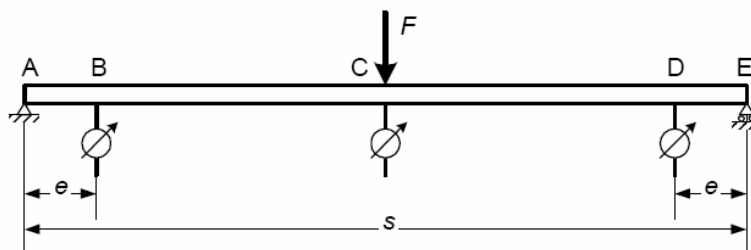


Рисунок 1. Схема испытательного стенда

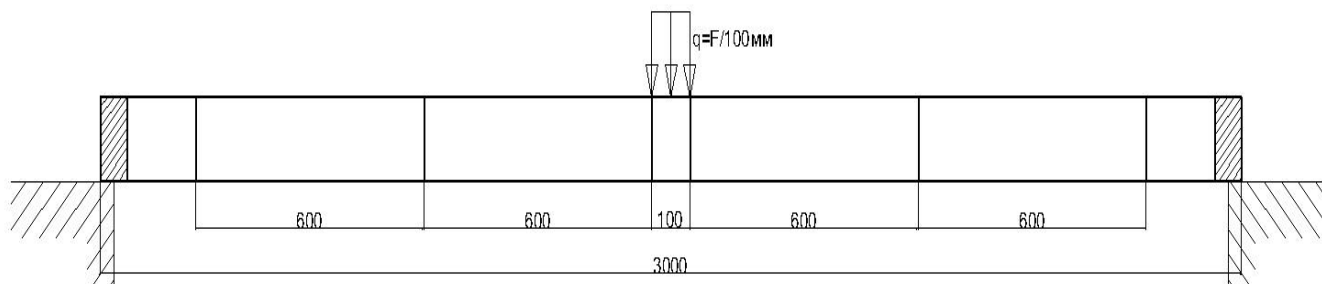


Рисунок 2. Рабочая схема нагружения и расположения ребер

На рис. 2 приведена рабочая схема нагружения (вариант с ребрами), которая образована из идеализированной схемы (рис. 1) и должна быть рассмотрена как альтернативная.

Данная схема представляет собой предельный переход от равномерно распределенной к «точечной» пролетной нагрузке, что, конечно, не является прямым эквивалентом.

Опоры A и E должны быть шарнирными и катковыми соответственно. На этих опорах поворот балки относительно продольной оси может быть исключен с помощью упоров.

Методика оценки несущей способности стальной тонкостенной балки



Рисунок 3. Испытательная машина «Инстрон»

В качестве нагружающего устройства может быть применена универсальная испытательная машина «Инстрон» (рис. 3).

Балка устанавливается на испытательном стенде, закрепляется на концах в обоймы либо с использованием жестких вставок (см. рис. 2), при необходимости устанавливаются ребра жесткости по длине балки (см. рис. 4).

Загружение образца производится ступенями, составляющими около 10% от несущей способности по предварительной оценке теоретическими методами.

На каждой стадии нагружения перемещения и деформации должны измеряться в характерных местах конструкции. Отсчеты перемещений и деформаций должны сниматься после стабилизации конструкции после приложения каждой ступени нагрузки.

Несущая способность профиля оценивается по величине точечной пролетной нагрузки по схеме рис. 1, соответствующей факту достижения предельных напряжений, относительных деформаций элементов сечения в месте приложения нагрузки, потери устойчивости верхнего (сжатого при изгибе) пояса или стенки тонкостенной балки.

Внешними признаками потери устойчивости тонкостенной балки являются образование складок, переломов по углам профиля, потеря базовых плоскостей полков и стенок, происшедшая под действием напряжений сжатия в верхнем поясе при изгибе или при выходе из плоскости изгиба под внешней нагрузкой.

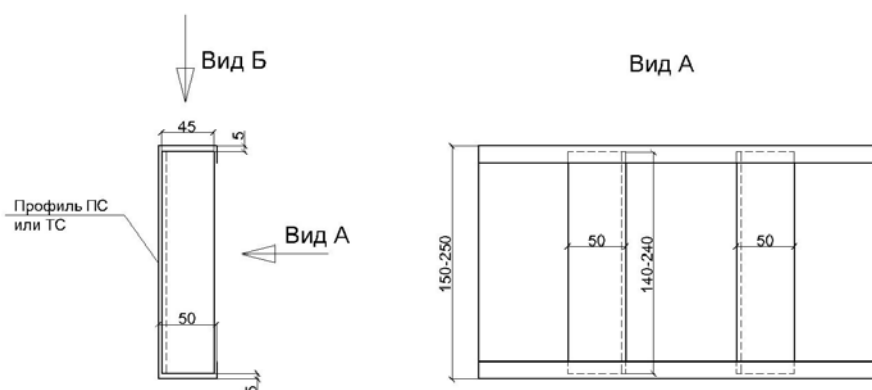


Рисунок 4. Крепление ребер жесткости в точке приложения нагрузки

Существенным признаком потери устойчивости является образование площадки на кривой нагрузки, т.е. ненарастание или снижение ее при увеличении прогиба, что одновременно сопровождается появлением любого из указанных внешних признаков.

Таким образом, измеряемая в эксперименте величина – это нагрузка, установленная по силоизмерителю, соответствующая предельному состоянию материала балки в момент потери устойчивости балки либо предела текучести.

В ходе опытов измеряется величина усилия (внешней нагрузки), затем – изгибающий момент на опоре, приводящий к потере устойчивости сжатого пояса или стенки балки.

Все остальные механические параметры, кроме модулей нормальной упругости и сдвига также устанавливаются расчетным путем.

На каждом этапе необходимо производить фотофиксацию полученных результатов испытаний и видов разрушения образца с занесением в протокол.

В заключении должно быть отражено:

- дата, время, климатические условия испытаний;
- количество образцов, поступивших на испытания;
- размеры, качественные характеристики образцов по данным и в объеме в соответствии с ТУ (п.п. 2.1);
- отметки об особенностях образцов балок, если они обнаружены;
- паспортные данные нагружающего и измерительного оборудования;
- описание особенностей процесса нагружения образцов и испытаний в целом;
- величины разрушающих нагрузок как по величине усилия «Р», так и по изгибающим моментам на опоре, указание наименьшего из двух опорных, найденных расчетом по (2) и (3), описание вида разрушения, его особенности;
- подписи ответственных исполнителей.

Оценка результатов испытаний проводится аналитическими [3] и численными [4] методами. К аналитическим относится метод, основанный на теории тонкостенных стержней, предложенной В.З. Власовым; численное моделирование производится методом КЭ в ПК SCAD Office. При этом прослеживается полная аналогия граничных условий всех трех методов (двух теоретических и эмпирического).

В ходе работы была предложена методика испытаний стальных холодногнутых тонкостенных балок с отсутствием и наличием продольных просечек и получены соответствующие зависимости. Результаты работы внедрены в проектную деятельность ООО «БалтПрофиль» и научно-исследовательскую деятельность ГОУ СПбГПУ.

Литература

1. Айрумян Э.Л.. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутого стальных оцинкованных профилей производства ООО конструкций «БалтПрофиль», М., 2004.
2. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни (прочность, устойчивость, колебания), М., 1940.
3. Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3: Общие правила. Дополнительные правила для холодногнутого элементов и листов. Русская версия.
4. ГОСТ 14918-80. Сталь тонколистовая оцинкованная с непрерывных линий.
5. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. Вычислительный комплекс SCAD. М, 2007.
6. ТУ 1121-001-1383-0080-2003. Профили стальные оцинкованные для системы каркасного строительства.

**Владимир Александрович Рыбаков, Санкт-Петербург*

Тел. раб.: +7(812)314-98-34; эл. почта: fishermanoff@mail.ru

Прочность и устойчивость упругих ортотропных и изотропных ребристых оболочек . II

К.т.н. В.М. Жгутов*,

ООО «Архитектурно-строительная компания «Китеж»

В предыдущей работе [1] были рассмотрены оболочки общего вида, находящиеся под действием механической нагрузки при определенном закреплении их контура. При этом предполагалось, что оболочки могут быть подкреплены ребрами жесткости, расставленными вдоль координатных линий (направленных по линиям кривизны) со стороны вогнутости.

В работе [1] предложена математическая модель деформирования рассматриваемых оболочек при учете геометрической нелинейности, дискретного расположения ребер, их ширины, сдвиговой и крутильной жесткости ребер, поперечных сдвигов и возможной анизотропии (ортотропности) материала, а также алгоритм исследования модели, основанный на методе Ритца и итерационных процессах [1–5].

Вычислительный эксперимент был проведен для вариантов I–IV гладких и ребристых пологих оболочек, представленных в табл. 1 работы [1]. При этом анализируемые оболочки считались закрепленными по контуру шарнирно-неподвижным способом. Все расчеты были проведены в безразмерных параметрах, описанных в [1–4], удобных для анализа и дальнейшего использования результатов расчета. Для анализируемых оболочек были построены графики «безразмерная нагрузка $\bar{P}$ – безразмерный прогиб $\bar{W}$ » и определены критические нагрузки, соответствующие потере устойчивости (при которой происходит характерное «прощелкивание» или «выпучивание» оболочки).

Были найдены также и размерные значения всех критических нагрузок, отвечающие тому или иному материалу изготовления оболочки (металлам).

Большой практический интерес представляет при этом анализ распределения прогибов и напряжений по полю оболочки, особенно в процессе изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки от некоторого «нулевого» до определенного «конечного» состояния.

Следует отметить, что подобный анализ в современных больших программных комплексах даже не декларируется.

Ниже приводятся примеры именно такого анализа с соответствующими графическими интерпретациями. Исследуется также и условие прочности рассматриваемых оболочечных конструкций.

1. Характер распределения безразмерных прогибов и интенсивностей напряжений по полю оболочки

Поля безразмерных прогибов $\bar{W}$ и безразмерных интенсивностей напряжений $\bar{\sigma}_i$

$$\left(\bar{\sigma}_i = \frac{a^2 \sigma_i}{Eh^2}, \text{ где } \sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \right)$$

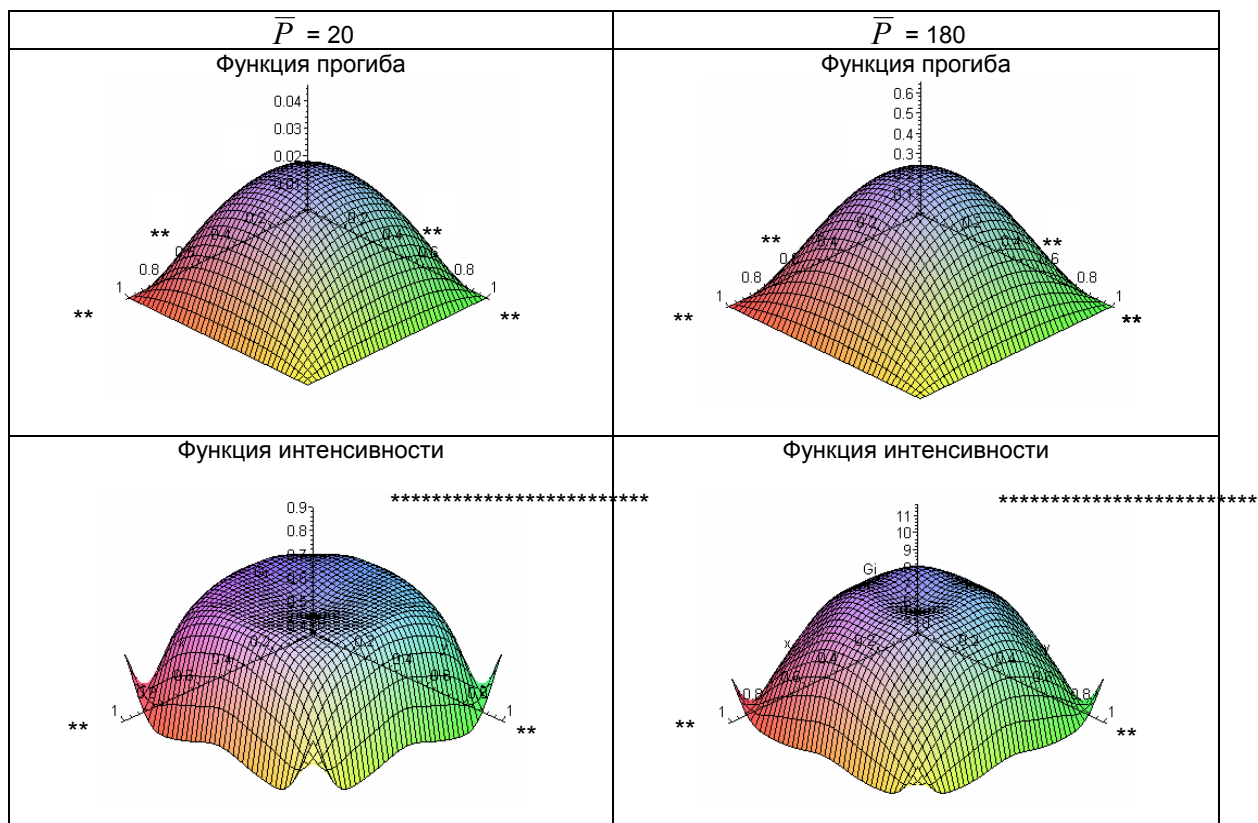
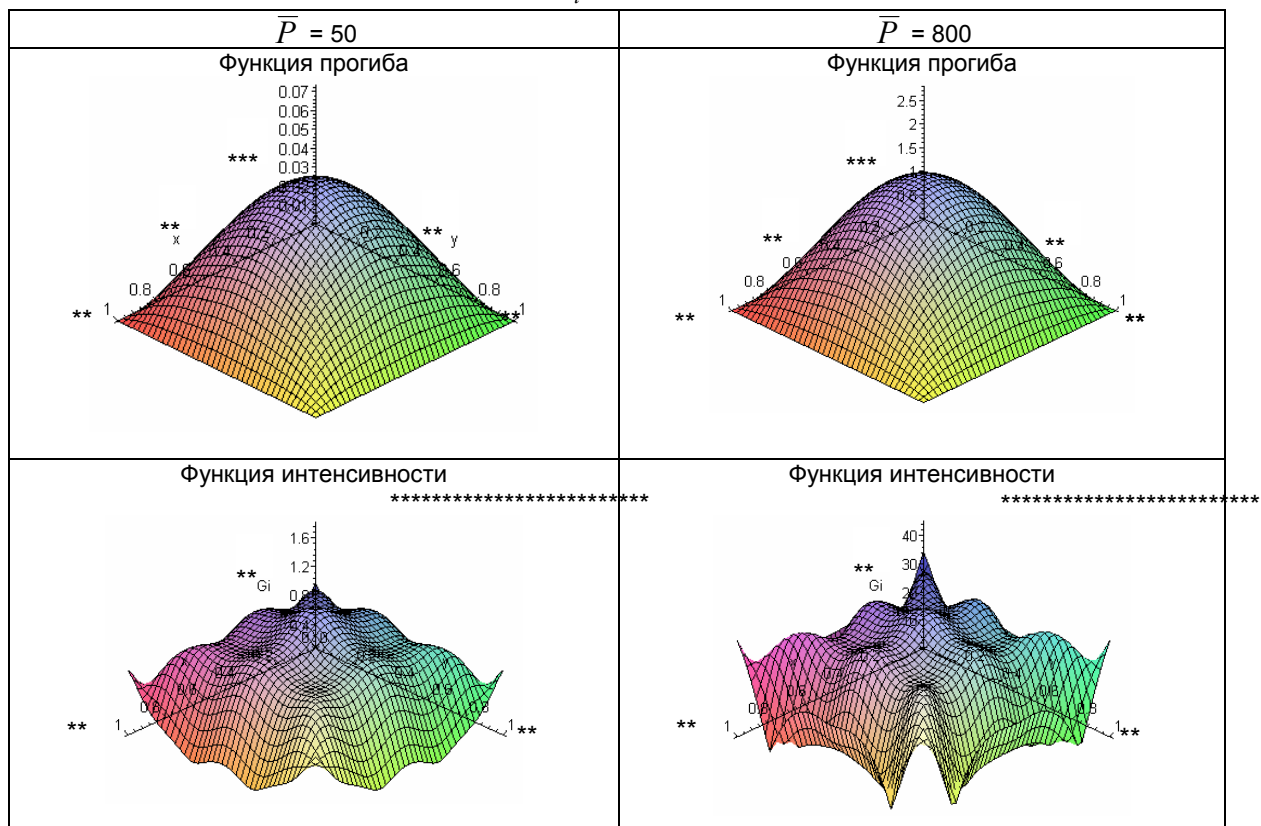
приводятся как при сравнительно небольших (начальных) нагрузках, так и при достаточно больших нагрузках (близких к критическим). Напряжения вычисляются при $z = -h/2$, поэтому $\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$.

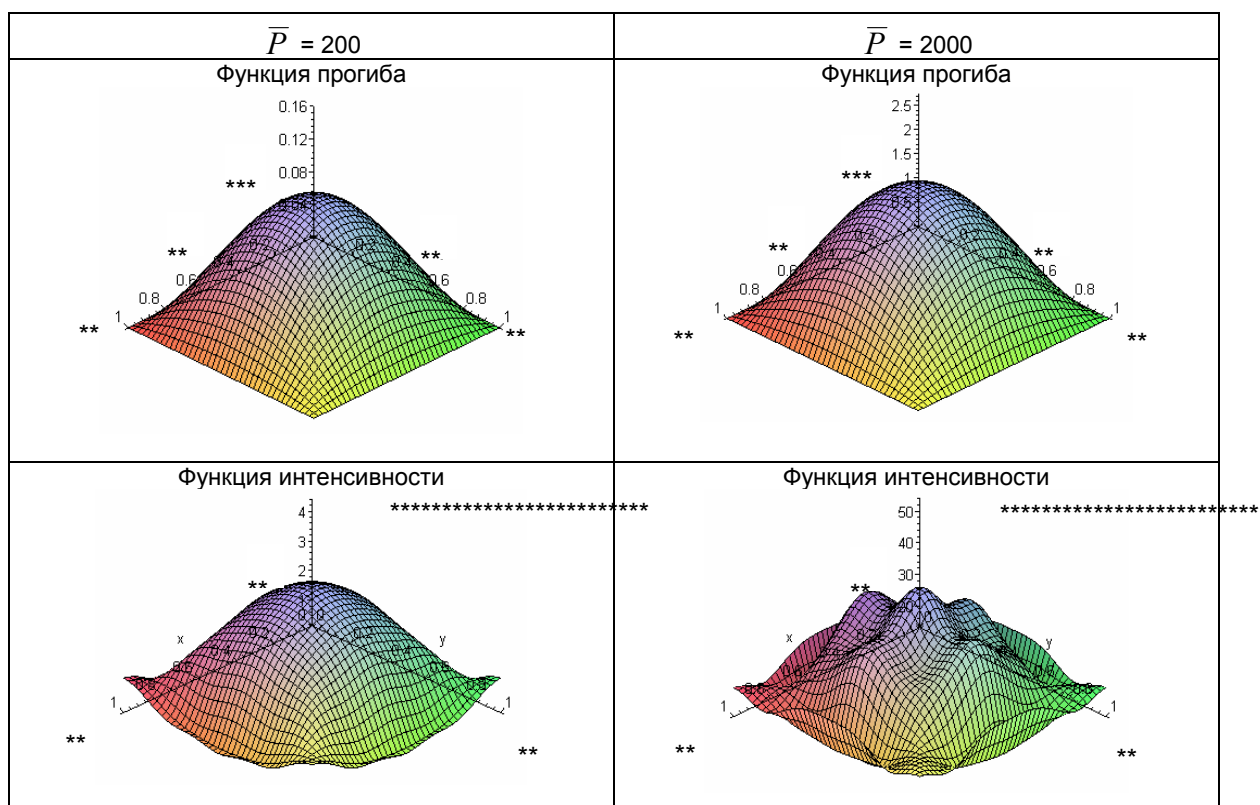
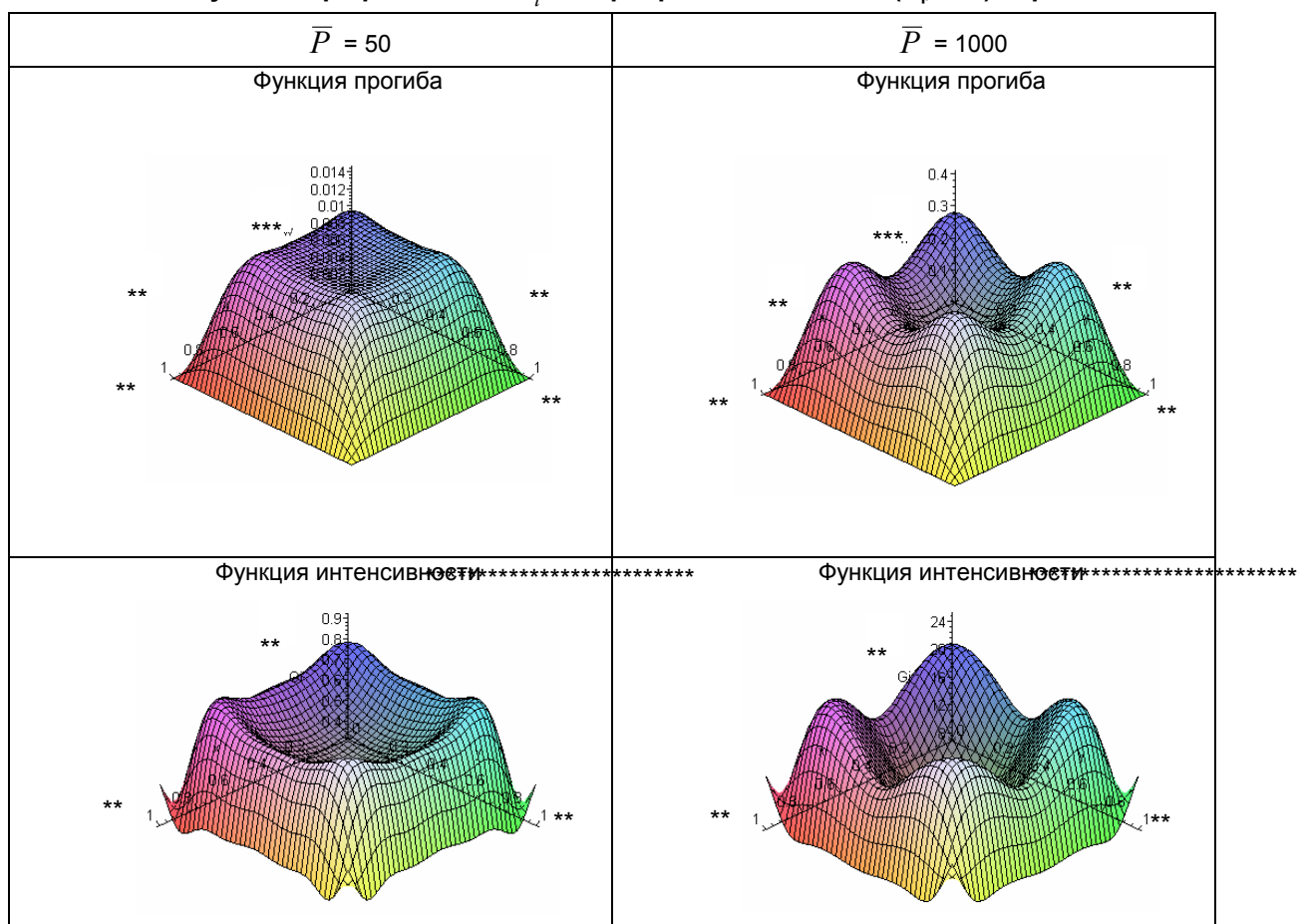
На рис. 1 – 3 для оболочки варианта I приведены графики распределения прогибов $\bar{W}$ и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для гладкой оболочки (рис. 1) и ребристых оболочек с шестью (рис. 2) и восемнадцатью (рис. 3) ребрами подкрепления.

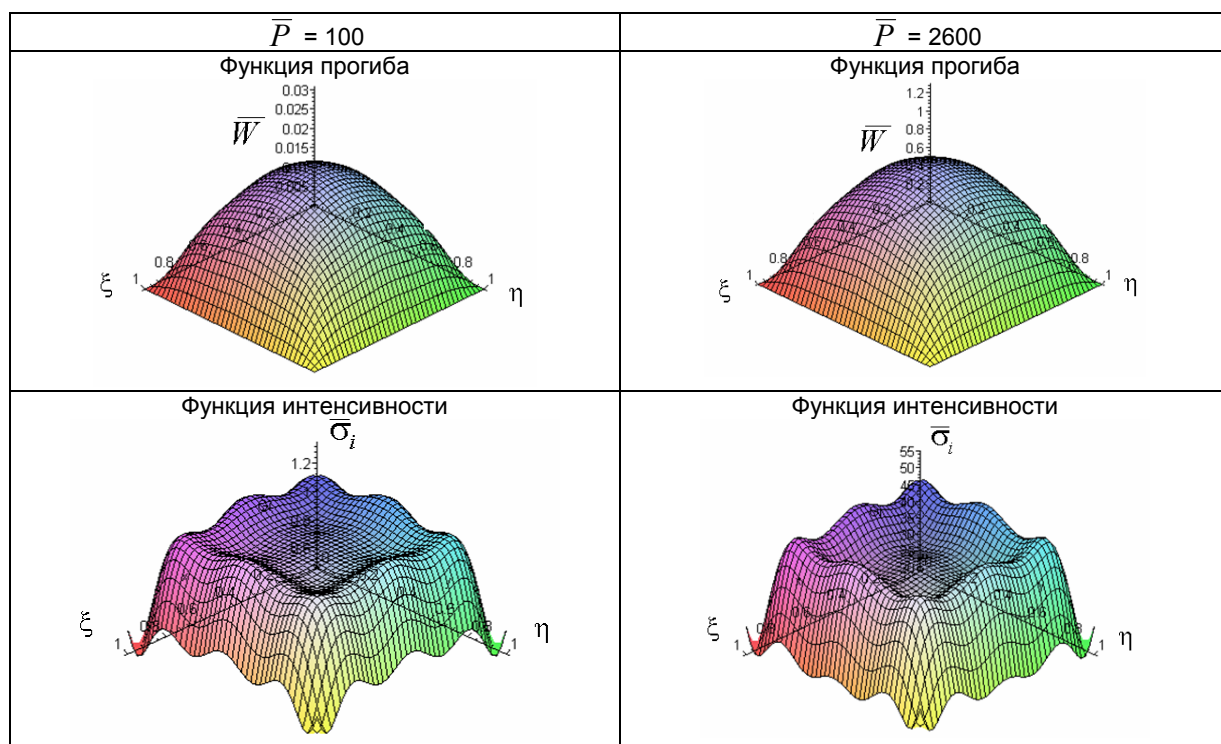
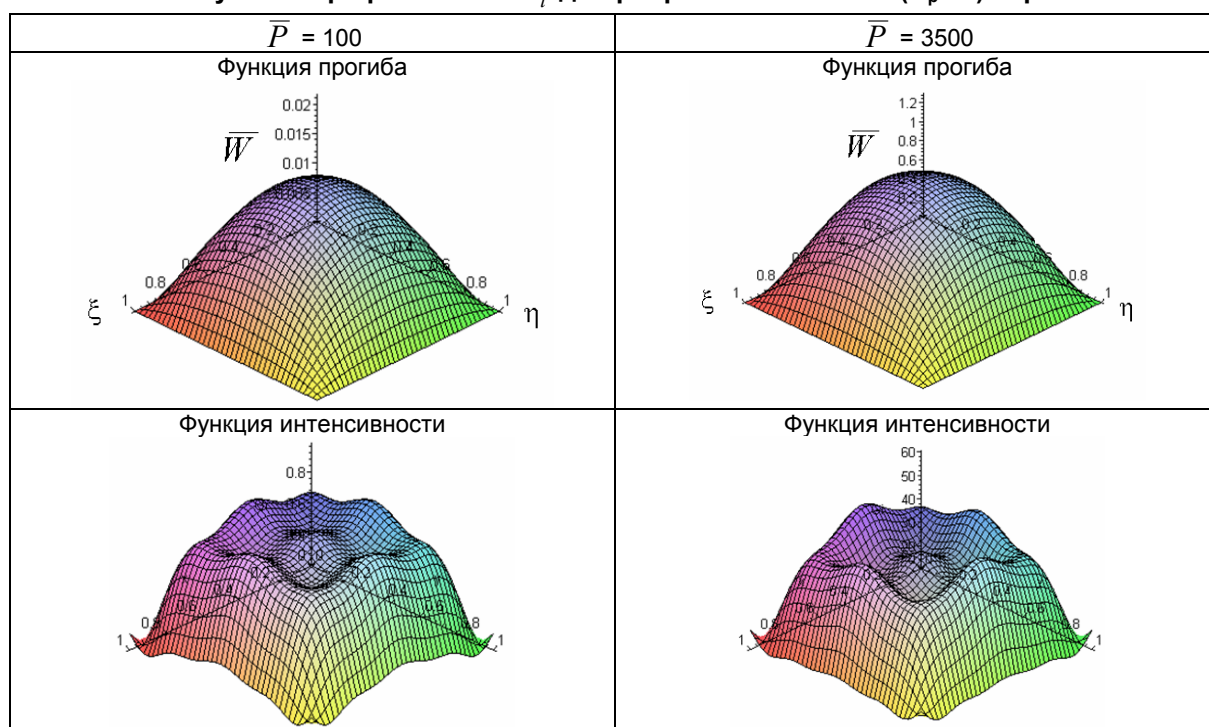
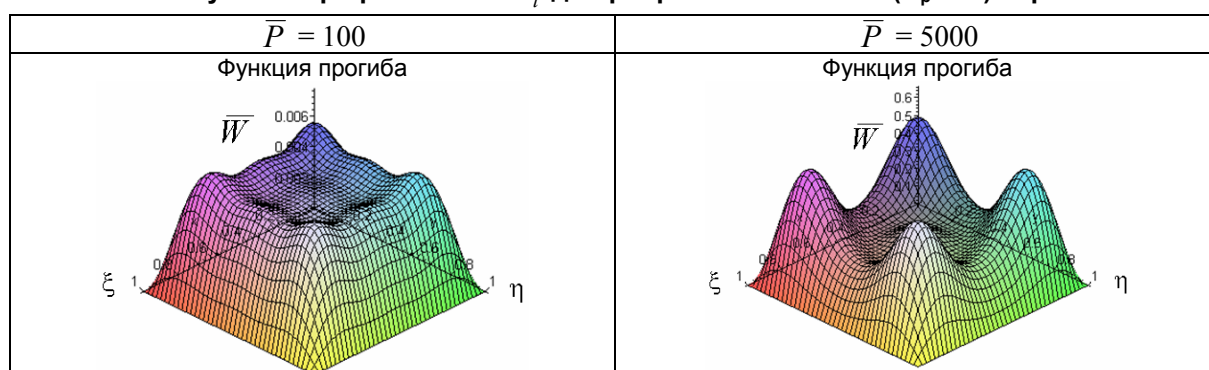
На рис. 4 – 6 представлены аналогичные графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для оболочки варианта II: для гладкой оболочки (рис. 4) и ребристых оболочек с шестью (рис. 5) и восемнадцатью (рис. 6) ребрами.

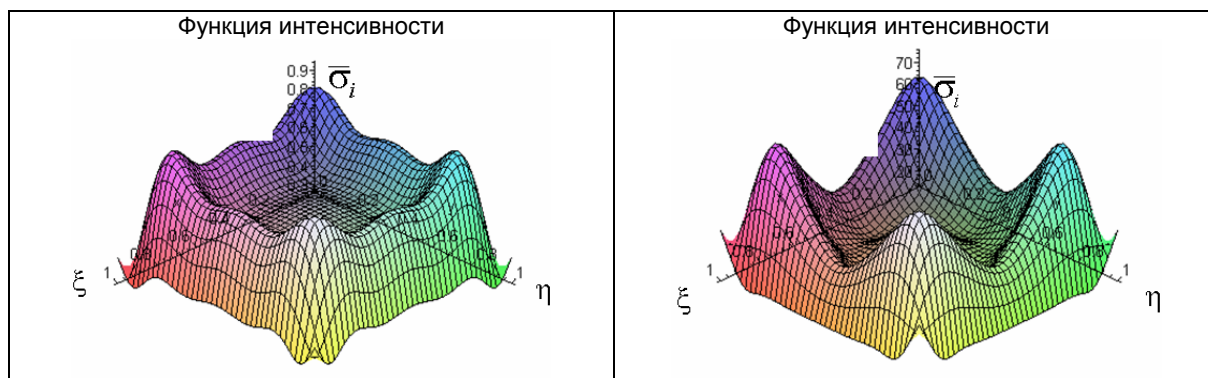
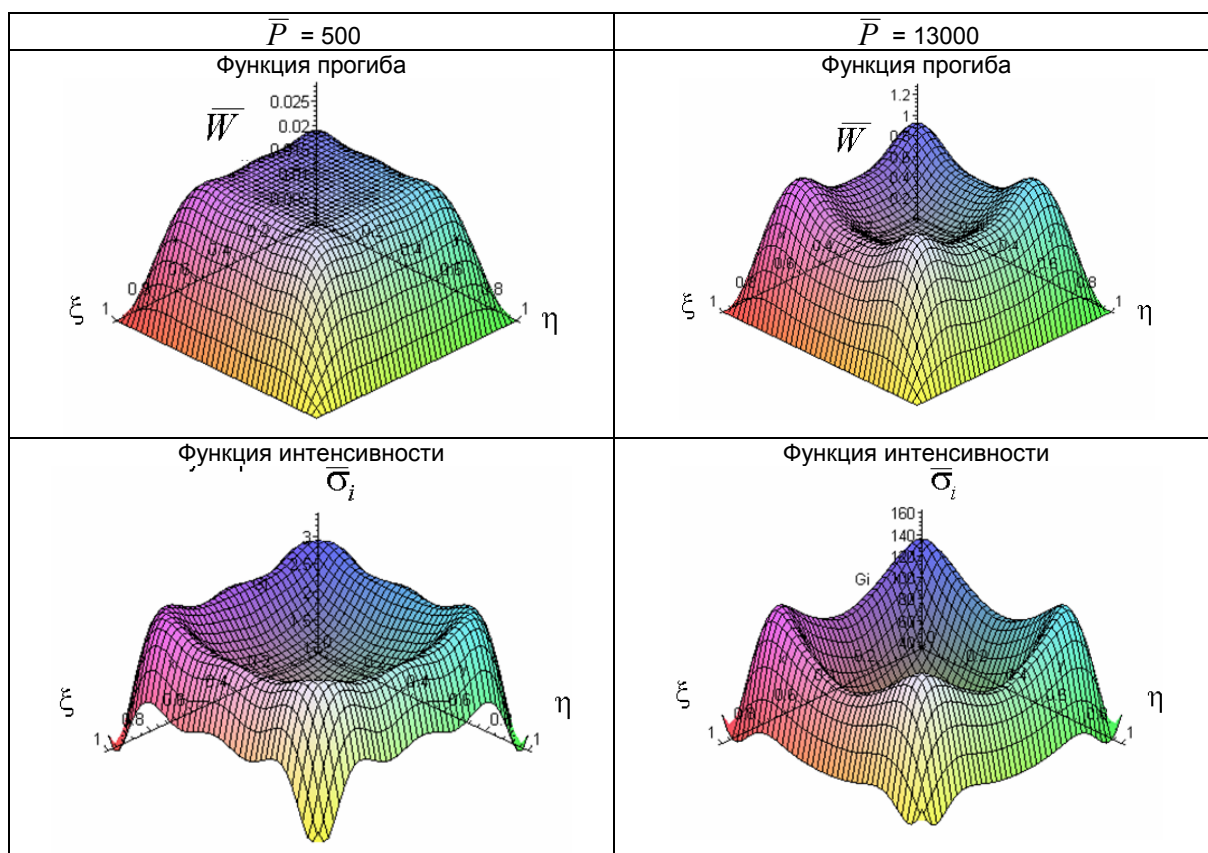
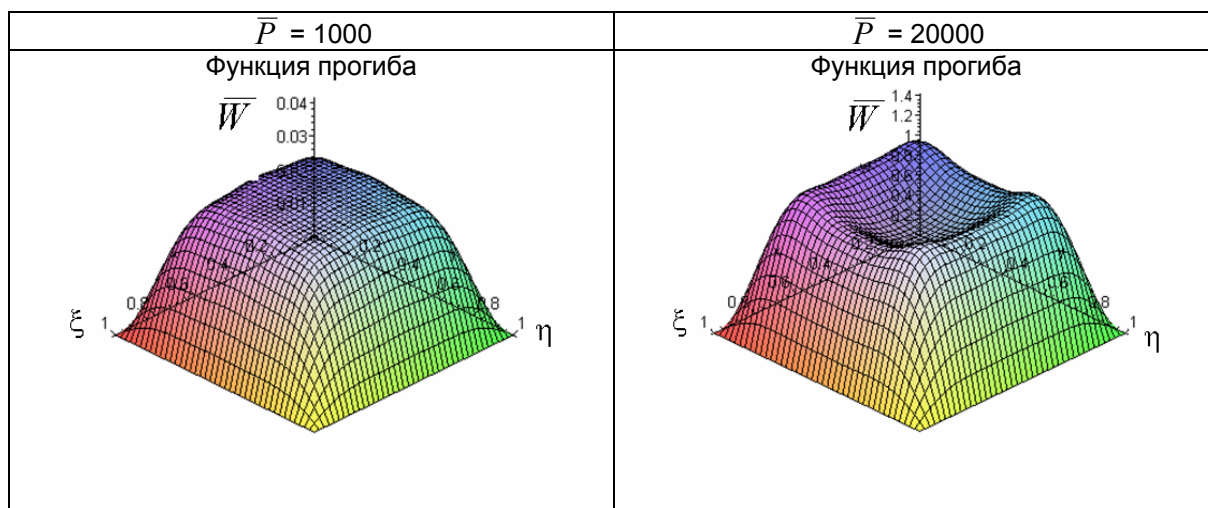
На рис. 7 – 9 изображены графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для оболочки варианта III: для гладкой оболочки (рис. 7) и ребристых оболочек с шестью (рис. 8) и восемнадцатью (рис. 9) ребрами.

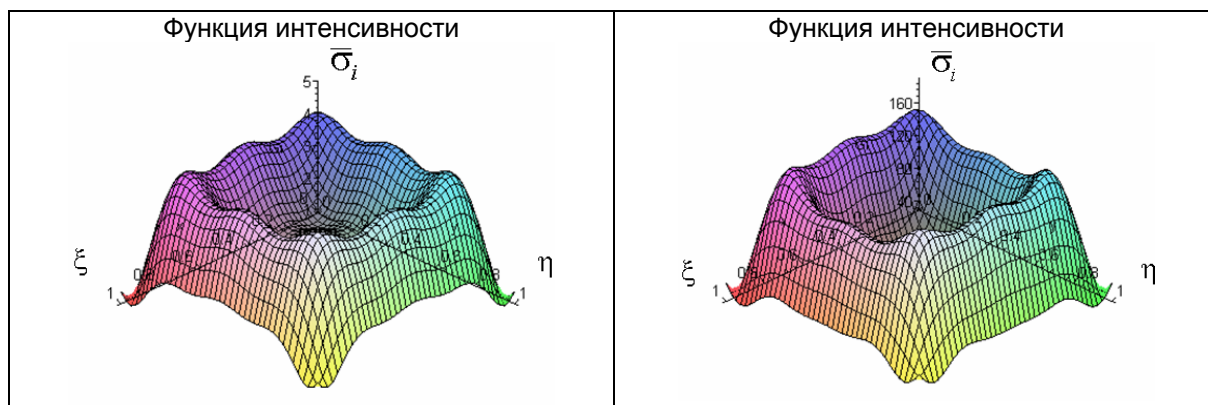
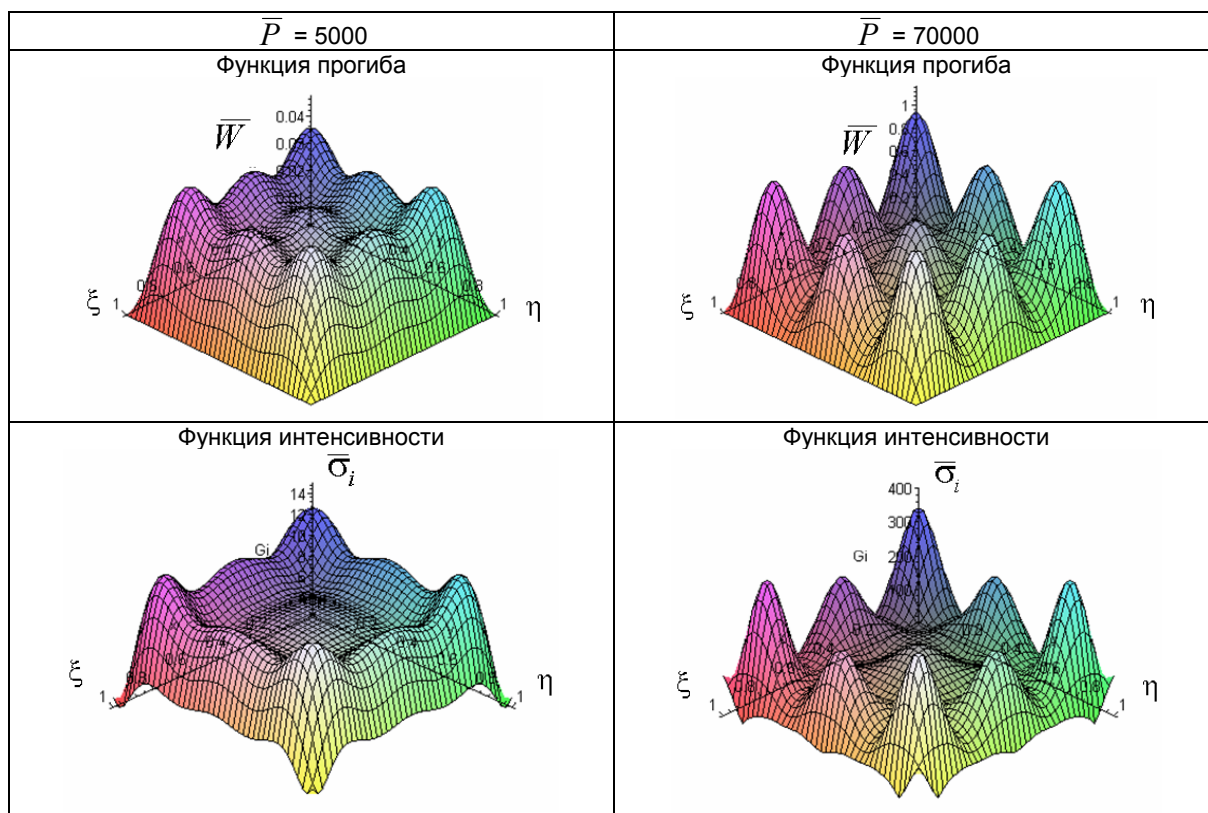
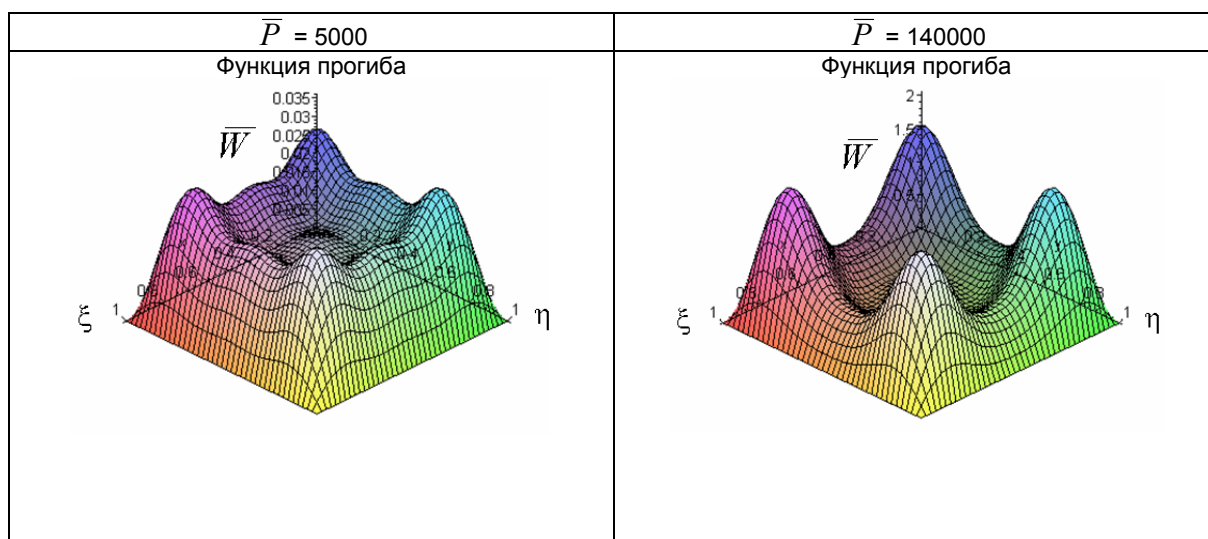
На рис. 10–12 даны графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для оболочки варианта IV: для гладкой оболочки (рис. 10) и ребристых оболочек с шестью (рис. 11) и восемнадцатью (рис. 12) ребрами.

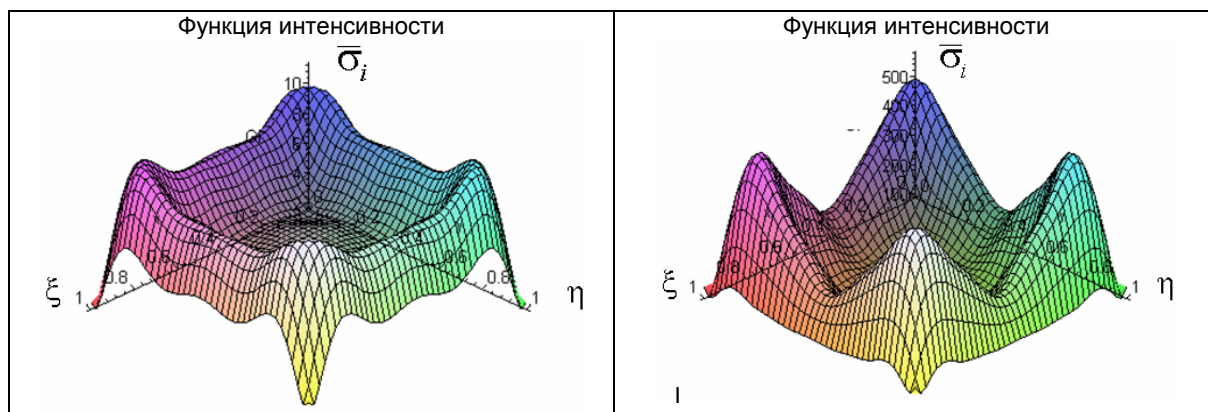
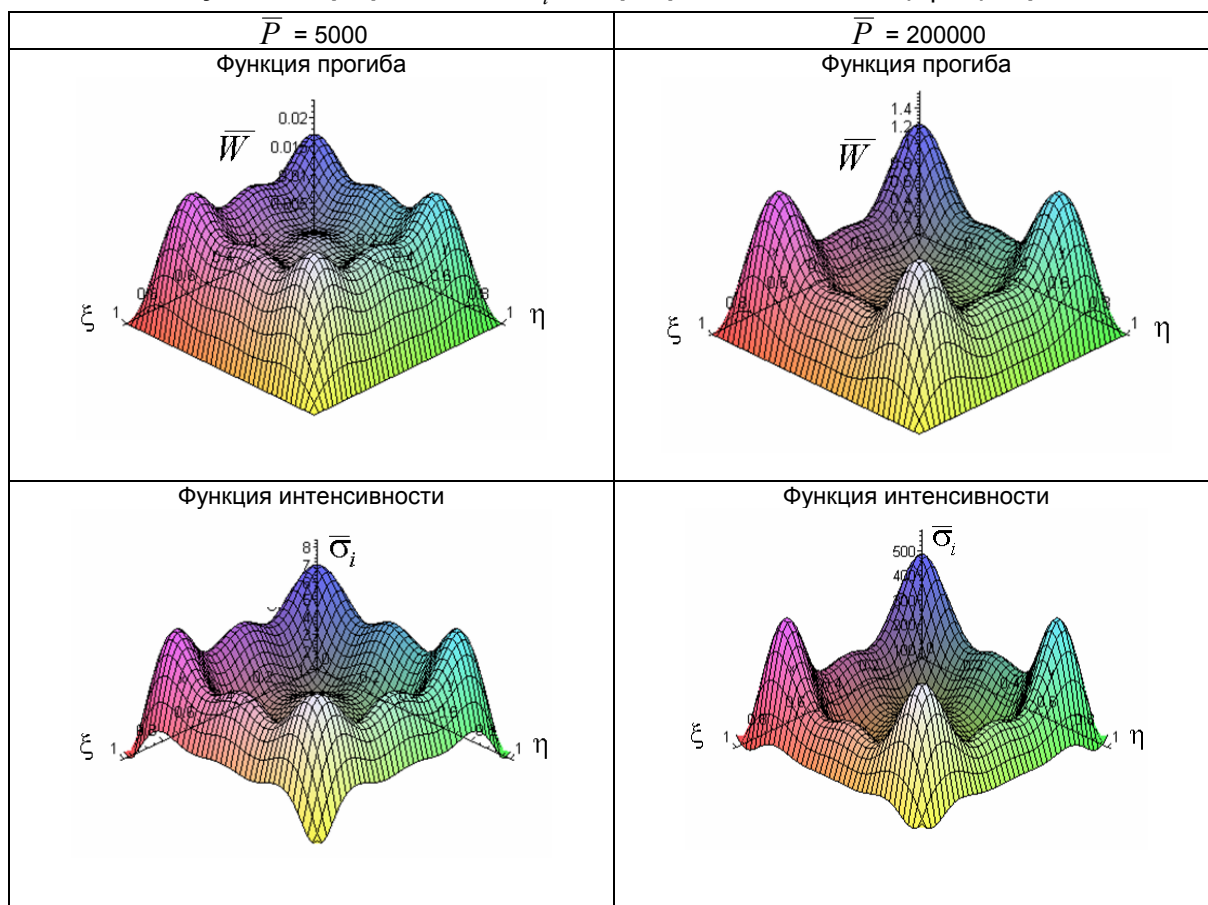
Рисунок 1. Графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для гладкой оболочки варианта IРисунок 2. Графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки ($N_p = 6$) варианта I

Рисунок 3. Графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки ($N_p=18$) варианта IРисунок 4. Графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для гладкой оболочки варианта II

Рисунок 5. Графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки ($N_p=6$) варианта IIРисунок 6. Графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки ($N_p=18$) варианта II

Рисунок 7. Графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для гладкой оболочки варианта IIIРисунок 8. Графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки ($N_p = 6$) варианта III

Рисунок 9. Графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки ($N_p = 18$) варианта IIIРисунок 10. Графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для гладкой оболочки варианта IV

Рисунок 11. Графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки ($N_p=6$) варианта IVРисунок 12. Графики $\bar{W}$ и $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки ($N_p=18$) варианта IV

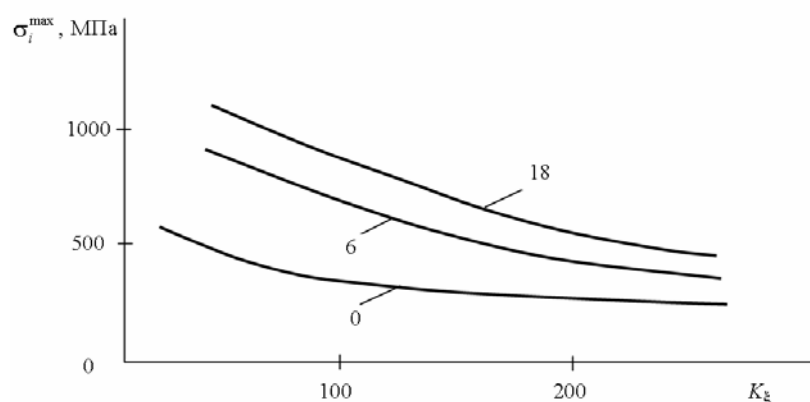
Анализ результатов, представленных на указанных рисунках, показывает следующее.

В случае гладких оболочек (рис. 1, 4, 7 и 10) наибольший уровень интенсивности напряжений (при нагрузках, близких к $\bar{P}_{кр}$) составляет: $\bar{\sigma}_i^{\max} = 9$ (для оболочек варианта I), $\bar{\sigma}_i^{\max} = 22$ (для оболочек варианта II), $\bar{\sigma}_i^{\max} = 70$ (для оболочек варианта III), $\bar{\sigma}_i^{\max} = 350$ (для оболочек варианта IV).

В случае ребристых оболочек с шестью ребрами подкрепления (рис. 5, 8 и 11) мы имеем: $\bar{\sigma}_i^{\max} = 42$ (для оболочек варианта II), $\bar{\sigma}_i^{\max} = 140$ (для оболочек варианта III), $\bar{\sigma}_i^{\max} = 500$ (для оболочек варианта IV).

В случае ребристых оболочек с восемнадцатью ребрами (рис. 6, 9 и 12) соответственно: $\bar{\sigma}_i^{\max} = 50$ (для оболочек варианта II), $\bar{\sigma}_i^{\max} = 160$ (для оболочек варианта III) и $\bar{\sigma}_i^{\max} = 600$ (для оболочек варианта IV).

Мы видим также, что в сравнении с гладкими оболочками значения критических безразмерных нагрузок $\bar{P}_{кр}$ для ребристых оболочек соответствующего варианта возрастают более чем в два раза при шести ребрах подкрепления и более чем в три раза при восемнадцати ребрах. Эта пропорция будет справедлива и для размерных критических нагрузок.



На рис. 13 представлены графики « $\sigma_i^{\max} - K_\xi$ » (где $\sigma_i^{\max}$ – размерное максимальное значение интенсивности напряжений) для стальных оболочек.

Номер кривой означает число ребер, подкрепляющих оболочку.

Рассмотрим для примера две разные по толщине оболочки, одна из которых гладкая, варианта II, объемом около 58,5 м³, а другая – более тонкая, но ребристая с восемнадцатью ребрами, варианта III, объемом приблизительно 45,0 м³. Мы видим, что значение $\sigma_i^{\max}$ больше в случае более тонкой ребристой оболочки.

Рисунок 13. Графики « $\sigma_i^{\max} - K_\xi$ » в зависимости от N_p для стальных оболочек

Рассмотрим также две другие разные по толщине оболочки. Пусть одна из оболочек гладкая, варианта III, объемом порядка 29,2 м³, а другая – более тонкая, ребристая с восемнадцатью ребрами подкрепления, варианта IV, объемом около 11,5 м³. Нетрудно видеть, что при одном и том же уровне значений $\sigma_i^{\max}$ критическая нагрузка будет больше для гладкой, менее тонкой оболочки.

Для уменьшения материалоемкости конструкции оболочка может быть подкреплена ребрами жесткости (при уменьшении толщины обшивки).

Подчеркнем, что участки оболочки, расположенные вблизи угловых точек и вдоль контура закрепления, являются наиболее опасными, поскольку в точках именно этих участков напряжения достигают наибольшего уровня. Это обстоятельство является нежелательным и способствует развитию пластических деформаций, а также деформаций ползучести при длительных нагрузках.

2. Контроль прочности оболочечных конструкций

При исследовании устойчивости оболочек, изготовленных из нижеследующих пластичных материалов, для проверки их прочности применяем энергетический критерий прочности, приводящий к критерию Мизеса-Генки-Хубера [1–5].

Наибольшие размерные значения интенсивности напряжений в случаях различных оболочек, изготовленных из разных материалов, представлены в табл. 1 (для гладких оболочек вариантов I–IV) и табл. 2 (для ребристых оболочек вариантов II–IV с восемнадцатью ребрами подкрепления).

Таблица 1. Наибольшие размерные значения интенсивности напряжений $\sigma_i^{\max}$ для гладких оболочек

Материал оболочки	σ_T , МПа	$\sigma_i^{\max}$, МПа для вариантов оболочек			
		I	II	III	IV
Сталь 40ХНВ закаленная	1720	525	462	367,5	204,2
Технический титан	520	275	242	192,5	106,9
Дюраль	340	187,5	165	131,25	72,92
Оргстекло	75	8,25	7,26	5,78	3,2

Таблица 2. Наибольшие размерные значения интенсивности напряжений $\sigma_i^{\max}$ для ребристых оболочек

Материал оболочки	σ_T , МПа	$\sigma_i^{\max}$, МПа для вариантов оболочек		
		II	III	IV
Сталь 40ХНВ закаленная	1720	1050	840	350
Технический титан	520	550	440	183,3
Дюраль	340	375	300	125
Оргстекло	75	16,5	13,2	5,5

Предположим, что коэффициент запаса прочности k равен 2.

Тогда, исходя из данных табл. 1, следует вывод, что гладкие оболочки вариантов II-IV (достаточно тонкие оболочки) не теряют прочности при потере устойчивости.

Из рассмотрения табл. 2 видно, что ребристые оболочки при нагрузках, близких к критическим, не теряют своей прочности только в случаях варианта IV.

Рассматривая гладкие и ребристые оболочки при одних и тех же нагрузках (см. табл. 1 и 2) приходим к выводу, что ребристые оболочки имеют больший запас прочности (следовательно, являются более прочными) в сравнении с гладкими оболочками. При этом материалоемкость ребристых оболочек, естественно, будет меньшей.

Приведенные результаты исследования показывают следующее.

При подкреплении оболочек ребрами жесткости размерные критические нагрузки возрастают в несколько раз. При этом характер распределения прогибов и напряжений (интенсивностей напряжений) по полю оболочки становится более равномерным.

Вблизи критических нагрузок напряжения, возникающие в материале оболочки, достигают достаточно высокого уровня, в частности, в местах прикрепления ребер и вблизи контура закрепления. Это обстоятельство может способствовать развитию пластических деформаций или деформаций ползучести (при длительных нагрузках), а также привести к потере прочности.

Все это говорит о том, что при проектировании оболочечных конструкций необходимо проводить расчеты не только в упругой постановке, но и с учетом возможных нелинейно-упругих (пластических) деформаций и деформаций ползучести.

Литература

1. Жгутов В.М. Прочность и устойчивость упругих ортотропных и изотропных ребристых оболочек. I // Инженерно-строительный журнал. №7, 2009. С. 55 – 64.
2. Жгутов В.М., Мухин Д.Е., Панин А.Н. Прочность и устойчивость ребристых пологих оболочек с учетом геометрической и физической нелинейности // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. №2, 2008. С. 41–44.
3. Жгутов В.М. Исследование прочности и устойчивости ребристых оболочек с помощью вычислительного эксперимента // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: Сборник докладов VII Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте 23-24 апреля 2008 года. СПб., 2008. С. 110-131.
4. Жгутов В.М. Математическая модель и алгоритм исследования прочности и устойчивости ребристых оболочек с учетом различных свойств материала // «Инженерные системы – 2008»: Всероссийская научно-практическая конференция: Труды конференции. Москва, 7-11 апреля 2008 года, РУДН. М., 2008. С. 341-346.
5. Жгутов В.М. Компьютерное моделирование прочности и устойчивости упругих ребристых оболочек // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Труды международной конференции. СПб., 2008. С. 122 – 128.

**Владимир Михайлович Жгутов, Санкт-Петербург*

Тел. раб.: +7(812)378-20-83; эл. почта: abc_kitezh@mail.ru

Метод конструктивной анизотропии для ортотропных и изотропных ребристых оболочек

К.т.н. В.М. Жгутов*,

ООО «Архитектурно-строительная компания «Китеж»

Рассматриваем оболочки общего вида, выполненные из ортотропного (в частности, изотропного) материала. Срединную поверхность оболочки (точнее, ее обшивки) толщиной h принимаем за отсчетную поверхность $z = 0$. Полагаем, что оси x и y криволинейной ортогональной системы координат ($0 \leq x \leq a$; $0 \leq y \leq b$) направлены по линиям кривизны отсчетной поверхности, а ось z – по нормали к поверхности $z = 0$ в сторону ее вогнутости так, что ориентация системы координат x , y и z оказывается правой.

Со стороны вогнутости оболочка подкреплена ребрами жесткости, расставленными вдоль координатных линий.

Ребра задаем дискретно с помощью функции $H=H(x,y)$, характеризующей распределение ребер по оболочке и их высоту [1,2]:

$$H(x,y) = \sum_{j=1}^m h2^j \bar{\delta}(x-x_j) + \sum_{i=1}^n h1^i \bar{\delta}(y-y_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h^{ij} \bar{\delta}(x-x_j) \bar{\delta}(y-y_i), \quad (1)$$

где n и m – числа ребер, расставленных вдоль осей x и y соответственно (x - и y -ребер); $h1^i$ и $h2^j$ – высоты x - и y -ребер; $h^{ij} = \min\{h2^j, h1^i\}$ – высота пересечения x - и y -ребер (с номерами j и i соответственно); $\bar{\delta}(x-x_j)$ и $\bar{\delta}(y-y_i)$ – единичные столбчатые функции, равные по определению единице в местах присоединения y - и x -ребер соответственно и нулю – вне таких мест.

В дальнейшем полагаем, что $h2^j = \text{const}$ и $h1^i = \text{const}$.

Ширина x -ребер равна $r1_i = d_i - c_i$, где $c_i = y_i - r1_i/2$, $d_i = y_i + r1_i/2$; ширина y -ребер – $r2_j = b_j - a_j$, где $a_j = x_j - r2_j/2$, $b_j = x_j + r2_j/2$.

Таким образом, для единичных столбчатых функций можно записать:

$$\bar{\delta}(x-x_j) = 1, \text{ если } a_j \leq x \leq b_j \text{ и } \bar{\delta}(x-x_j) = 0 \text{ при любом другом } x;$$

$$\bar{\delta}(y-y_i) = 1, \text{ если } c_i \leq y \leq d_i \text{ и } \bar{\delta}(y-y_i) = 0 \text{ при любом другом } y.$$

Очевидно, что толщина всей конструкции равна $h + H$ и $-h/2 \leq z \leq h/2 + H$. Если $H > 0$, то оболочка подкреплена ребрами; если же $H < 0$, то она ослаблена вырезами.

Будем учитывать геометрическую нелинейность, дискретное расположение ребер, их ширину, сдвиговую и крутильную жесткости, поперечные сдвиги.

Нелинейные геометрические соотношения в отсчетной поверхности $z=0$ имеют вид [3 – 5]

$$\varepsilon_x = \frac{1}{A} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial y} V - K_x W + \frac{1}{2} \theta_1^2; \quad \varepsilon_y = \frac{1}{B} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial x} U - K_y W + \frac{1}{2} \theta_2^2;$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{A} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{1}{AB} \left(\frac{\partial A}{\partial y} U + \frac{\partial B}{\partial x} V \right) + \theta_1 \theta_2,$$

где ε_x , ε_y и γ_{xy} – деформации удлинения вдоль осей x , y и сдвига в касательной плоскости (dx, dy); U , V и W – компоненты вектора перемещений точек вдоль осей x , y и z соответственно; A и B – метрические коэффициенты Ламе; K_x , K_y – главные кривизны;

$$\theta_1 = - \left(\frac{1}{A} \frac{\partial W}{\partial x} + K_x U \right); \quad \theta_2 = - \left(\frac{1}{B} \frac{\partial W}{\partial y} + K_y V \right).$$

Деформации поперечных сдвигов определяем по формулам

$$\gamma_{xz} = k f(z) (\psi_x - \theta_1); \quad \gamma_{yz} = k f(z) (\psi_y - \theta_2).$$

Здесь ψ_x и ψ_y – углы поворота отрезка нормали в плоскостях (dx, dz) и (dy, dz) соответственно; $f(z)$ – функция, характеризующая распределение напряжений τ_{xz} и τ_{yz} вдоль оси z ; k – константа.

Деформации в слое $z \neq 0$ определяются с помощью соотношений [1 – 5]

$$\varepsilon_x^z = \varepsilon_x + z\chi_1, \quad \varepsilon_y^z = \varepsilon_y + z\chi_2, \quad \gamma_{xy}^z = \gamma_{xy} + 2z\chi_{12},$$

где χ_1 , χ_2 и χ_{12} – функции изменения кривизны и кручения, определяемые по формулам:

$$\chi_1 = \frac{1}{A} \frac{\partial \psi_x}{\partial x} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial y} \psi_y; \quad \chi_2 = \frac{1}{B} \frac{\partial \psi_y}{\partial y} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial x} \psi_x;$$

$$2\chi_{12} = \frac{1}{A} \frac{\partial \psi_y}{\partial x} + \frac{1}{B} \frac{\partial \psi_x}{\partial y} - \frac{1}{AB} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \psi_x + \frac{\partial B}{\partial x} \psi_y \right).$$

1. Внутренние силовые факторы, действующие в оболочке

В работах автора [3–5] получены следующие выражения для внутренних силовых факторов (погонных усилий, моментов и поперечных сил), действующих в упругой ортотропной оболочке и приведенных к отсчетной поверхности:

$$N_x = G_1[(h + \bar{F})(\varepsilon_x + \mu_2 \varepsilon_y) + \bar{S}(\chi_1 + \mu_2 \chi_2)]; \quad N_y = G_2[(h + \bar{F})(\varepsilon_y + \mu_1 \varepsilon_x) + \bar{S}(\chi_2 + \mu_1 \chi_1)];$$

$$N_{xy} = G_{12}[(h + \bar{F})\gamma_{xy} + 2\bar{S}\chi_{12}];$$

$$M_x = G_1 \left[\bar{S}(\varepsilon_x + \mu_2 \varepsilon_y) + \left(\frac{h^3}{12} + \bar{J} \right) (\chi_1 + \mu_2 \chi_2) \right]; \quad M_y = G_2 \left[\bar{S}(\varepsilon_y + \mu_1 \varepsilon_x) + \left(\frac{h^3}{12} + \bar{J} \right) (\chi_2 + \mu_1 \chi_1) \right];$$

$$M_{xy} = G_{12} \left[\bar{S}\gamma_{xy} + 2 \left(\frac{h^3}{12} + \bar{J} \right) \chi_{12} \right],$$

$$Q_x = kG_{13}(h + \bar{F})(\psi_x - \theta_1); \quad Q_y = kG_{23}(h + \bar{F})(\psi_y - \theta_2).$$

Здесь $\bar{F}$, $\bar{S}$, $\bar{J}$ – погонные площадь поперечного (или продольного) сечения ребра, статический момент и момент инерции данного сечения соответственно:

$$\bar{F} = \int_{h/2}^{h/2+H} dz, \quad \bar{S} = \int_{h/2}^{h/2+H} z dz, \quad \bar{J} = \int_{h/2}^{h/2+H} z^2 dz;$$

$$G_1 = \frac{E_1}{1 - \mu_1 \mu_2}, \quad G_2 = \frac{E_2}{1 - \mu_1 \mu_2}, \quad \text{где } E_1, E_2 \text{ и } \mu_1, \mu_2 \text{ – продольные модули Юнга и коэффициенты}$$

Пуассона, причем $E_1 \mu_2 = E_2 \mu_1$; G_{12} , G_{13} и G_{23} – соответствующие модули сдвига.

В развернутом виде величины $\bar{F}$, $\bar{S}$, $\bar{J}$ с учетом (1) можно записать так:

$$\bar{F} = \sum_{j=1}^m F 2^j \bar{\delta}(x - x_j) + \sum_{i=1}^n F 1^i \bar{\delta}(y - y_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m F^{ij} \bar{\delta}(x - x_j) \bar{\delta}(y - y_i);$$

$$\bar{S} = \sum_{j=1}^m S 2^j \bar{\delta}(x - x_j) + \sum_{i=1}^n S 1^i \bar{\delta}(y - y_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S^{ij} \bar{\delta}(x - x_j) \bar{\delta}(y - y_i);$$

$$\bar{J} = \sum_{j=1}^m J 2^j \bar{\delta}(x - x_j) + \sum_{i=1}^n J 1^i \bar{\delta}(y - y_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m J^{ij} \bar{\delta}(x - x_j) \bar{\delta}(y - y_i),$$

где, например,

$$F2^j = h2^j; S2^j = \frac{h2^j(h+h2^j)}{2}; J2^j = \frac{1}{4}h^2h2^j + \frac{1}{2}h(h2^j)^2 + \frac{1}{3}(h2^j)^3.$$

Аналогичный вид имеют выражения $F1^i, S1^i, J1^i$ и F^{ij}, S^{ij}, J^{ij} .

Считаем, что материалы обшивки и ребер имеют одинаковые (или близкие) сдвиговые жесткости.

2. О жесткостных характеристиках ребер в силовых факторах

Жесткостные характеристики $\bar{F}(x, y), \bar{S}(x, y), \bar{J}(x, y)$ внутренних силовых факторов, действующих в ребрах, являются функциями координат x и y , а потому изменяются по-разному вдоль соответствующих координатных линий (в зависимости от числа и жесткости ребер данных направлений).

Представим силовые факторы $N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_y, M_{xy}, Q_x$ и Q_y в виде

$$\begin{aligned} N_x &= N_x^S + N_x^R, N_y = N_y^S + N_y^R, N_{xy} = N_{xy}^S + N_{xy}^R; \\ M_x &= M_x^S + M_x^R, M_y = M_y^S + M_y^R, M_{xy} = M_{xy}^S + M_{xy}^R; \\ Q_x &= Q_x^S + Q_x^R, Q_y = Q_y^S + Q_y^R, \end{aligned}$$

где индексом «S» отмечены составляющие силовых факторов, действующие в обшивке оболочки, а индексом «R» – составляющие силовых факторов, действующие в ее ребрах.

Проанализируем влияние ребер разных (взаимно ортогональных) направлений, в которых рассматриваются те или иные силовые факторы, на примере формирования усилий N_x^R и N_y^R , действующих в ребрах.

Очевидно, что усилия N_x^R и N_y^R имеют вид

$$N_x^R = G_1(\bar{F}\varepsilon_1 + \bar{S}\psi_1), N_y^R = G_2(\bar{F}\varepsilon_2 + \bar{S}\psi_2),$$

где

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + \mu_2\varepsilon_y, \varepsilon_2 = \varepsilon_y + \mu_1\varepsilon_x, \psi_1 = \chi_1 + \mu_2\chi_2, \psi_2 = \chi_2 + \mu_1\chi_1. \quad (2)$$

В свою очередь, представим усилия N_x^R и N_y^R в следующем виде

$$N_x^R = N_x^{LR} + N_x^{TR}, N_y^R = N_y^{LR} + N_y^{TR},$$

где (дополнительным) индексом «L» отмечены составляющие усилий N_x^R и N_y^R , действующих в тех же направлениях, что и каждое из рассматриваемых усилий, а индексом «T» – составляющие усилий N_x^R и N_y^R , действующие в трансверсальных направлениях.

Здесь

$$N_x^{LR} = \sum_{i=1}^n N_x^{Li} \bar{\delta}(y - y_i), \quad (3)$$

где $N_x^{Li} = G_1(F1^i \varepsilon_1 + S1^i \psi_1);$

$$N_x^{TR} = \sum_{j=1}^m N_x^{Tj} \bar{\delta}(x - x_j), \quad (4)$$

где $N_x^{Tj} = G_1(F2^j \varepsilon_1 + S2^j \psi_1) - \sum_{i=1}^n N_x^{ij} \bar{\delta}(y - y_i), N_x^{ij} = G_1(F^{ij} \varepsilon_1 + S^{ij} \psi_1);$

$$N_y^{LR} = \sum_{j=1}^m N_y^{Lj} \bar{\delta}(x - x_j), \quad (5)$$

где $N_y^{Lj} = G_2(F2^j \varepsilon_2 + S2^j \psi_2)$;

$$N_y^{TR} = \sum_{i=1}^n N_y^{Ti} \bar{\delta}(y - y_i), \quad (6)$$

где $N_y^{Ti} = G_2(F1^i \varepsilon_2 + S1^i \psi_2) - \sum_{j=1}^m N_y^{ij} \bar{\delta}(x - x_j)$, $N_y^{ij} = G_2(F^{ij} \varepsilon_2 + S^{ij} \psi_2)$.

Составляющие этих усилий показаны на рис. 1.

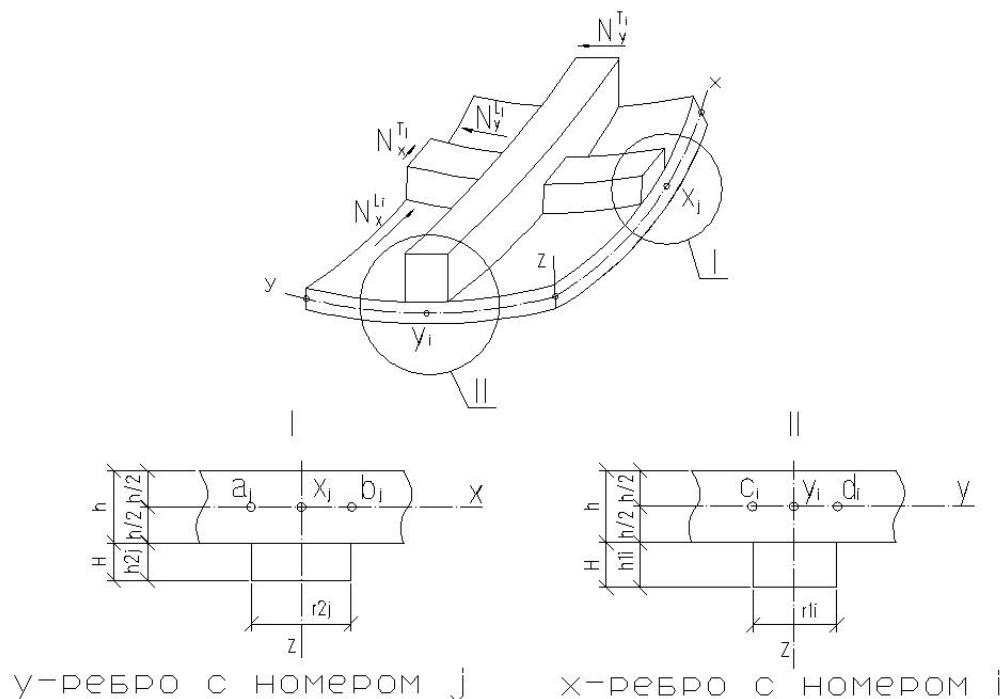


Рисунок 1

В работе [1] В.В.Карповым (при участии автора) показано (при не учете поперечных сдвигов), что на боковой поверхности ребер (или краю вырезов) выполняются, в частности, естественные краевые условия:

$$N_x^{Tj} = 0, \quad N_y^{Tj} = 0, \quad N_{xy}^{Tj} = 0; \quad M_x^{Tj} = 0, \quad M_y^{Tj} = 0, \quad M_{xy}^{Tj} = 0.$$

Можно показать, что при учете поперечных сдвигов в рассматриваемом случае имеют место, в частности, следующие дополнительные краевые условия:

$$Q_x^{Tj} = 0, \quad Q_y^{Ti} = 0; \quad N_{yx}^{Ti} = 0, \quad M_{yx}^{Ti} = 0.$$

Таким образом, в формировании усилия N_x^R основной вклад вносит составляющая N_x^{LR} . Составляющая же $N_x^{TR} = \sum_{j=1}^m N_x^{Tj} \bar{\delta}(x - x_j)$ в случае относительно узких ребер может быть вообще не существенна, поскольку $N_x^{Tj} = 0$ на боковой поверхности ребер.

Соответственно, в усилиях N_y^R главной составляющей является N_y^{LR} ; составляющей же $N_y^{TR} = \sum_{i=1}^n N_y^{Ti} \bar{\delta}(y - y_i)$ в случае узких ребер можно пренебречь.

Мы видим, что основной вклад в формирование силовых факторов, действующих в ребрах, вносят ребра именно тех направлений, в которых данные силовые факторы и рассматриваются. Составляющие данных силовых факторов, обусловленные ребрами трансверсального направления, очевидно, «не успевают развиться» на отрезках сравнительно малой длины $r1_i$ или $r2_j$, на концах которых они равны нулю.

Таким образом, в случае подкрепления оболочки относительно узкими ребрами (имеющими высоту в 3 – 5 раз больше их ширины), выражения для внутренних силовых факторов целесообразно упростить, взяв их в следующем приближенном виде

$$\begin{aligned} N_x &= G_1[(h + \bar{F}_y)(\varepsilon_x + \mu_2 \varepsilon_y) + \bar{S}_y(\chi_1 + \mu_2 \chi_2)]; \quad N_y = G_2[(h + \bar{F}_x)(\varepsilon_y + \mu_1 \varepsilon_x) + \bar{S}_x(\chi_2 + \mu_1 \chi_1)]; \\ N_{xy} &= G_{12}[(h + \bar{F}_y)\gamma_{xy} + 2\bar{S}_y\chi_{12}]; \quad N_{yx} = G_{12}[(h + \bar{F}_x)\gamma_{xy} + 2\bar{S}_x\chi_{12}]; \\ M_x &= G_1\left[\bar{S}_y(\varepsilon_x + \mu_2 \varepsilon_y) + \left(\frac{h^3}{12} + \bar{J}_y\right)(\chi_1 + \mu_2 \chi_2)\right]; \quad M_y = G_2\left[\bar{S}_x(\varepsilon_y + \mu_1 \varepsilon_x) + \left(\frac{h^3}{12} + \bar{J}_x\right)(\chi_2 + \mu_1 \chi_1)\right] \\ M_{yx} &= G_{12}\left[\bar{S}_x\gamma_{xy} + 2\left(\frac{h^3}{12} + \bar{J}_x\right)\chi_{12}\right]; \quad M_{xy} = G_{12}\left[\bar{S}_y\gamma_{xy} + 2\left(\frac{h^3}{12} + \bar{J}_y\right)\chi_{12}\right] \\ Q_x &= kG_{13}(h + \bar{F}_y)(\psi_x - \theta_1); \quad Q_y = kG_{23}(h + \bar{F}_x)(\psi_y - \theta_2). \end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned} \bar{F}_x &= \sum_{j=1}^m h 2^j \bar{\delta}(x - x_j), \quad \bar{F}_y = \sum_{i=1}^n h 1^i \bar{\delta}(y - y_i), \\ \bar{S}_x &= \sum_{j=1}^m S 2^j \bar{\delta}(x - x_j), \quad \bar{S}_y = \sum_{i=1}^n S 1^i \bar{\delta}(y - y_i), \\ \bar{J}_x &= \sum_{j=1}^m J 2^j \bar{\delta}(x - x_j), \quad \bar{J}_y = \sum_{i=1}^n J 1^i \bar{\delta}(y - y_i). \end{aligned}$$

Задание ребристой оболочки в виде оболочки ступенчато переменной толщины применялось в работах Д.В. Вайнберга и И.З. Райтфарта, Л.В.Енджиевского, В.М. Жгутова, П.А. Жилина, В.В. Карпова, И.Н. Преображенского и др. [2].

Для некоторых частных случаев целесообразно найти приведенную жесткость ребер в силовых факторах. Например, для оболочек, подкрепленных узкими ребрами, можно положить $N_y^{Ti} = 0$ (на отрезках длиной $r1_i$) и $N_x^{Tj} = 0$ (на отрезках длиной $r2_j$).

Тогда $\bar{\delta}(x - x_j) \approx r2_j \delta(x - x_j)$ и $\bar{\delta}(y - y_i) \approx r1_i \delta(y - y_i)$, где $\delta(x - x_j)$ и $\delta(y - y_i)$ – дельта-функции переменных x и y . Отсюда следуют выражения, аналоги которых (для изотропных оболочек) встречаются в литературе [1], принимаемые там интуитивно:

$$\begin{aligned} N_x^R &= G_1 \sum_{i=1}^n (F 1^i r1_i \varepsilon_x - S 1^i r1_i \chi_1) \delta(y - y_i); \\ N_y^R &= G_2 \sum_{j=1}^m (F 2^j r2_j \varepsilon_y - S 2^j r2_j \chi_2) \delta(x - x_j). \end{aligned}$$

Если «размазать» жесткость ребер по всей оболочке, то получим

$$\begin{aligned} N_x^R &= G_1 \left(\sum_{i=1}^n \frac{F 1^i r1_i}{b} \varepsilon_x - \sum_{i=1}^n \frac{S 1^i r1_i}{b} \chi_1 \right); \\ N_y^R &= G_2 \left(\sum_{j=1}^m \frac{F 2^j r2_j}{a} \varepsilon_y - \sum_{j=1}^m \frac{S 2^j r2_j}{a} \chi_2 \right). \end{aligned}$$

3. Метод конструктивной анизотропии для ортотропных и изотропных ребристых оболочек

При большом числе подкрепляющих оболочку ребер с различными жесткостями в направлениях координатных линий x и y жесткостные характеристики $\bar{F}(x, y)$, $\bar{S}(x, y)$, $\bar{J}(x, y)$ в силовых факторах существенно различаются в направлениях x и y .

Рассмотрим составляющие усилия $N_x^R = N_x^{LR} + N_x^{TR}$, определяемые соотношениями (3) и (4).

В формировании N_x^{LR} участвуют жесткости x -ребер ($0 \leq x \leq a$; $0 \leq y \leq b$). Поэтому данная составляющая N_x^R с приведенной жесткостью ребер будет иметь вид (коэффициент приведения равен a/a)

$$N_x^{LR} \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{r1_i}{b} N_x^{Li} \right) \frac{a}{a} = G_1 \sum_{i=1}^n \left(\frac{F1^i r1_i}{b} \varepsilon_1 + \frac{S1^i r1_i}{b} \psi_1 \right).$$

В формировании N_x^{TR} участвует жесткость y -ребер, которые расставлены в местах $a_j \leq x \leq b_j$, а также пересечения ребер разных направлений. Следовательно, указанная составляющая N_x^R с приведенной жесткостью ребер будет иметь вид (коэффициент приведения равен $r2_j / a$)

$$N_x^{TR} \approx \sum_{j=1}^m \left(\frac{r2_j}{a} N_x^{Tj} \right) \frac{r2_j}{a} = G_1 \sum_{j=1}^m \left[\left(\frac{F2^j r2_j}{a} - \sum_{i=1}^n \frac{F^{ij} r1_i r2_j}{ab} \right) \frac{r2_j}{a} \varepsilon_1 + \left(\frac{S2^j r2_j}{a} - \sum_{i=1}^n \frac{S^{ij} r1_i r2_j}{ab} \right) \frac{r2_j}{a} \psi_1 \right]$$

Если обозначить

$$F_x = \sum_{i=1}^n \frac{F1^i r1_i}{b} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{F2^j r2_j}{a} - \sum_{i=1}^n \frac{F^{ij} r1_i r2_j}{ab} \right) \frac{r2_j}{a};$$

$$S_x = \sum_{i=1}^n \frac{S1^i r1_i}{b} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{S2^j r2_j}{a} - \sum_{i=1}^n \frac{S^{ij} r1_i r2_j}{ab} \right) \frac{r2_j}{a},$$

то усилия N_x^R примут вид

$$N_x^R = G_1 (F_x \varepsilon_1 + S_x \psi_1).$$

Аналогично можно выразить N_y^R с учетом (5) и (6):

$$N_y^R = G_2 (F_y \varepsilon_2 + S_y \psi_2),$$

где

$$F_y = \sum_{j=1}^m \frac{F2^j r2_j}{a} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{F1^i r1_i}{b} - \sum_{j=1}^m \frac{F^{ij} r1_i r2_j}{ab} \right) \frac{r1_i}{b};$$

$$S_y = \sum_{j=1}^m \frac{S2^j r2_j}{a} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{S1^i r1_i}{b} - \sum_{j=1}^m \frac{S^{ij} r1_i r2_j}{ab} \right) \frac{r1_i}{b}.$$

Таким же образом

$$J_x = \sum_{i=1}^n \frac{J1^i r1_i}{b} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{J2^j r2_j}{a} - \sum_{i=1}^n \frac{J^{ij} r1_i r2_j}{ab} \right) \frac{r2_j}{a};$$

$$J_y = \sum_{j=1}^m \frac{J2^j r2_j}{a} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{J1^i r1_i}{b} - \sum_{j=1}^m \frac{J^{ij} r1_i r2_j}{ab} \right) \frac{r1_i}{b}.$$

При этом выражения внутренних силовых факторов (усилий, моментов и поперечных сил) для конструктивно-ортотропной оболочки, равновесной по жесткости исходной ребристой оболочке будут определяться следующими выражениями

$$\begin{aligned} N_x &= G_1[(h + F_x)\varepsilon_1 + S_x\psi_1], \quad N_y = G_2[(h + F_y)\varepsilon_2 + S_y\psi_2], \\ N_{xy} &= G_{12}[(h + F_y)\gamma_{xy} + 2S_y\chi_{12}], \quad N_{yx} = G_{12}[(h + F_x)\gamma_{xy} + 2S_x\chi_{12}]; \\ M_x &= G_1\left[S_x\varepsilon_1 + \left(\frac{h^3}{12} + J_x\right)\psi_1\right], \quad M_y = G_2\left[S_y\varepsilon_2 + \left(\frac{h^3}{12} + J_y\right)\psi_2\right], \\ M_{xy} &= G_{12}\left[S_y\gamma_{xy} + 2\left(\frac{h^3}{12} + J_y\right)\chi_{12}\right], \quad M_{yx} = G_{12}\left[S_x\gamma_{xy} + 2\left(\frac{h^3}{12} + J_x\right)\chi_{12}\right]; \\ Q_x &= kG_{13}(h + F_x)(\psi_x - \theta_1), \quad Q_y = kG_{23}(h + F_y)(\psi_y - \theta_2). \end{aligned}$$

Примечание 1. В случае изотропного материала во всех выражениях для внутренних силовых факторов и в соотношениях (2) следует положить $E_1 = E_2 = E$ и $\mu_1 = \mu_2 = \mu$, а также $G_{12} = G_{13} = G_{23} = G = E / 2(1 + \mu)$, придав им частный вид. Соотношения (2) при этом будут выглядеть так: $\varepsilon_1 = \varepsilon_x + \mu\varepsilon_y$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_y + \mu\varepsilon_x$, $\psi_1 = \chi_1 + \mu\chi_2$, $\psi_2 = \chi_2 + \mu\chi_1$ [1].

Примечание 2. Требование правой ориентации системы ортогональных криволинейных координат x, y и z является существенным, поскольку в левой системе координат все моменты (определенные в правой системе) меняют знак на противоположный.

Примечание 3. Предложенный в настоящей работе метод конструктивной анизотропии (МКА) для упругих оболочек может быть очевидным образом применен и для нелинейно-упругих задач [5], а также задач ползучести [4]. Для этого следует воспользоваться аддитивностью физических соотношений [по упругим и нелинейно-упругим составляющим (или составляющим, обусловленным ползучестью материала)], а также возможностью выражения двух последних составляющих через первые [4,5].

Литература

1. Карпов В.В., Игнатьев О.В., Сальников А.Ю. Нелинейные математические модели деформирования оболочек переменной толщины и алгоритмы их исследования: Учебное пособие. М., СПб., 2002.
2. Жгутов В.М. Нелинейные свободные колебания пологих оболочек ступенчато-переменной толщины: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.17: СПб, 2004.
3. Жгутов В.М. Прочность и устойчивость упругих ортотропных и изотропных ребристых оболочек. I // Инженерно-строительный журнал. № 7, 2009. С. 55–64.
4. Жгутов В.М. Математические модели деформирования ортотропных и изотропных ребристых оболочек при учете ползучести материала // Инженерно-строительный журнал. № 7, 2009. С. 46–54.
5. Жгутов В.М. Математическая модель деформирования нелинейно-упругих ребристых оболочек при больших перемещениях // Инженерно-строительный журнал. № 6, 2009. С. 16 – 24.

**Владимир Михайлович Жгутов, Санкт-Петербург*

Тел. раб.: +7(812)378-20-83; эл. почта: abc_kitezh@mail.ru

Методика расчёта толщины слоя монолитного пенобетона, применяемого для теплоизоляции трубопроводов

Аспирант И.А. Лундышев*,

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Теплоизоляционные материалы и конструкции предназначены для уменьшения потерь тепла трубопроводами и оборудованием тепловых сетей, а уменьшение транспортных потерь тепла является важнейшим средством экономии топлива. Учитывая сравнительно небольшие затраты на теплоизоляцию трубопроводов (5-8% от капиталовложений в строительство тепловых сетей), очень важным в вопросах сохранения транспортируемого тепла по трубопроводам является их покрытие высококачественными и эффективными теплоизоляционными материалами и использование качественных теплоизоляционных конструкций.

Теплоизоляционные конструкции включают в себя защитное покрытие поверхности труб от коррозии, основной слой изоляции и защитное покрытие, предохраняющее основной слой теплоизоляции от механических повреждений, воздействия атмосферных осадков и агрессивных сред. К защитному покрытию относятся также средства и детали крепления покровного слоя и изоляции в целом [2].

В настоящее время активное внедрение проходит конструкция теплоизоляции трубопроводов монолитным пенобетоном. Согласно предлагаемой конструкции, на изолируемом трубопроводе устанавливаются центраторы, на которые монтируется съёмная или несъёмная опалубка, торцы уплотняются и через технологические отверстия в опалубке заливается монолитный пенобетон, создающий основной слой изоляции. При использовании несъёмной опалубки заливочные технологические отверстия впоследствии заделываются любым гидроизолирующим, но паропроницаемым материалом, например, асбоцементным раствором с целью удаления избытка влаги из пенобетона.

Для применения данного вида теплоизоляции необходимо проведение теплового расчёта, в задачи которого входит определение по заданным теплотерям требуемой толщины основного слоя изоляционной конструкции. Тепловой расчет изоляции может вестись по нормированной плотности теплового потока через изолированную поверхность теплопровода, а исходными данными при тепловых расчетах являются температура теплоносителя, теплофизические характеристики слоев теплоизоляционной конструкции, грунта и канала при подземной прокладке, температура окружающей среды (грунта, воздуха). При тепловом расчёте используется математическое моделирование трубопровода согласно требованиям, выдвигаемым СНиП [1, 2]. Расчёты проведены для климатического района Санкт-Петербурга.

Расчёт толщины тепловой изоляции трубопроводов

Расчет толщины тепловой изоляции трубопроводов δ_k по нормированной плотности теплового потока выполняют по формуле [1]

$$\delta_k = \frac{d \cdot (B - 1)}{2}, \quad (1)$$

где d - наружный диаметр трубопровода, м;

B - отношение наружного диаметра изоляционного слоя d_i к диаметру трубопровода d . ($B = \frac{d_i}{d}$);

Величину B определяют по формуле:

$$B = e^{2 \cdot \pi \cdot \lambda_k \cdot R_k}, \quad (2)$$

где e - основание натурального логарифма;

λ_k - коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя, Вт/(м · °С);

R_k - термическое сопротивление слоя изоляции, м · °С/Вт, величину которого определяют из следующего выражения

$$R_k = R_{\text{tot}} - \sum R_i, \quad (3)$$

где R_{tot} - суммарное термическое сопротивление слоя изоляции и других дополнительных термических сопротивлений на пути теплового потока определяемое по формуле:

$$R_{\text{tot}} = \frac{(t_w - t_e)}{q_e \cdot k_1} \quad (4)$$

где q_e - нормированная линейная плотность теплового потока, Вт/м;

t_w - средняя за период эксплуатации температура теплоносителя;

k_1 - коэффициент;

t_e - среднегодовая температура окружающей среды;

Определение фактических тепловых потоков для конструкций теплопроводов в пенобетонной изоляции при бесканальной прокладке

В расчётах приняты среднегодовые температуры теплоносителя при качественном графике регулирования отпуска тепла от теплоисточника 150-70°C (90-50°C – на обратном трубопроводе).

Фактические линейные плотности тепловых потоков q_1^L, q_2^L от подающего и обратного трубопроводов, Вт/м двухтрубных тепловых сетей, расположенных в грунте бесканально на одинаковом расстоянии от поверхности до оси труб H , м, определены по формулам [3](5,6):

$$q_1^L = \frac{(t_{B1} - t_H)(R_{uz} + R_{zp}) - (t_{B2} - t_H)R_0}{(R_{uz} + R_{zp})^2 - R_0^2} \quad (5)$$

$$q_2^L = \frac{(t_{B2} - t_H)(R_{uz} + R_{zp}) - (t_{B1} - t_H)R_0}{(R_{uz} + R_{zp})^2 - R_0^2} \quad (6)$$

Термическое сопротивление изоляции R_{uz} , м°C/Вт определено исходя из заданной толщины изоляции δ_{uz} , м по формуле (7):

$$R_{uz} = \frac{1}{2\pi\lambda_{uz}} \ln \frac{d + 2\delta_{uz}}{d} \quad (7)$$

Термическое сопротивление грунта R_{zp} , м°C/Вт определено по формуле (8):

$$R_{zp} = \frac{1}{2\pi\lambda_{zp}} \ln \left[\frac{2H}{d} + \sqrt{\left(\frac{2H}{d} \right)^2 - 1} \right] \quad (8)$$

Термическое сопротивление от взаимного влияния трубопроводов R_0 , м°C/Вт определено по формуле (9):

$$R_0 = \frac{1}{2\pi\lambda_{zp}} \ln \left[\sqrt{\left(\frac{2H}{K_{1,2}} \right)^2 + 1} \right] \quad (9)$$

В формулах (5-9) использованы обозначения:

t_{B1}, t_{B2} – среднегодовые температуры теплоносителя подающего (90°C) и обратного (50°C) трубопроводов;

t_H – (5°C) температура грунта [4];

d – наружный диаметр подающего и обратного трубопроводов, м;

$K_{1,2}$ – расстояние между осями труб по горизонтали, м;

$\lambda_{uz}, \lambda_{zp}$ – теплопроводность изоляции и грунта, Вт/м°C;

δ_{uz} – толщина изоляции, м.

Результаты расчётов приведены в таблицах 1 и 2:

Таблица 1. Глубина заложения $H = 1,5$ м

$q_1^L + q_2^L$	q_1^L	q_2^L	$R_{из}$	$R_{гр}$	R_0	$\lambda_{из}$	$d_y, м$	$d_n, м$	$H, м$	$K_{1,2, м}$	$\lambda_{зр}, Вт/мК$	$\delta_{из}, м$
43,8	29,7	14,1	2,34	0,42	0,21	0,05	0,05	0,057	1,5	0,3	1,78	0,031
39,1	26,4	12,7	2,70	0,42	0,21	0,05	0,05	0,057	1,5	0,3	1,78	0,038
54,1	37,1	17,0	1,81	0,39	0,21	0,05	0,07	0,076	1,5	0,3	1,78	0,029
45,7	31,1	14,6	2,25	0,39	0,21	0,05	0,07	0,076	1,5	0,3	1,78	0,039
55,8	38,3	17,5	1,75	0,38	0,21	0,05	0,08	0,089	1,5	0,3	1,78	0,033
47,8	32,5	15,2	2,14	0,38	0,21	0,05	0,08	0,089	1,5	0,3	1,78	0,043
63,4	43,4	20,0	1,52	0,36	0,17	0,05	0,1	0,108	1,5	0,45	1,78	0,033
54,4	37,0	17,4	1,86	0,36	0,17	0,05	0,1	0,108	1,5	0,45	1,78	0,043
62,3	42,6	19,7	1,57	0,34	0,17	0,05	0,125	0,133	1,5	0,45	1,78	0,043
70,8	48,8	22,0	1,34	0,32	0,17	0,05	0,15	0,159	1,5	0,45	1,78	0,042
86,7	59,9	26,8	1,06	0,30	0,15	0,05	0,2	0,219	1,5	0,6	1,78	0,043
84,6	58,4	26,2	1,11	0,28	0,15	0,05	0,25	0,273	1,5	0,6	1,78	0,057
97,8	67,7	30,1	0,94	0,26	0,13	0,05	0,3	0,325	1,5	0,7	1,78	0,056
117,3	80,8	36,5	0,77	0,24	0,10	0,05	0,4	0,426	1,5	1	1,78	0,058
113,0	77,6	35,3	0,83	0,22	0,10	0,05	0,5	0,529	1,5	1	1,78	0,079
139,4	95,1	44,3	0,66	0,20	0,07	0,05	0,6	0,63	1,5	1,5	1,78	0,073

Таблица 2. Глубина заложения $H = 0,7$ м.

$q_1^L + q_2^L$	q_1^L	q_2^L	$R_{из}$	$R_{гр}$	R_0	$\lambda_{из}$	$d_y, м$	$d_n, м$	$H, м$	$K_{1,2, м}$	$\lambda_{зр}, Вт/мК$	$\delta_{из}, м$
51,7	33,7	18,0	2,34	0,35	0,14	0,05	0,05	0,057	0,7	0,3	1,78	0,031
45,9	29,9	16,1	2,70	0,35	0,14	0,05	0,05	0,057	0,7	0,3	1,78	0,038
64,5	42,3	22,2	1,81	0,32	0,14	0,05	0,07	0,076	0,7	0,3	1,78	0,029
54,0	35,2	18,8	2,25	0,32	0,14	0,05	0,07	0,076	0,7	0,3	1,78	0,039
66,7	43,8	22,9	1,75	0,31	0,14	0,05	0,08	0,089	0,7	0,3	1,78	0,033
56,6	37,0	19,6	2,14	0,31	0,14	0,05	0,08	0,089	0,7	0,3	1,78	0,043
76,4	49,9	26,5	1,52	0,29	0,11	0,05	0,1	0,108	0,7	0,45	1,78	0,033
64,9	42,2	22,7	1,86	0,29	0,11	0,05	0,1	0,108	0,7	0,45	1,78	0,043
75,0	49,0	26,0	1,57	0,27	0,11	0,05	0,125	0,133	0,7	0,45	1,78	0,043
86,0	56,4	29,6	1,34	0,26	0,11	0,05	0,15	0,159	0,7	0,45	1,78	0,042
107,0	70,2	36,9	1,06	0,23	0,08	0,05	0,2	0,219	0,7	0,6	1,78	0,043
104,2	68,2	35,9	1,11	0,21	0,08	0,05	0,25	0,273	0,7	0,6	1,78	0,057
122,1	80,0	42,1	0,94	0,19	0,07	0,05	0,3	0,325	0,7	0,7	1,78	0,056
148,8	96,9	51,8	0,77	0,17	0,05	0,05	0,4	0,426	0,7	1	1,78	0,058
142,7	92,9	49,8	0,83	0,15	0,05	0,05	0,5	0,529	0,7	1	1,78	0,079
179,4	116,0	63,4	0,66	0,13	0,03	0,05	0,6	0,63	0,7	1,5	1,78	0,073

Определение фактических тепловых потоков для конструкций теплопроводов в пенобетонной изоляции при подземной прокладке в непроходных каналах

1. Фактические линейные плотности тепловых потоков q_1^L, q_2^L от подающего и обратного трубопроводов, Вт/м через изолированную поверхность двухтрубных тепловых сетей, прокладываемых в непроходном канале шириной b и высотой h на глубине H , м, от поверхности земли до оси канала определены по формуле [4]:

$$q_1^L + q_2^L = \frac{(t_{кан} - t_n)}{R_{кан} + R_{зр}} \quad (10)$$

2. Температура воздуха в канале $t_{кан}$:

$$t_{кан} = \frac{\frac{2t_n}{R_{из} + R_n} + \frac{t_n}{R_{кан} + R_{сп}}}{\frac{2}{R_{из} + R_n} + \frac{1}{R_{кан} + R_{сп}}} \quad (11)$$

$$R_n = \frac{1}{2\pi\alpha_k(d + 2\delta_{из})} \quad R_{кан} = \frac{1}{\pi\alpha_k \frac{2bh}{b+h}},$$

где $R_{кан}$ – термическое сопротивление теплоотдаче от воздуха к поверхности канала, $м^0С/Вт$;

R_n – термическое сопротивление теплоотдаче от поверхности изоляции подающего и обратного трубопровода, $м^0С/Вт$;

α_k – коэффициент теплоотдачи в канале, принимается равным $11 Вт/(м^2 \cdot ^0С)$;

$R_{сп}$ – термическое сопротивление грунта, $м^0С/Вт$, определяется по формуле

$$R_{сп} = \frac{\ln \left[3,5 \frac{H}{h} \left(\frac{h}{b} \right)^{0,25} \right]}{\left(5,7 + 0,5 \frac{b}{h} \right) \lambda_{сп}} \quad (12)$$

3. t_n – среднегодовая температура грунта, равная для Санкт-Петербурга – $3,20С$.

Результаты расчётов приведены в таблице 3:

Таблица 3. Фактические линейные плотности тепловых потоков $q_1^L + q_2^L$ от подающего и обратного трубопроводов, Вт/м

$q_1^L + q_2^L$	$t_{кан}$	$(R_{из}+R_n)^{-1}$	$(R_{кан}+R_{гр})^{-1}$	$R_{н1}$	$R_{кан}$	$R_{гр}$	$b, м$	h	h/b	α_k	$d_y, м$
51,2	6,91	0,41	5,06	0,122	0,056	0,142	0,6	0,46	0,767	11	0,05
45,7	5,84	0,36	5,06	0,109	0,056	0,142	0,6	0,46	0,767	11	0,05
63,4	9,33	0,52	5,06	0,108	0,056	0,142	0,6	0,46	0,767	11	0,07
53,5	7,37	0,43	5,06	0,094	0,056	0,142	0,6	0,46	0,767	11	0,07
65,5	9,74	0,54	5,06	0,094	0,056	0,142	0,6	0,46	0,767	11	0,08
55,9	7,86	0,45	5,06	0,083	0,056	0,142	0,6	0,46	0,767	11	0,08
75,1	9,87	0,62	5,74	0,083	0,048	0,127	0,9	0,46	0,511	11	0,1
64,2	7,97	0,52	5,74	0,075	0,048	0,127	0,9	0,46	0,511	11	0,1
73,6	9,62	0,61	5,74	0,066	0,048	0,127	0,9	0,46	0,511	11	0,125
83,7	11,38	0,71	5,74	0,060	0,048	0,127	0,9	0,46	0,511	11	0,15
111,1	8,64	0,91	9,38	0,047	0,027	0,079	1,5	0,83	0,553	11	0,2
107,2	8,23	0,87	9,38	0,037	0,027	0,079	1,5	0,83	0,553	11	0,25
123,8	10,00	1,03	9,38	0,033	0,027	0,079	1,5	0,83	0,553	11	0,3
150,7	10,00	1,26	11,42	0,027	0,023	0,065	2,1	0,9	0,429	11	0,4
142,5	9,28	1,17	11,42	0,021	0,023	0,065	2,1	0,9	0,429	11	0,5
171,5	11,82	1,47	11,42	0,019	0,023	0,065	2,1	0,9	0,429	11	0,6

Определение фактических тепловых потоков для конструкций теплопроводов в пенобетонной изоляции при надземной прокладке

Тепловые потери через изолированную поверхность подающих и обратных трубопроводов тепловых сетей при надземной прокладке при известной толщине изоляции определяются по формулам [3]:

Лундышев И.А. Методика расчёта толщины слоя монолитного пенобетона, применяемого для теплоизоляции трубопроводов

$$q_{\text{пр}}^L = \frac{(t_{B1} - t_n)}{R_{\text{пр}} + R_{\text{из}}}, \quad q_{\text{обр}}^L = \frac{(t_{B2} - t_n)}{R_{\text{пр}} + R_{\text{из}}} \quad (13)$$

где $R_{\text{пр}}$ – термическое сопротивление теплоотдаче от поверхности наружной изоляции подающего и обратного трубопровода, $\text{м}^2 \cdot \text{С} / \text{Вт}$:

$$R_{\text{пр}} = \frac{1}{\pi \alpha_n (d + 2\delta_{\text{из}})}; \quad (14)$$

α_n – коэффициент теплоотдачи, принимается равным $20 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{С})$;

$R_{\text{из}}$ – термическое сопротивление изоляции, $\text{м}^2 \cdot \text{С} / \text{Вт}$:

$$R_{\text{из}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d + 2\delta_{\text{из}}}{d}. \quad (15)$$

Результаты расчётов приведены в таблице 4:

Таблица 4. Фактические линейные плотности тепловых потоков $q_1^L + q_2^L$ от подающего и обратного трубопроводов при надземной прокладке, Вт/м

$q_{\text{пр}} + q_{\text{обр}}$	$q_{\text{пр}}$	$q_{\text{обр}}$	$R_{\text{н1}}$	$R_{\text{из}}$	α_n	$d_y, \text{м}$
59,1	37,6	21,5	0,134	2,34	20	0,05
51,9	33,1	18,9	0,120	2,70	20	0,05
76,1	48,4	27,6	0,119	1,81	20	0,07
62,2	39,6	22,6	0,103	2,25	20	0,07
79,2	50,4	28,8	0,103	1,75	20	0,08
65,6	41,8	23,9	0,091	2,14	20	0,08
90,9	57,9	33,0	0,092	1,52	20	0,1
75,4	48,0	27,4	0,082	1,86	20	0,1
88,9	56,6	32,3	0,073	1,57	20	0,125
104,1	66,3	37,8	0,066	1,34	20	0,15
132,0	84,0	48,0	0,052	1,06	20	0,2
126,7	80,6	46,0	0,041	1,11	20	0,25
150,6	95,9	54,7	0,037	0,94	20	0,3
183,3	116,7	66,6	0,029	0,77	20	0,4
171,3	109,1	62,3	0,023	0,83	20	0,5
215,2	137,0	78,2	0,021	0,66	20	0,6

Вышеприведённые выкладки, формулы и расчёты подтверждают эффективность применения монолитного пенобетона в качестве опалубки трубопроводов, так как вышеприведённые толщины теплоизоляции невелики. Однако требуются дальнейшие разработки и расчеты предлагаемой технологии, что возможно принесёт уменьшение плотности применяемого монолитного пенобетона и соответственно улучшение его теплоизоляционных качеств с дальнейшим уменьшением толщины и цены предлагаемой теплоизоляции. В целом данная технология применения монолитного пенобетона имеет большие перспективы развития, особенно в условиях холодного климата.

Литература

1. СНиП 41-02-2003., «Тепловые сети», 2003.
2. Тепловая изоляция. Справочник строителя / Под ред. Г.Ф. Кузнецова. М., 1985.
3. Типовые решения прокладки трубопроводов тепловых сетей в изоляции из пенобетона «СОВБИ» диаметром Ду 50-600 мм. 313.ТС-0015.000, 2007.
4. Теплоизоляция трубопроводов и оборудования неавтоклавным монолитным пенобетоном «СОВБИ» СТО-005-50845180-2007, 2007.

**Игорь Андреевич Лундышев, Санкт-Петербург
Тел. раб.: +7(812)275-46-92, 275-46-77, 275-36-89
Эл. почта: finans@sovbi.spb.ru*

Климатические системы: расчет воздухообмена в помещении

Коммерческий директор Л.Л. Гошка*,
ООО «Кола»

В климатизации зданий одним из важнейших параметров является воздухообмен в помещении. Он обозначается символом L и имеет размерность $\text{м}^3/\text{час}$. В данной статье мы попробуем установить физический смысл данного параметра. Можно предположить, что он гораздо глубже, чем обеспечение помещения кислородом и удаление из него углекислого газа.

Для этого обратимся к примеру, когда в ночь на 27 августа 2009 года в Косино-Ухтомском районе (Москва) было отмечено превышение ПДК по сероводороду в 5 раз [1]. Пусть ПДК по сероводороду равняется $C_{\text{пдк}}$, тогда концентрация по сероводороду в атмосферном воздухе будет $C_{\text{атм}} = 5 \cdot C_{\text{пдк}}$. Пусть житель данного района, назовем его М., спал с открытым окном. Тогда можно ожидать, что к утру в помещении гражданина М концентрация сероводорода в воздухе будет также $C_{\text{пом}} = 5 \cdot C_{\text{пдк}}$.

Пусть площадь комнаты $S=18 \text{ м}^2$, высота потолков $h=3$ метра, тогда объем комнаты составит $V=18 \cdot 3=54 \text{ м}^3$. Пусть в помещении система вентиляции с естественным побуждением. В помещении установлены герметичные стеклопакеты. Уходя утром на работу, гражданин М закрыл окно. При закрытом окне (стеклопакете) система вентиляции с естественным побуждением практически не работает, следовательно, возвратившись вечером домой, он может иметь в своей комнате концентрацию сероводорода $C_{\text{пом}}=5 \cdot C_{\text{пдк}}$. Для того чтобы привести воздух в помещении к уровню ПДК, помещение необходимо проветрить, т.е. привести к значению $C_{\text{пом}} = C_{\text{пдк}}$. Пусть в помещении естественная вентиляция, по тем или иным причинам, обеспечивает расход наружного воздуха в $L=20 \text{ м}^3/\text{час}$, но он после трудового дня хочет комфортных условий, а за окном пыль и шум. Для того чтобы в помещение поступало меньше шума, пыли и не было сквозняка, он только чуть-чуть приоткрыл форточку, тем самым обеспечил расход наружного воздуха в $L=20 \text{ м}^3$ в час.

Нас будет интересовать вопрос, сколько атмосферного воздуха $V_{\text{нар}}$ потребуется гражданину М для проветривания своего помещения.

Для ответа на вопрос воспользуемся руководством Р 2.1.10.1920-04 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду» [2].

6.4.1.2. Оценка воздействующих концентраций включает определение концентраций химических веществ, воздействующих на человека в течение периода экспозиции.

6.1.2 Экспозиция (воздействие) – контакт организма (рецептора) с химическим, физическим или биологическим агентом. Величина экспозиции определяется как измеренное или рассчитанное количество агента в конкретном объекте окружающей среды, находящееся в соприкосновении с так называемыми пограничными органами человека (легкие, пищеварительный тракт, кожа) в течение какого-либо точно установленного времени. Экспозиция может быть выражена как общее количество вещества в окружающей среде (в единицах массы, например, мг), или как величина воздействия – масса вещества, отнесенная к единице времени (например, мг/день), или как величина воздействия, нормализованная с учетом массы тела $\text{мг}/(\text{кг} \times \text{день})$.

6.1.7. Полный сценарий экспозиции, отражающий воздействие на население в реальных условиях, включает оценку поступления химических веществ в организм человека одновременно из разных сред (атмосферный воздух, питьевая вода, вода поверхностного водоема, почва, продукты питания) различными путями (пероральный, ингаляционный, накожный). Такой тип экспозиции характеризуется как многосредовое и комплексное воздействие.

6.4.1.3. Концентрация – это содержание конкретного загрязнителя в конкретной среде (например, воздушной) на единицу ее объема (например, $\text{мг}/\text{м}^3$) в определенный промежуток времени. Все замеры концентраций прямо или косвенно связаны с временным интервалом. Даже так называемые приборы непрерывного действия имеют предельное, порой весьма короткое время отклика, и поэтому их показания отражают среднее (или приближенное к среднему) значение фактических концентраций в течение ограниченного времени.

6.4.6.1. Экспозиция характеризует контакт организма с химическим агентом. Если экспозиция имеет место в течение определенного периода времени, то общая экспозиция должна быть разделена на тот временной интервал, который интересует исследователя. Полученная таким образом величина представляет собой среднюю величину экспозиции на единицу времени.

7.4.12. При ингаляционном поступлении, если только это не диктуется специальными задачами исследования, нет необходимости рассчитывать дозу воздействия и расчет коэффициента опасности может осуществляться по формуле (формула 7.11):

$$HQ_i = C_i/RfC, (7.11)$$

где HQ – коэффициент опасности воздействия вещества i;

C_i – уровень воздействия вещества i, мг/м³;

RfC – безопасный уровень воздействия, мг/м³.

7.4.13. Если рассчитанный коэффициент опасности (HQ) вещества не превышает единицу, то вероятность развития у человека вредных эффектов при ежедневном поступлении вещества в течение жизни незначительна и такое воздействие характеризуется как допустимое.

7.4.14. Если коэффициент опасности превышает единицу, то вероятность возникновения вредных эффектов у человека возрастает пропорционально увеличению HQ, однако точно указать величину этой вероятности невозможно.

Условия задачи следующие.

1. Объем помещения $V_{\text{пом.}} = 54 \text{ м}^3$.
2. Режим работы системы вентиляции: форточка открыта – работает, форточка закрыта – не работает. Окно герметичное, следовательно, естественная вентиляция функционирует только при открытой форточке.
3. Расход наружного воздуха $L = 20 \text{ м}^3/\text{час}$.
4. Концентрация сероводорода в помещении в начальный момент времени (перед открытием форточки) составляет $C_{\text{пом}} = 5C_{\text{пдк}}$.
5. В помещении источника загрязнения сероводородом нет, т.к. загрязнение произошло за счет атмосферного воздуха.
6. Пусть в начальный момент времени t_0 (перед открытием форточки) атмосферный воздух уже не содержит сероводород $C_{\text{атм}} = 0$.

Вопрос: «Сколько наружного воздуха $V_{\text{нар}}$ потребуется гражданину М для того, чтобы в помещении концентрация сероводорода составила $C_{\text{пом}} = C_{\text{пдк}}$?»

В основе воздухообмена заложен принцип разбавления (снижения концентрации) различных химических соединений, содержащихся в воздухе помещения и обеспечение воздуха в помещении кислородом за счет атмосферного воздуха.

Количественные соотношения, устанавливающиеся при разбавлении растворов водой, смешении растворов, газов или твердых материалов различных концентраций можно найти на основании материального баланса.

Для случая смешения двух растворов одного вещества этот баланс представляется в виде следующего уравнения:

$$C \cdot V = C' \cdot V' + C'' \cdot V'',$$

где V – объем смешанного раствора с концентрацией C ;

V' и V'' – объемы растворов, которые смешиваются и имеют концентрации C' и C'' .

Из уравнения материального баланса определяется любая из искомых величин, если заданы остальные. Например:

$$\begin{aligned} V &= V' + V''; \\ C \cdot (V' + V'') &= C' \cdot V' + C'' \cdot V'', \\ C &= (C'V' + C''V'') / (V' + V''); \end{aligned}$$

В нашем случае: $C' = C_{\text{пом}} = 5C_{\text{пдк}}$, $C'' = C_{\text{атм}} = 0$, $V' = V_{\text{пом.}} = 54 \text{ м}^3$, $V'' = V_{\text{нар}}$, $C = C_{\text{пдк}}$.

Таким образом, для нашей задачи мы получаем:

$$C = (C_{\text{пом}} \cdot V_{\text{пом.}}) / (V_{\text{пом.}} + V_{\text{нар}}).$$

Но в отличие от традиционного разбавления, когда объем V после смешивания равен $V = V' + V''$ у нас объем помещения фиксирован и имеет значение $V_{\text{пом.}} = 54 \text{ м}^3$, т.е. $V_{\text{пом.}} = V = V'$. Поэтому мы будем разбавлять воздух в помещении небольшими порциями. Для этого требуется, чтобы выполнялось условие:

$$V_{\text{пом.}} \gg \Delta V_{\text{нар.}}$$

Пусть

$$\Delta V_{\text{нар.}} = V_{\text{нар.}} / 60 = 0,33 \text{ м}^3.$$

Гошка Л.Л. Климатические системы: расчет воздухообмена в помещении

Тогда:

$$\begin{aligned}C_1 &= (C_{\text{пом}} \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) \\C_2 &= (C_1 \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) \\C_3 &= (C_2 \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) \\&\dots\dots\dots \\C_{n-1} &= (C_{n-2} \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) \\C_{\text{пдк}} = C_n &= (C_{n-1} \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}).\end{aligned}$$

Учитывая, что

$$C_{\text{пом}} = K_0 \cdot C_{\text{пдк}}, K_0 = 5,$$

Тогда наше выражение примет вид:

$$\begin{aligned}C_1 / C_{\text{пдк}} &= (K_0 \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) \\C_2 / C_{\text{пдк}} &= (K_1 \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) \\C_3 / C_{\text{пдк}} &= (K_2 \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) \\&\dots\dots\dots \\C_{n-1} / C_{\text{пдк}} &= (K_{n-2} \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) \\C_n / C_{\text{пдк}} &= (K_{n-1} \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}),\end{aligned}$$

где $K_1 = C_1 / C_{\text{пдк}}$, $K_2 = C_2 / C_{\text{пдк}}$, $\dots\dots\dots K_{n-1} = C_{n-1} / C_{\text{пдк}}$, $K_n = C_n / C_{\text{пдк}} = 1$.

Другими словами, для того чтобы определить, какой объем атмосферного воздуха ($V_{\text{нар}}$) нам необходимо подать в помещение, в котором требуется понизить концентрацию сероводорода с уровня $C_{\text{пом}} = 5 \cdot C_{\text{пдк}}$ до уровня $C_{\text{пом}} = 1 \cdot C_{\text{пдк}}$, мы на первом шаге в помещение объемом $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$ подаем наружный воздух объемом $\Delta V_{\text{нар}} = 0,33 \text{ м}^3$. При этом предполагаем, что перемешивание в объеме помещения происходит тщательно по всему объему помещения и практически моментально. Далее, сбрасывая из помещения происходит в атмосферу объем воздуха, равный $V = 0,33 \text{ м}^3$, мы тем самым предполагаем, что объем помещения у нас всегда постоянный. После первого шага концентрация сероводорода в помещении станет равной C_1 или $C_1 < C_{\text{пом}}$. Данную процедуру мы будем проделывать n раз, пока концентрация сероводорода в помещении не достигнет уровня ПДК, т.е. уровня $C_n = C_{\text{пдк}}$.

В соответствии с руководством Р 2.1.10.1920-04 величина $HQ_i = C_i / C_{\text{пдк}}$, а $K_i = C_i / C_{\text{пдк}} = HQ_{0i}$. Таким образом, мы получаем, что пошаговый коэффициент опасности воздействия сероводорода, содержащегося в воздухе помещения, имеет вид:

$$HQ_i = (HQ_{0i-1} \cdot V_{\text{пом}}) / (V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}), (1)$$

Результаты расчетов приведены в свернутой таблице №1 и изображены на рис. 1. Решением данного уравнения является следующее выражение:

$$HQ_i = HQ_0 / [(V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) / V_{\text{пом}}]^i (2)$$

где i от 1 до n .

Наша задача заключается в том, чтобы разбавить концентрацию сероводорода в воздухе помещения до такого уровня, при которой коэффициент опасности воздействия сероводорода был бы равен единице, т.е. $HQ_i = 1$ при $i=n$. Тогда выражение (2) принимает вид:

$$[(V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) / V_{\text{пом}}]^n = HQ_0 (3)$$

Прологарифмируем данное выражение:

$$n \cdot \lg[(V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) / V_{\text{пом}}] = \lg HQ_0$$

Из этого выражения находим n :

$$n = \lg HQ_0 / \lg[(V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) / V_{\text{пом}}] (4)$$

или в нашем случае:

$$n = \lg 5 / \lg[(54 + 0,33) / 54] = 264$$

Сравним его с табличным значением (таблица №1). Табличное значение составляет $n = 262$. Два данных значения хорошо согласуются между собой.

Таблица №1 Начальные данные: $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$, $\Delta V_{\text{нар}} = 0,33 \text{ м}^3$, $HQ_0 = 5$, $HQ_n = 1$, $HQ_{0 \text{ атм}} = 0$

№ п/п	$V_{\text{пом}}, \text{м}^3$	$\Delta V_{\text{нар}}, \text{м}^3$	$V = V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}, \text{м}^3$	$V_{\text{нар}}, \text{м}^3$	HQ_0	Расчет по формуле (2)	Кол-во шагов, n	$t = n/60$, часов
1	54	0,00	54,00	0,00	5,0000	5,0000	0	0,00
15	54	0,33	54,33	4,95	4,5873	4,5912	14	0,23
30	54	0,33	54,33	9,90	4,1829	4,1902	29	0,48
45	54	0,33	54,33	14,85	3,8141	3,8242	44	0,73
60	54	0,33	54,33	19,80	3,4778	3,4903	59	0,98
76	54	0,33	54,33	25,08	3,1517	3,1661	75	1,25
91	54	0,33	54,33	30,03	2,8738	2,8896	90	1,50
106	54	0,33	54,33	34,98	2,6205	2,6372	105	1,75
121	54	0,33	54,33	39,93	2,3894	2,4069	120	2,00
136	54	0,33	54,33	44,88	2,1787	2,1967	135	2,25
152	54	0,33	54,33	50,16	1,9745	1,9927	151	2,52
167	54	0,33	54,33	55,11	1,8004	1,8187	166	2,77
182	54	0,33	54,33	60,06	1,6416	1,6598	181	3,02
197	54	0,33	54,33	65,01	1,4969	1,5149	196	3,27
212	54	0,33	54,33	69,96	1,3649	1,3825	211	3,52
227	54	0,33	54,33	74,91	1,2446	1,2618	226	3,77
242	54	0,33	54,33	79,86	1,1349	1,1516	241	4,02
258	54	0,33	54,33	85,14	1,0284	1,0446	257	4,28
263	54	0,33	54,33	86,79	0,9973	1,0133	262	4,37

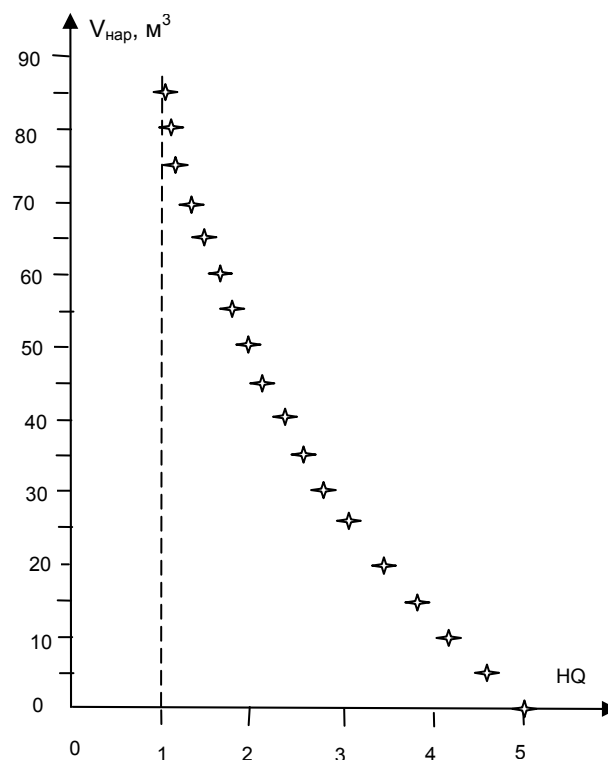


Рисунок 1. График зависимости изменения объема атмосферного воздуха в м^3 , необходимого для разбавления концентрации сероводорода в помещении со значения коэффициента опасности воздействия его от значения $HQ_0=5$ и до значения $HQ_n=1$. $V_{\text{пом}}=54 \text{ м}^3$. $HQ_{0 \text{ атм}}=0$. Расчет делался поминутно.

Далее переформулируем нашу задачу:

1. Какой объем атмосферного воздуха $V_{\text{нар}}$ в м^3 потребуется подать гражданину М в свое помещение объемом $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$, для того чтобы понизить коэффициент опасности воздействия сероводорода, который в начальный момент времени $t_0=0$ составлял $HQ_0=5$, до уровня $HQ=1$?
2. Сколько времени на это потребуется?

Тогда объем атмосферного воздуха $V_{\text{нар}}$, который нам необходимо подать в помещение, будет определяться как:

$$V_{\text{нар}} = \sum \Delta V_{i \text{ нар}},$$

где i от 1 до n ,

или

$$V_{\text{нар}} = \Delta V_{\text{нар}} \cdot n, \quad (5)$$

Подставляем в (5) расчетные значения:

$$V_{\text{нар}} = 0,33 \cdot 264 = 87,12 \text{ м}^3.$$

Полученное расчетное значение объема воздуха сопоставляем с табличным значением (Таблица №1), которое равно $V_{\text{нар}} (\text{табл}) = 86,79 \text{ м}^3$.

В выражение (5) подставляем n из (4):

$$V_{\text{нар}} = \Delta V_{\text{нар}} \cdot \lg HQ_0 / \lg [(V_{\text{пом}} + \Delta V_{\text{нар}}) / V_{\text{пом}}] \quad (6)$$

Следовательно, для того чтобы понизить коэффициент опасности воздействия сероводорода, который в начальный момент времени $t_0=0$ составлял $HQ_0=5$, до уровня $HQ=1$, гражданину М потребуется подать в свое помещение объемом $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$ атмосферный воздух в объеме не менее $V_{\text{нар}} = 87 \text{ м}^3$.

Для того чтобы процедура разбавления была ограничена по времени, каждый шаг будем делать за одну минуту. Умножим и разделим n на время:

$$n = n \cdot 1 \text{ мин} / 1 \text{ мин.}$$

Подставляем полученное выражение в (5):

$$V_{\text{нар}} = \Delta V_{\text{нар}} \cdot n \cdot 1 \text{ мин} / 1 \text{ мин.}$$

Тогда расход наружного воздуха будет равен $L' = \Delta V_{\text{нар}} / t$ ($\text{м}^3/\text{мин.}$) Величина $t' = n \cdot 1 \text{ мин}$ - это время, которое необходимо для снижения значения коэффициента опасности воздействия сероводорода, содержащегося в воздухе помещения, на организм человека с уровня $HQ_0=5$ до уровня $HQ=1$.

Тогда:

$$V_{\text{нар}} = L' \cdot t'.$$

Переведем время в часы $t = t' / 60$, а расход наружного воздуха м^3 в час $L(\text{м}^3/\text{час}) = 60 \cdot L' (\text{м}^3/\text{мин.})$. Тогда объем атмосферного воздуха ($V_{\text{нар}}$), который нам необходимо подать в помещение, можно будет определить как:

$$V_{\text{нар}} = L \cdot t \quad (7)$$

Из выражения (7) можно определить зависимость времени экспозиции в часах от расхода наружного воздуха (рис. 2):

$$t = V_{\text{нар}} / L. \quad (8)$$

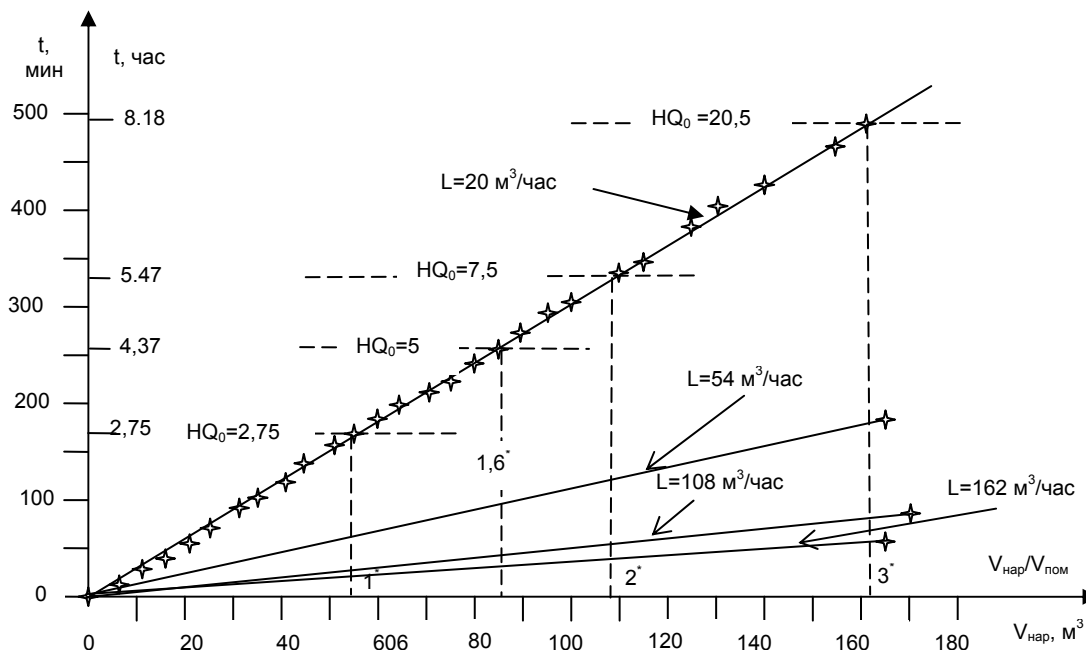


Рисунок 2. График зависимости изменения времени экспозиции от объема атмосферного воздуха в м^3 , который необходимо подать в помещение для снижения значения коэффициента опасности воздействия сероводорода на организм человека до допустимого уровня $HQ_0=1$ при различных значениях расхода наружного воздуха L . $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$. $HQ_{0 \text{ атм}} = 0$. Расчет делался поминутно.

Подставляем в (8) расчетные значения $V_{\text{нар}} = 87,12 \text{ м}^3$ и $L = 20 \text{ м}^3/\text{час}$:

$$t = 87,12 / 20 = 4,36 \text{ часа.}$$

Табличное значение (таблица №1) $t_{\text{табл}} = 4,37 \text{ часа}$, что хорошо согласуется с расчетным значением.

Подставляем в (8) выражение (6), получаем:

$$t = \Delta V_{\text{нар}} \cdot \lg HQ_0 / \lg [(V_{\text{пом.}} + \Delta V_{\text{нар}} / V_{\text{пом.}})] \cdot 1/L \quad (9)$$

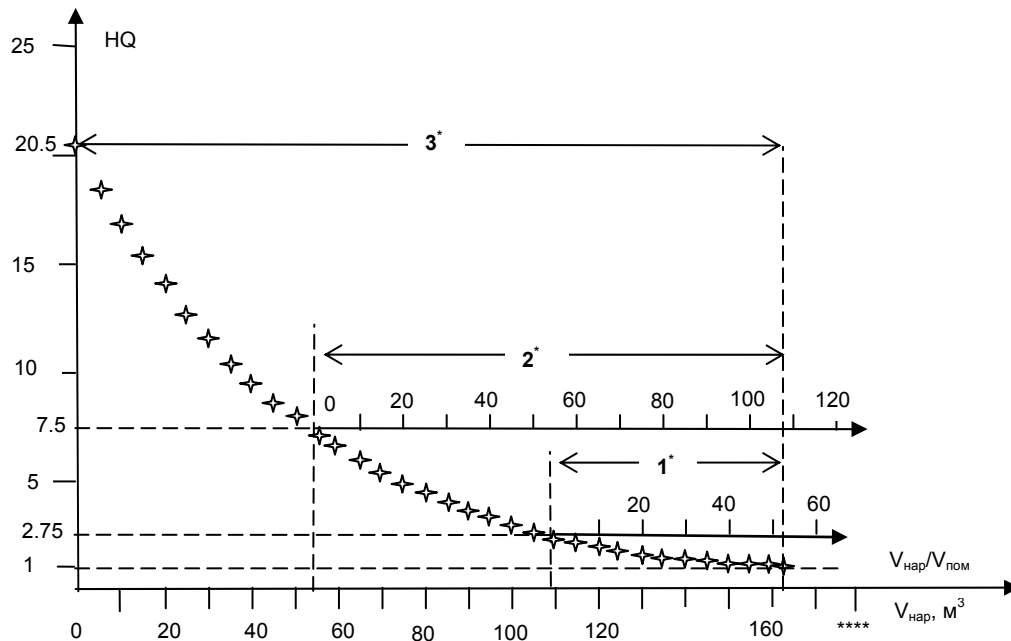


Рисунок 3. График зависимости изменения коэффициента опасности воздействия вещества от объема атмосферного воздуха в м^3 , который необходимо подать в помещение для снижения значения коэффициента опасности воздействия вещества содержащегося в воздухе помещения на организм человека до допустимого уровня $HQ_0=1$.

Объем помещения $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$. Объем наружного воздуха подаваемый в помещение $V_{\text{нар}} = 0,33 \text{ м}^3$ за одну минуту (20 м^3 за один час) . $HQ_{0 \text{ атм}} = 0$. Расчет делался поминутно.

Таким образом, если вне зависимости от химического состава воздуха известен самый высокий коэффициент опасности воздействия отдельно взятого вещества, который содержится в воздухе помещения, то при отсутствии источника загрязнения внутри помещения обеспечить качество воздуха в нем можно с течением времени при любом выбранном расходе наружного воздуха (рис. 3). Следовательно, расход наружного воздуха, или воздухообмен, влияет только на время экспозиции (рис. 4, 5). В свою очередь, время экспозиции влияет на вероятность возникновения вредных эффектов в организме человека. Вредные эффекты возрастают пропорционально увеличению коэффициента опасности воздействия вещества HQ . Поэтому, понижая расход наружного воздуха, проектировщик может увеличивать количество вредных воздействий на организм человека.

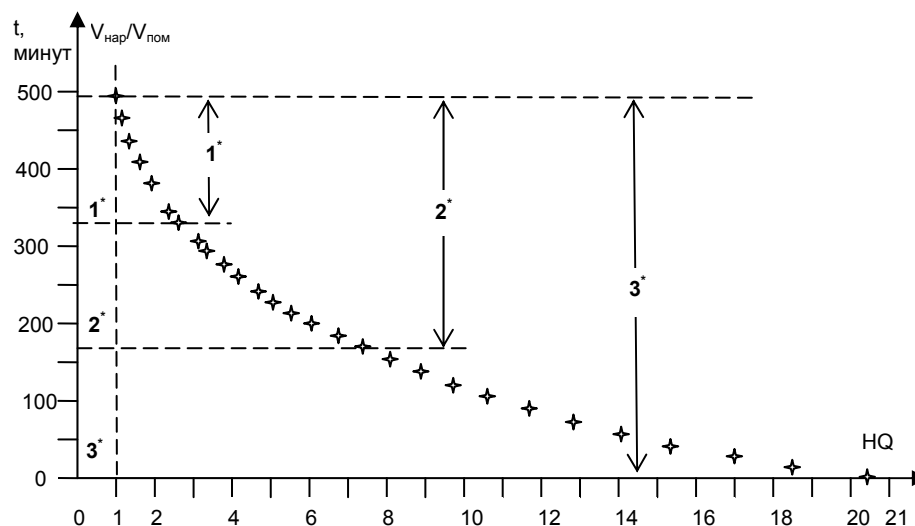


Рисунок 4. График зависимости изменения времени экспозиции при изменении коэффициента опасности воздействия вещества содержащегося в воздухе помещения. Объем помещения $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$. Объем атмосферного воздуха подаваемый в помещение $V_{\text{нар}} = 0,33 \text{ м}^3$ за одну минуту ($20 \text{ м}^3/\text{час}$). $HQ_{0 \text{ атм}} = 0$. Расчет делался поминутно.

Другими словами, проектировщик, определяя воздухообмен в помещении, может управлять рисками отрицательного воздействия воздуха в помещении на организм конечного пользователя климатических систем, варьируя через расход наружного воздуха время экспозиции (рис. 5, 6).

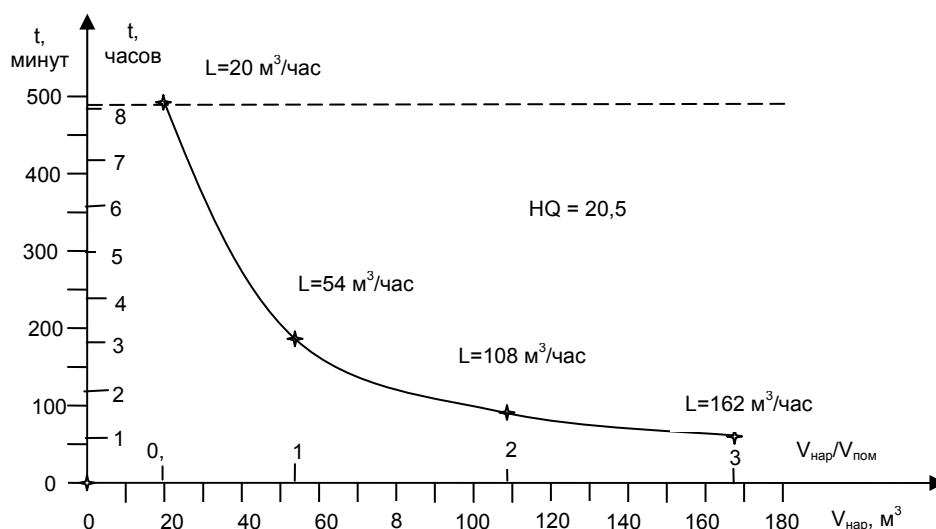


Рисунок 5. График зависимости изменения времени экспозиции от объема атмосферного воздуха в м^3 , который необходимо подать в помещение для снижения значения коэффициента опасности воздействия вещества содержащегося в воздухе помещения на организм человека до допустимого уровня $HQ_0=1$ при различных значениях расхода наружного воздуха L . При коэффициенте опасности воздействия вещества в начальный момент времени равном $HQ_0 = 20,5$. Объем помещения $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$. $HQ_{0 \text{ атм}} = 0$. Расчет делался поминутно.

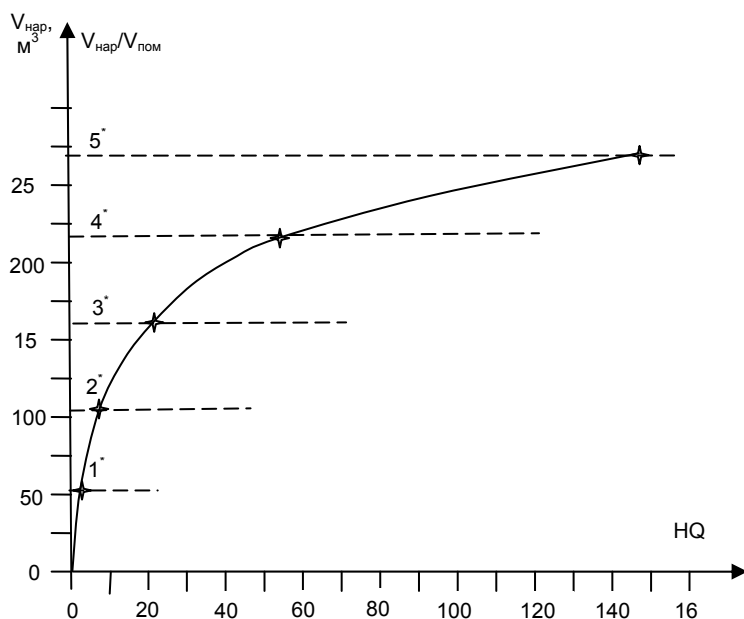


Рисунок 6. График зависимости изменения объема атмосферного воздуха в м^3 (кратности смены воздуха в помещении), который необходимо подать в помещение для снижения значения коэффициента опасности воздействия вещества, содержащегося в воздухе помещения, на организм человека до допустимого уровня $HQ_0=1$ при изменении коэффициента опасности воздействия вещества. Расчет делался поминутно

Для того чтобы в дальнейшем не повышать погрешность вычислений, будем различать:

- 1) кратность смены воздуха в помещении как отношение объема атмосферного воздуха, поступившего в помещение, к объему самого помещения, т.е. $\kappa' = V_{\text{нар}}/V_{\text{пом}}$;
- 2) кратность воздухообмена как отношение расхода наружного воздуха в м^3 в час к объему помещения, т.е. $\kappa = L/V_{\text{пом}}$.

Правую и левую часть выражения (7) разделим на $V_{\text{пом}}$.

$$V_{\text{нар}}/V_{\text{пом}} = L \cdot t/V_{\text{пом}}$$

Величина $V_{\text{нар}}/V_{\text{пом}} = \kappa'$ является кратностью смены воздуха в помещении, тогда:

$$\kappa' = L \cdot t/V_{\text{пом}},$$

или

$$t = \kappa' \cdot V_{\text{пом}} / L = \kappa' / \kappa.$$

При объеме помещения $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$ и расходе наружного воздуха $L = 20 \text{ м}^3/\text{час}$ расчетное значение коэффициента опасности воздействия вещества $HQ = 1$ будет обеспечено:

- 1) при однократной смене воздуха в помещении через $t = 2,7$ часа ($t_{\text{табл}} = 2,75$ часа, таблица №2);
- 2) при двукратной смене воздуха в помещении через $t = 5,4$ часа ($t_{\text{табл}} = 5,47$ часа);
- 3) при трехкратной смене воздуха в помещении через $t = 8,1$ часа ($t_{\text{табл}} = 8,18$ часа).

Таблица 2. Начальные данные: $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$, $\Delta V_{\text{нар}} = 0,33 \text{ м}^3$, $HQ_0 = 2,75$, $HQ_0 = 7,5$, $HQ_0 = 20,50$, $HQ_n = 1$, $HQ_{0 \text{ атм}} = 0$

№ п/п	$V_{\text{нар}}, \text{м}^3$	HQ	Кол-во шагов, n	$t = n/60$, часов	$V_{\text{нар}}, \text{м}^3$	HQ	Кол-во шагов, n	$t = n/60$, часов	$V_{\text{нар}}, \text{м}^3$	HQ	Кол-во шагов, n	$t = n/60$, часов
1	0,00	20,50	0	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
17	5,28	18,58	16	0,27	-	-	-	-	-	-	-	-
32	10,23	16,94	31	0,52	-	-	-	-	-	-	-	-
47	15,18	15,45	46	0,77	-	-	-	-	-	-	-	-
62	20,13	14,08	61	1,02	-	-	-	-	-	-	-	-
77	25,08	12,84	76	1,27	-	-	-	-	-	-	-	-
92	30,03	11,71	91	1,52	-	-	-	-	-	-	-	-
108	35,31	10,61	107	1,78	-	-	-	-	-	-	-	-
123	40,26	9,68	122	2,03	-	-	-	-	-	-	-	-
138	45,21	8,82	137	2,28	-	-	-	-	-	-	-	-
153	50,16	8,05	152	2,53	-	-	-	-	-	-	-	-
168	56,11	7,34	167	2,78	0,00	7,50	0	0,00	-	-	-	-
183	60,06	6,69	182	3,03	5,28	6,80	16	0,27	-	-	-	-
198	65,01	6,10	197	3,28	10,23	6,20	31	0,52	-	-	-	-
214	70,29	5,53	213	3,55	15,18	5,65	46	0,77	-	-	-	-
229	75,24	5,04	228	3,80	20,13	5,15	61	1,02	-	-	-	-
244	80,19	4,60	243	4,05	25,08	4,70	76	1,27	-	-	-	-
259	85,14	4,19	258	4,30	30,03	4,28	91	1,52	-	-	-	-
274	90,09	3,82	273	4,55	35,31	3,88	107	1,78	-	-	-	-
289	95,04	3,48	288	4,80	40,26	3,54	122	2,03	-	-	-	-
305	100,32	3,16	304	5,07	45,21	3,23	137	2,28	-	-	-	-
320	105,27	2,88	319	5,32	50,16	2,94	152	2,53	-	-	-	-
335	110,22	2,63	334	5,57	56,11	2,68	167	2,78	0,00	2,75	0	0,00
350	115,17	2,39	349	5,82	60,06	2,45	182	3,03	5,28	2,49	16	0,27
365	120,12	2,18	364	6,07	65,01	2,23	197	3,28	10,23	2,27	31	0,52
380	125,07	1,99	379	6,32	70,29	2,02	213	3,55	15,18	2,07	46	0,77
395	130,02	1,81	394	6,57	75,24	1,84	228	3,80	20,13	1,89	61	1,02
411	135,30	1,65	410	6,83	80,19	1,68	243	4,05	25,08	1,72	76	1,27
426	140,25	1,50	425	7,08	85,14	1,53	258	4,30	30,03	1,57	91	1,52
441	145,20	1,37	440	7,33	90,09	1,40	273	4,55	35,31	1,42	107	1,78
456	150,15	1,25	455	7,58	95,04	1,27	288	4,80	40,26	1,30	122	2,03
471	155,10	1,14	470	7,83	100,3	1,15	304	5,07	45,21	1,18	137	2,28
486	160,05	1,04	485	8,08	105,3	1,05	319	5,32	50,16	1,07	152	2,53
492	162,03	1,00	491	8,18	108,2	1,00	328	5,47	54,45	1,00	165	2,75

Пусть значение расхода наружного воздуха составляет $L = 54 \text{ м}^3/\text{час}$, а объем помещения $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$, т.е. при однократном воздухообмене и однократной смене воздуха в помещении:

$$t = \kappa' / \kappa = 1 \text{ час},$$

т.е. время экспозиции будет равно одному часу.

Определим, с какого начального коэффициента опасности воздействия вещества HQ_0 используемый однократный воздухообмен в помещении $k = 1^*$ или $L=54 \text{ м}^3/\text{час}$ может привести к максимально допустимому воздействию химических веществ на организм человека, т.е. к $HQ=1$?

Мы получили, что при однократном воздухообмене и однократной смене воздуха в помещении время экспозиции равно $t=1\text{час}$, т.е. в данном случае $n=60$ шагов. Очевидно, что на 60-м шаге $HQ=1$, а $i=n$. Тогда выражение (2) принимает вид:

$$HQ_0 = [(V_{\text{пом.}} + \Delta V_{\text{нар.}}) / V_{\text{пом.}}]^n.$$

В правой части открываем круглые скобки:

$$HQ_0 = (1 + \Delta V_{\text{нар.}} / V_{\text{пом.}})^n.$$

Учитывая, что $\Delta V_{\text{нар.}} = V_{\text{нар.}} / n$:

$$HQ_0 = [1 + V_{\text{нар.}} / (n \cdot V_{\text{пом.}})]^n,$$

а $k' = V_{\text{нар.}} / V_{\text{пом.}}$ получаем:

$$HQ_0 = [1 + k' / n]^n$$

Таким образом, при однократном воздухообмене, равном однократной смене воздуха в помещении, получаем:

$$HQ_0 = [1 + 1/60]^{60} = 2,7.$$

Таким образом, при однократном воздухообмене, равном однократной смене воздуха в помещении, можно привести начальный коэффициент опасности воздействия вещества, равный $HQ_0=2,7$ ($HQ_{0 \text{ табл.}}=2,75$, таблица №2), к допустимому значению $HQ=1$ за один час.

При достижении двукратной смены воздуха в помещении и при однократном воздухообмене время экспозиции составит:

$$t = k'/k = 2 \text{ часа},$$

т.е. $n = 120$ шагов.

Тогда коэффициент опасности воздействия вещества будет равен:

$$HQ_0 = [1 + 2/120]^{120} = 7,3 \text{ (} HQ_{0 \text{ табл.}} = 7,5 \text{)}.$$

При трехкратной смене воздуха в помещении $t = k'/k = 3 \text{ часа}$:

$$HQ_0 = [1 + 3/180]^{180} = 19,6 \text{ (} HQ_{0 \text{ табл.}} = 20,5 \text{)}.$$

При четырехкратной смене воздуха в помещении $t = k'/k = 4 \text{ часа}$:

$$HQ_0 = [1 + 4/240]^{240} = 52,8.$$

При пятикратной смене воздуха в помещении $t = k'/k = 5 \text{ часов}$:

$$HQ_0 = [1 + 5/300]^{300} = 142,4.$$

Например, при объеме помещения $V_{\text{пом.}}=54 \text{ м}^3$ и начальном коэффициенте опасности воздействия вещества $HQ_0=20,5$, для которого требуется трехкратная смена воздуха в помещении (таблица №3):

1. при однократном воздухообмене $L=54 \text{ м}^3/\text{час}$ коэффициент опасности воздействия вещества HQ будет равен $HQ = 1$ через:

$$t = k'/k = 3/1 = 3 \text{ часа (} t_{\text{табл.}} = 3,05 \text{ часа, таблица №3)};$$

2. при двукратном воздухообмене $L=108 \text{ м}^3/\text{час}$ коэффициент опасности воздействия вещества HQ будет равен $HQ = 1$ через:

$$t = k'/k = 3/1 = 1,5 \text{ часа (} t_{\text{табл.}} = 1,58 \text{ часа)};$$

3. при трехкратном воздухообмене $L=162 \text{ м}^3/\text{час}$ коэффициент опасности воздействия вещества HQ будет равен $HQ = 1$ через:

$$t = k'/k = 1/1 = 1 \text{ час (} t_{\text{табл.}} = 1,03 \text{ часа)}.$$

Вывод

Можно предположить, что одной из причин, которые приводят к так называемому «синдрому больного здания», являются химические соединения, находящиеся в воздухе помещения в особо малых концентрациях. Т.е. при концентрациях, близких к нулю, коэффициент опасности воздействия вещества уже может достигать

значений $HQ = 1$, а при высокой скорости их выделения в воздух помещения они способны повышать коэффициент опасности воздействия вещества в десятки и сотни раз.

Таблица 3. Начальные данные: $V_{\text{пом}} = 54 \text{ м}^3$, $\Delta V_{\text{нар}} = 0,9 \text{ м}^3$, $\Delta V_{\text{нар}} = 1,8 \text{ м}^3$, $\Delta V_{\text{нар}} = 2,7 \text{ м}^3$, $HQ_0 = 20,50$, $HQ_n = 1$, $HQ_{0 \text{ атм}} = 0$

№п/п	$V_{\text{пом}}, \text{м}^3$	$\Delta V_{\text{нар}}, \text{м}^3$	HQ	$V_{\text{нар}}, \text{м}^3$	$\Delta V_{\text{нар}}, \text{м}^3$	HQ	$V_{\text{нар}}, \text{м}^3$	$\Delta V_{\text{нар}}, \text{м}^3$	HQ	$V_{\text{нар}}, \text{м}^3$	Кол-во шагов, n	t = n/60, часов
1	54	0,0	20,50	0,00	0,0	20,50	0,00	0,0	20,50	0,00	0	0,00
7	54	0,9	18,56	5,40	1,8	16,84	10,80	2,7	15,30	16,20	6	0,10
13	54	0,9	16,81	10,80	1,8	13,83	21,60	2,7	11,42	32,40	12	0,20
18	54	0,9	15,48	15,30	1,8	11,74	30,60	2,7	8,94	45,90	17	0,28
24	54	0,9	14,02	20,70	1,8	9,64	41,40	2,7	6,67	62,10	23	0,38
29	54	0,9	12,90	25,20	1,8	8,19	50,40	2,7	5,23	75,60	28	0,47
35	54	0,9	11,69	30,60	1,8	6,72	61,20	2,7	3,90	91,80	34	0,57
40	54	0,9	10,76	35,10	1,8	5,71	70,20	2,7	3,06	105,30	39	0,65
46	54	0,9	9,74	40,50	1,8	4,69	81,00	2,7	2,28	121,50	45	0,75
51	54	0,9	8,97	45,00	1,8	3,98	90,00	2,7	1,79	135,00	50	0,83
57	54	0,9	8,12	50,40	1,8	3,27	100,80	2,7	1,33	151,20	56	0,93
63	54	0,9	7,36	55,80	1,8	2,68	111,60	2,7	1,00	167,40	62	1,03
68	54	0,9	6,77	60,30	1,8	2,28	120,60	-	-	-	67	1,12
74	54	0,9	6,13	65,70	1,8	1,87	131,40	-	-	-	73	1,22
79	54	0,9	5,65	70,20	1,8	1,59	140,40	-	-	-	78	1,30
85	54	0,9	5,11	75,60	1,8	1,30	151,20	-	-	-	84	1,40
90	54	0,9	4,71	80,10	1,8	1,11	160,20	-	-	-	89	1,48
96	54	0,9	4,26	85,50	1,8	0,91	171,00	-	-	-	95	1,58
101	54	0,9	3,93	90,00	-	-	-	-	-	-	100	1,67
107	54	0,9	3,55	95,40	-	-	-	-	-	-	106	1,77
113	54	0,9	3,22	100,80	-	-	-	-	-	-	112	1,87
118	54	0,9	2,96	105,30	-	-	-	-	-	-	117	1,95
124	54	0,9	2,68	110,70	-	-	-	-	-	-	123	2,05
129	54	0,9	2,47	115,20	-	-	-	-	-	-	128	2,13
135	54	0,9	2,24	120,60	-	-	-	-	-	-	134	2,23
140	54	0,9	2,06	125,10	-	-	-	-	-	-	139	2,32
146	54	0,9	1,87	130,50	-	-	-	-	-	-	145	2,42
151	54	0,9	1,72	135,00	-	-	-	-	-	-	150	2,50
157	54	0,9	1,56	140,40	-	-	-	-	-	-	156	2,60
163	54	0,9	1,41	145,80	-	-	-	-	-	-	162	2,70
168	54	0,9	1,30	150,30	-	-	-	-	-	-	167	2,78
174	54	0,9	1,17	155,70	-	-	-	-	-	-	173	2,88
179	54	0,9	1,08	160,20	-	-	-	-	-	-	178	2,97
184	54	0,9	1,00	164,70	-	-	-	-	-	-	183	3,05

Литература

1. Москвичи пережили самую грязную ночь лета // <http://www.gzt.ru/topnews/weather/256917.html>.
2. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М., 2004.

*Леонид Леонидович Гошка, г. Сыктывкар

Тел. раб.: +7 (8212) 29-10-24, факс: +7 (8212) 24-44-10; эл. почта: tookola@mail.ru

Оценка уровня надежности с учетом организационно-технологических параметров строительства линейно-протяженных сооружений

*К.т.н., докторант Г.И. Абдуллаев**

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Для оценки уровня надежности проектных решений по организации строительства линейно-протяженных сооружений (ЛПС) большое значение имеют ведущие организационно-технологические показатели. Возникающие колебания и отклонения значений различных показателей от заданных или плановых их значений, тенденции развития этих отклонений дают наибольшую возможность оценить надежность выполнения утвержденных проектных решений. На наш взгляд рассмотрение комплекса организационно-технологических показателей совместно с вероятностными характеристиками выполнения проекта дает наиболее полную оценку надежности принятой к реализации программы работ.

Для оценки надежности реализации плана можно воспользоваться следующими отклонениями показателей или параметров от заданных значений:

- объемами перераспределения рассмотренных видов ресурсов между комплексами работ и сооружениями – ΔP_i ;
- объемами привлечения дополнительных ресурсов – $\Delta P_{доп.i}$;
- размерами изменения сроков окончания комплексов работ и строительства сооружений – $\Delta T_{ок.i}$;
- величинами изменения продолжительности выполнения комплексов работ и строительства сооружений – $\Delta T_{пр.i}$;
- объемами изменения приоритетов по взаимоувязке и очередности выполнения комплексов работ и строительства сооружений – $\Delta P_{р.i}$.

Определение уровня отклонений показателей для оценки надежности реализации плана на основе организационно-технологических показателей можно осуществить по формуле

$$H_{с.н.} = \sqrt{(\Delta P_t^2 \cdot Y_p + \Delta P_{доп}^2 \cdot Y_{рд} + \Delta T_{ток}^2 \cdot Y_{то} + \Delta T_{пр}^2 \cdot Y_{тп} + \Delta P_{р}^2 \cdot Y_{пр}) / (Y_p + Y_{рд} + Y_{то} + Y_{тп} + Y_{пр})}, \quad (1)$$

где $\Delta P_t, \Delta P_{доп}, \Delta T_{ток}, \Delta T_{пр}, \Delta P_{р}$ – размеры отклонений соответствующих организационно-технологических показателей на рассматриваемый момент времени t оценки уровня надежности;

$Y_p, Y_{рд}, Y_{то}, Y_{тп}, Y_{пр}$ – коэффициенты значимости и весомости организационно-технологических показателей соответственно.

$$\text{Здесь: } \Delta P_t = \sum_{i=1}^n \Delta P_{ti} / n, \quad \Delta P_{доп} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{допi} / n; \quad \Delta T_{ток} = \sum_{i=1}^n \Delta T_{тоki} / n; \quad \Delta T_{пр} = \sum_{i=1}^n \Delta T_{прi} / n; \\ \Delta P_{р} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{ри} / n; \quad (2)$$

n – количество рассматриваемых комплексов работ и сооружений.

На основе выражения (1) можно сформировать общий подход для оценки надежности разработанного планового решения по строительству ЛПС, который представляется возможным описать следующим выражением

$$U^0 = \rho \cdot (1 - \varepsilon / U_x^2) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где ρ – коэффициент вероятности выполнения рассматриваемого комплекса строительно-монтажных работ в условиях принимаемого размера организационно-технологических параметров и объема различных ресурсов (ориентировочно можно принять 0,5 – 0,7);

ε – коэффициент, характеризующий скорость возрастания надежности плановой структуры в зависимости от степени увеличения отклонений плановых показателей от директивно заданных при их возможном увеличении (ориентировочно можно принять 0,3 – 0,8);

U_x – усредненное значение уровня отклонений принятых организационно-технологических показателей от директивно заданных, который можно определить на основе (1) с помощью выражения

$$U_x = \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \left[x_{ti} \cdot \left(\frac{T_{\text{пр}_i^{\text{д}}} - (t_{\text{ок}_i^{\text{п}}} - t_{\text{нач}_i^{\text{п}}})}{T_{\text{пр}_i^{\text{д}}}} \right) + x_{ti} \cdot \frac{(t_{\text{ок}_i^{\text{д}}} - t_{\text{ок}_i^{\text{п}}})}{T_{\text{пр}_i^{\text{д}}}} + y_{ti} \cdot \frac{(\text{Пр}_i^{\text{д}} - \text{Пр}_i^{\text{п}})}{\text{Пр}_i^{\text{д}}} \right. \right. \\ \left. \left. + x_{ti} \cdot \frac{(\Phi c_i^{\text{д}} - \Phi c_i^{\text{п}})}{\Phi c_i^{\text{д}}} + y_{ti} \cdot \frac{(A_i^{\text{д}} - A_i^{\text{п}})}{A_i^{\text{д}}} + y_{ti} \cdot \frac{(B_i^{\text{д}} - B_i^{\text{п}})}{\text{Пр}_i^{\text{д}}} + y_{ti} \cdot \frac{(M_i^{\text{д}} - M_i^{\text{п}})}{M_i^{\text{д}}} \right] \right) / n, \quad (4)$$

переменные x_{ti} и y_{ti} принимают следующие значения

$$x_{ti} = \begin{cases} 0 & \text{при } t_i \neq t_{\text{ок}_i} \\ 1 & \text{при } t_i = t_{\text{ок}_i} \end{cases} \quad \text{для всех } i = 1 \dots n, \quad t = 1 \dots T \quad (5)$$

$$x_{ti} = \begin{cases} 0 & \text{при } t_i \neq t_{\text{нач}_i} \\ 1 & \text{при } t_i = t_{\text{нач}_i} \end{cases} \quad \text{для всех } i = 1 \dots n, \quad t = 1 \dots T$$

При определении уровня отклонения ресурсов от директивно заданных значений (4) целесообразно учитывать выделенные финансовые средства Φc_i на момент окончания работ на отдельном сооружении (комплексе работ), а также технические A_i , трудовые B_i и материальные M_i ресурсы на момент начала работ. Момент начала и окончания строительства можно фиксировать с помощью переменных x и y по представленным условиям (5) и (6).

Выражение (3) отражает надежность выполнения плановой структуры при ее реализации. При этом учитывается вероятность реализации плана при нормальных условиях на основе коэффициента ρ . Одновременно на уровень итоговой надежности оказывает значительное влияние принятая степень отклонений запланированных организационно-технологических показателей от директивно заданных – U_x . Чем запланированные показатели ниже директивных, тем выше запас прочности плана и тем выше надежность принимаемого плана.

Основная идея достижения высокой надежности реализации плановой структуры заключается в формировании конкретных заданий и установок в области организации и технологии возведения сооружений, выполнение которых возможно с достаточно большим запасом времени и основных ресурсов. Одним из способов достижения необходимого уровня надежности является резервирование. Создавая резерв времени и ресурсов, достигается ощутимое повышение надежности выполнения любой программы.

Вместе с этим необходимо учитывать, что при создании резерва ресурсов возможно возникновение простаивающих технических средств и трудовых коллективов, нецелесообразное накопление материалов и конструкций, заблаговременное выделение финансовых средств. Такой вариант обеспечивает существенное возрастание экономических затрат. Однако если резерв ресурсов направить на предельно возможное сокращение сроков строительства и выполнения комплексов работ, то экономические потери минимизируются и достаточно часто обнуляются или даже принимают положительное значение. Несмотря на некоторое снижение производительности из-за излишнего насыщения фронтов работ ресурсами сокращение сроков строительства обеспечивает получение дополнительных экономических эффектов.

На основе данных рассуждений можно предложить общую стратегию построения проектных решений. Она предполагает построение плана строительства ЛПС при предельно возможном насыщении фронтов работ ресурсами и кратчайшими сроками строительства, а также при наличии определенных возможностей добавления ресурсов в необходимых случаях из резервных возможностей. Все построения должны осуществляться в пределах выделенных ресурсов и назначенных сроков строительства при достижении определенных резервов во времени и ресурсах.

В этой связи разработка проектных решений должна осуществляться при четком выполнении установленных требований по продолжительности строительства отдельных сооружений, срокам окончания работ, соблюдении установленной очередности и приоритетов, использовании ресурсов в пределах выделенных объемов:

$$T \leq T_d; T_{пр_i}^П = t_{ок_i}^П - t_{нач_i}^П \leq T_d; t_{ок_i}^П \leq T_d; Pr_i^Д \leq Pr_i^П \text{ для всех } i = 1 \dots n,$$

$$\sum_{i=1}^n \Phi c_{it}^П \leq \Phi c_t^Д; \sum_{i=1}^n A_{it}^П \leq A_t^Д; \sum_{i=1}^n B_{it}^П \leq B_t^Д; \sum_{i=1}^n M_{it}^П \leq M_t^Д \text{ для всех } t = 1 \dots T.$$

Здесь: $\Phi c_{it}^П$, $A_{it}^П$, $B_{it}^П$, $M_{it}^П$ – объемы инвестиций, технических, трудовых и материальных ресурсов, потребных в соответствии с планом на каждом i -м сооружении (комплексе работ) в каждый t -ый момент времени;

$\Phi c_t^Д$, $A_t^Д$, $B_t^Д$, $M_t^Д$ – объемы инвестиций, технических, трудовых и материальных ресурсов, установленных инвестирующим и управляющим органом в каждый t -й момент времени строительства ЛПС;

$t_{нач_i}^П$ и $t_{ок_i}^П$, $T_{пр_i}^П$ – сроки начала и окончания строительства i -го сооружения и его продолжительность возведения по разрабатываемому плану;

T_d – директивный срок строительства всего комплекса ЛПС;

$Pr_i^Д$ и $Pr_i^П$ – значения приоритетов по i -му сооружению, заданных директивно и полученных при формировании плана соответственно.

Литература

1. Заренин Ю.Г., Збырко М.Д и др. Надежность и эффективность АСУ. М., 1975.
2. Хастингс Н., Пикок Д. Справочник по статистическим распределениям. М., 1980.
3. Маилян Л.Р. и др. Справочник современного строителя. Ростов-на Дону», 2006.
4. Гинзбург А.В. Автоматизация проектирования организационно-технологической надежности строительства. М., 1999.
5. Гусаков А.А. Организационно-технологическая надежность строительного производства в условиях автоматизированных систем проектирования. М., 1994.

* Гасым Исрафилъ оглы Абдуллаев, Санкт-Петербург

Тел. раб.: +7(812) 297-59-49

Курсы повышения квалификации



Приглашаются специалисты строительных и проектных организаций, в том числе непосредственно занятые в сфере строительного производства.

Курсы проводятся в течение 2-3 недель в вечернее время на базе факультета или на территории заказчика. По окончании слушателям выдается удостоверение о повышении квалификации государственного образца.

Курсы проводятся по следующим направлениям:

Наименование курса	Продолжительность	Стоимость
<i>Выполнение функций заказчика-застройщика</i>	<i>2 недели</i>	<i>10000</i>
<i>Управление строительной организацией</i>	<i>2 недели</i>	<i>15000</i>
<i>Технология и контроль качества строительства</i>	<i>3 недели</i>	<i>18000</i>
<i>Разработка проектов организации строительства</i>	<i>2 недели</i>	<i>11000</i>
<i>Проектирование металлических конструкций</i>	<i>2 недели</i>	<i>12000</i>
<i>Календарно-сетевое планирование в строительстве</i>	<i>2 недели</i>	<i>10000</i>
<i>Проектирование и монтаж систем вентиляции</i>	<i>2 недели</i>	<i>12000</i>
<i>Проектирование и монтаж систем отопления</i>	<i>2 недели</i>	<i>10000</i>
<i>Электроснабжение и электрооборудование объектов</i>	<i>2 недели</i>	<i>11000</i>
<i>Обследование зданий и сооружений</i>	<i>2 недели</i>	<i>12000</i>
<i>Геодезические разбивочные работы в строительстве</i>	<i>2 недели</i>	<i>15000</i>
<i>Сметное дело в строительстве</i>	<i>2 недели</i>	<i>18000</i>

Возможен подбор преподавателей и организация корпоративного курса по любой интересующей заказчика тематике в сфере строительства. Курсы проводятся как на базе факультета, так и на территории заказчика.

Университет также проводит корпоративный курс «Основы строительного дела», предназначенный для сотрудников строительных организаций, не занятых непосредственно в производстве (менеджеров, юристов, экономистов и т.п.).



Курсы профессиональной подготовки

Курсы предназначены для специалистов строительных и проектных организаций, желающих овладеть работой в программных продуктах для автоматизированного проектирования, расчета строительных конструкций, календарного и сетевого планирования.

Курсы проводятся в течение 1-2 недель в вечернее время на базе факультета. Возможна организация курса на территории заказчика в удобное ему время.

Наименование курса	Продолжительность	Стоимость
<i>Проектирование зданий и сооружений с использованием <u>AutoCAD</u></i>	<i>8 дней</i>	<i>7000</i>
<i>Проектирование строительных конструкций с использованием <u>SCAD Office</u></i>	<i>8 дней</i>	<i>12000</i>
<i>Проектирование зданий и сооружений с использованием <u>Allplan</u></i>	<i>2 недели</i>	<i>7000</i>
<i>Планирование и управление строительными проектами с использованием <u>MS Project</u></i>	<i>5 дней</i>	<i>7000</i>

Контакты

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 301

552-94-60, 535-79-92

stroikursi@mail.ru

www.stroikursi.spb.ru

