

На правах рукописи



Мишнёв Максим Владимирович

**СЭНДВИЧЕВЫЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫЕ ОБОЛОЧКИ
С МИНЕРАЛОВАТНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ**

Специальность 05.23.01 – «Строительные конструкции,
здания и сооружения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
2007

Работа выполнена на кафедре «Строительные конструкции и инженерные сооружения» ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Асташкин Владимир Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ягофаров Хабид Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Шматков Сергей Борисович

Ведущая организация – ОАО «УРАЛГИПРОМЕЗ», г. Екатеринбург

Защита состоится «9» ноября 2007 года, в 14.00, на заседании диссертационного совета ДМ 212.298.08 при ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 76, Южно-Уральский государственный университет, главный корпус, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан 8 октября 2007 года.

Отзыв на автореферат (2 экз.), заверенный печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 76, ЮУрГУ, диссертационный совет ДМ 212.298.08.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., проф., советник РААСН



Б. Я. Трофимов

Актуальность темы. В настоящее время одной из значимых сфер применения стеклопластиков является изготовление из них коррозионно-стойких сооружений предприятий промышленности и энергетики, подверженных совместному воздействию агрессивных технологических сред, повышенных температур и механических нагрузок.

Одним из основных элементов рассматриваемых сооружений являются замкнутые цилиндрические оболочки из стеклопластика, наиболее естественным и технологичным способом изготовления которых является способ намотки. При больших диаметрах хорошими технико-экономическими показателями обладают оболочки с сэндвичевой (трехслойной) структурой стенки, включающей разнесенные тонкие стеклопластиковые обшивки, соединенные относительно толстым слоем конструкционного легкого заполнителя.

Современные стеклопластики стабильно работают при температурах до 300 °С, тогда как применяемые в заполнителях пенопласты – до 100 °С, что ограничивает температурный диапазон применения сэндвичевых стеклопластиковых оболочек. Выполнение заполнителей из более дорогих и менее распространенных материалов, например сотовых, снижает экономическую эффективность конструкций.

Поэтому разработка и исследование сэндвичевых оболочек с заполнителем, не ограничивающим температурную область применения и доступным по цене, является *актуальной задачей*.

Распространенным материалом с температурой применения до 400 °С являются минераловатные плиты, использование которых в качестве заполнителя оболочек снимет ограничение по теплостойкости. Однако механические свойства минераловатных плит недостаточно изучены, и работа оболочек с таким заполнителем не исследована.

Целью работы является выявление особенностей формирования НДС и несущей способности сэндвичевых стеклопластиковых оболочек с минераловатным заполнителем и оценка возможности их применения в конструкциях газоотводящих трактов.

Объектом исследования является сэндвичевая стеклопластиковая оболочка с минераловатным заполнителем, **предметом исследования** является ее НДС и устойчивость при эксплуатации в газоотводящих стволах и газоходах.

Научная новизна работы заключается:

- в получении новых количественных данных о механических свойствах жестких минераловатных плит на основе базальтового волокна и в обосновании возможности их применения в среднем слое сэндвичевых стеклопластиковых оболочек;

- в результатах оценки влияния разных способов конечноэлементного моделирования трехслойных оболочек на сходимость и результаты расчета устойчивости с применением методов, имеющихся в пакете ANSYS;

- в получении новых количественных и качественных данных о совместном влиянии низких механических свойств заполнителя и конструктивных параметров сэндвичевых оболочек на их НДС и устойчивость при кратковременных силовых и тепловых воздействиях.

Практическая значимость работы состоит:

- в разработке и внедрении в производство конструктивно-технологических решений сэндвичевых стеклопластиковых оболочек с минераловатным заполнителем, что расширило температурный диапазон применения конструкций данного типа;

- в разработке программного модуля к пакету ANSYS, предназначенного для расчета многослойных цилиндрических оболочек газоотводящих трактов и емкостей на силовые и тепловые воздействия.

Внедрение результатов. На основе результатов работы в 2004–2006 г. для ряда газоотводящих трактов были запроектированы, изготовлены и введены в эксплуатацию газоотводящие стволы из сэндвичевых оболочек диаметром 2,8...5,0 м с минераловатным заполнителем. Конструкции эксплуатируются на аглофабрике Магнитогорского металлургического комбината, горно-обогатительном комбинате в г. Гае, ТЭЦ Добринского сахарного завода в Липецкой обл., металлургическом заводе им. Серова в г. Серове Свердловской области. С использованием результатов работы разработаны ТУ 2296-001-78827965-2007 «Трубы газоотводящие из стеклопластика на эпоксидном связующем».

На защиту выносятся:

- разработанные конструктивно-технологические решения сэндвичевых стеклопластиковых оболочек с минераловатным заполнителем;

- новые экспериментальные данные о механических свойствах минераловатных плит различных марок;

- разработанный программный модуль к пакету ANSYS, предназначенный для расчета многослойных оболочек газоотводящих трактов и емкостей;

- результаты оценки влияния разных способов конечноэлементного моделирования трехслойных оболочек на сходимость и результаты расчета устойчивости с применением методов, имеющихся в пакете ANSYS;

- результаты оценки влияния конструктивных параметров сэндвичевых стеклопластиковых оболочек с минераловатным заполнителем на их НДС и устойчивость при силовых и тепловых воздействиях.

Достоверность полученных результатов и основывающихся на них выводов обеспечивается физической корректностью моделей конструкций, построенных на основе конечных элементов и численных методов, заложенных в сертифицированный у нас и за рубежом пакет ANSYS, а также

сопоставлением результатов численных расчетов с натурными экспериментами и известными аналитическими решениями.

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах (4 в изданиях из перечня ВАК) и докладывались на ежегодных научно-технических конференциях кафедры «Строительные конструкции и инженерные сооружения» ЮУрГУ (Челябинск, 04.2005, 04.2006, 04.2007) и на 7-й международной конференции пользователей программного обеспечения CADFEM GMBH (Москва, 23–24.05.2007).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы и приложений. Объем диссертации – 223 страницы, в число которых входит 208 страниц текста, 184 рисунка, 26 таблиц, список литературы из 155 наименований, 2 страницы приложений.

Во *введении* обоснована актуальность рассматриваемой темы и освещены основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* рассмотрены области применения, условия эксплуатации, конструктивно-технологические решения крупногабаритных стеклопластиковых оболочек, а также методы их расчета.

Показано, что крупногабаритные стеклопластиковые оболочки широко применяются у нас в стране и за рубежом в газоотводящих стволах в решетчатых башнях и железобетонных трубах, газоходах, емкостях и аппаратах химической промышленности, подземных трубопроводах, вертикальных резервуарах.

Исследованием коррозионностойких оболочечных конструкций у нас в стране занимались: НИИХИММАШ – Научно исследовательский и конструкторский институт химического машиностроения (Горянова А. В., Обухов А. С. и др.); ВНИИСПВ – Всесоюзный научно-исследовательский институт стеклопластиков и стекловолокна (Альперин В. И., Георгиевский О. В., Наумец В. Н., Власов П. В. и др.), МИХМ – Московский институт химического машиностроения (Шевченко А. А., Муров В. А. и др.), ЧПИ – Челябинский политехнический институт (Асташкин В. М., Иванов С. Г., Пазуцан В. А., Пуц И. И., Терещук С. В. и др.) Наиболее активно внедрением коррозионностойких стеклопластиковых конструкций в строительстве занимались ПИ «Проектхимзащита» и трест «Востокхимзащита». В настоящее время изготовлением крупногабаритных стеклопластиковых конструкций у нас в стране занимаются предприятия ЗАО «АЗОС», ЗАО «СП Компитал», ЗАО «Полимерспецстрой», ООО НПО «Полимер-Стройконструкция» и др.

Поскольку рассматриваемые конструкции одновременно должны отвечать требованиям химической стойкости, теплостойкости и прочности, наиболее оправданными для них являются комплексные слоистые структуры стенки, включающие в себя химстойкие, несущие и теплоизоляционные

слои. Наиболее широкое распространение получили следующие типы структур слоистых стенок оболочек: *однослойные* стеклопластиковые с внутренним защитным химстойким гелкоут-слоем с повышенным содержанием связующего; *однослойные ребренные и гофрированные*; *бипласт-массовые* с химстойким слоем из термопласта и наружным слоем из стеклопластика; *сэндвичевые (трехслойные)*.

При больших диаметрах хорошие технико-экономические показатели имеют оболочки с сэндвичевой (трехслойной) структурой стенки, включающей разнесенные тонкие стеклопластиковые обшивки, соединенные относительно толстым слоем легкого заполнителя, обеспечивающего их совместную работу. В таких конструкциях заполнитель работает на сдвиг и поперечное обжатие, а обшивки на нормальные усилия.

Основным преимуществом сэндвичевых оболочек является высокая жесткость при малой массе и низкой материалоемкости. Однако, как уже отмечалось выше, в настоящее время температурный диапазон применения таких оболочек ограничен, и расширить его можно, выполняя заполнитель из минераловатных плит.

Исследованием тепло- и звукоизоляционных свойств, а также долговечности минераловатных изделий в нашей стране занимались МИСИ им. В. В. Куйбышева, ВНИИТеплоизоляции, ЦНИИПромзданий, ВНИПИ-Теплопроект и др. организации. Сведения об исследованиях жесткостных и прочностных свойств минераловатных плит в литературе отсутствуют. Для проведения исследований НДС и устойчивости оболочек с минераловатным заполнителем, необходимых для обоснования возможности их применения в конструкциях газоотводящих трактов, предварительно необходимо провести экспериментальные исследования недостающих свойств минераловатных плит.

В настоящее время трехслойные пластины и оболочки рассматриваются как частный случай объектов теории многослойных анизотропных оболочек, являющейся расширением классической теории оболочек, и охватывающей более широкий класс оболочечных конструкций.

Основываясь на различных подходах теории анизотропных оболочек аналитические выражения можно получить для решения лишь ограниченного круга задач НДС и устойчивости, при этом, как правило, сложно учесть локальные эффекты и воздействия. Численные методы позволяют отказаться от ряда допущений и учитывать локальные эффекты. Накопленный теоретический опыт аккумулируется в современных расчетных комплексах, основывающихся на методе конечных элементов. В некоторых из них, например в ANSYS, есть встроенные языки программирования, позволяющие создавать пользовательские программные модули для расчета требуемого вида конструкций.

В совокупности все вышеизложенное определило *задачи исследования*: 1) разработать конструктивно-технологические решения сэндвичевых стеклопластиковых оболочек с минераловатным наполнителем; 2) выбрать методику и провести экспериментальное исследование отсутствующих в литературе механических свойств минераловатных плит различных марок; 3) разработать на базе пакета ANSYS программный модуль для расчета многослойных оболочек при различных условиях закрепления, силовых и тепловых воздействиях; 4) оценить достоверность получаемых результатов численных исследований путем экспериментальной проверки и сравнения решений тестовых задач, имеющих аналитические решения; 5) провести численные исследования НДС и устойчивости оболочек с минераловатным наполнителем, чтобы определить возможность их использования в конструкциях газоотводящих трактов с различными условиями эксплуатации; 6) выявить наиболее нагруженные участки и предложить конструктивные мероприятия, повышающие несущую способность оболочек.

Во второй главе описаны разработанные и запатентованные конструктивно-технологические решения сэндвичевых оболочек: *трехслойная* (рис. 1) и *пятислойная* (рис. 2) оболочки с наполнителем из жестких минераловатных плит на основе базальтового волокна и *оболочка с наполнителем в виде конструкционно-теплоизоляционного элемента* на основе мягких или полужестких минераловатных плит и армирующих прослоек (рис. 1–3).

Жесткие минераловатные плиты обладают достаточной трансверсальной жесткостью для восприятия при изготовлении оболочки давления наматываемой стеклоткани, однако в первоначальном виде они не обладают достаточной для намотки оболочек гибкостью. Чтобы плиты могли огибать оправку при намотке, в них при помощи специально разработанного оборудования выполняются прорезы, повышающие их гибкость. Для улучшения совместности работы обшивок в оболочках с минераловатным наполнителем могут быть выполнены кольцевые связующие элементы (КСЭ).

Теплостойкость трехслойной оболочки с минераловатным наполнителем определяется теплостойкостью внутренней стеклопластиковой обшивки, при этом наружная обшивка теплоизолирована и выполняется на основе более дешевых связующих низкой теплостойкости.

Пятислойная оболочка применяется, когда толщины одной минераловатной плиты не достаточно для обеспечения требуемой жесткости сечения. В состав стенки пятислойной оболочки помимо внутренней и наружной обшивок входит средний конструкционный стеклопластиковый слой, соединенный с обшивками внутренним и наружным слоями минераловатного наполнителя и КСЭ. Такая оболочка обладает повышенной надежностью, поскольку при высокой температуре жесткость внутренней обшивки падает, и она выключается из работы, в этом случае в работу

включается теплоизолированный средний стеклопластиковый слой, и оболочка продолжает работать как сэндвичевая.

Мягкие и полужесткие минераловатные плиты дешевле и легче жестких, но сминаются при намотке от давления стеклоткани. Для изготовления среднего слоя оболочек разработан конструкционно-теплоизоляционный элемент (КТЭ), состоящий из полос минераловатных плит, наклеенных на гибкую подложку, и установленных между полосами стеклопластиковых армирующих пластинок (рис. 3). КТЭ обладает достаточной для намотки трансверсальной жесткостью и высокой гибкостью, он изготавливается по технологии, близкой к технологии изготовления минераловатных матов вертикальной слоистости.

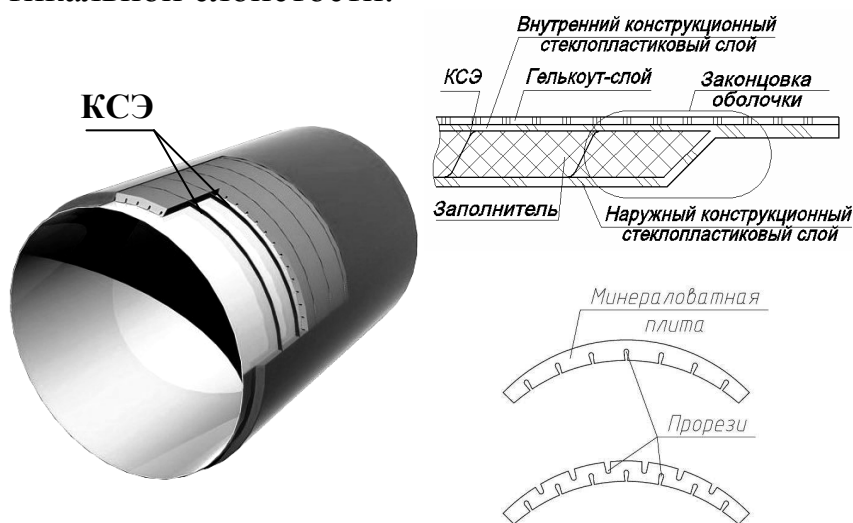


Рис. 1. Трехслойная оболочка и схема подрезки минераловатных плит

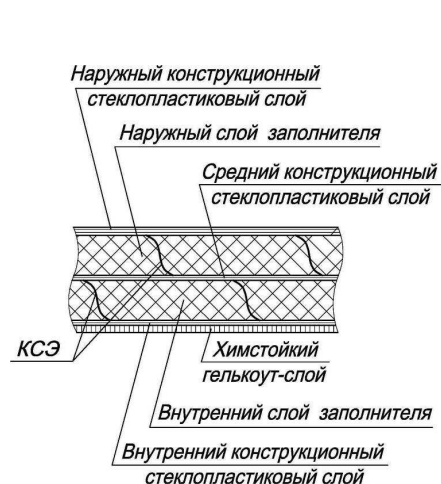


Рис. 2. Продольное сечение пятислойной оболочки

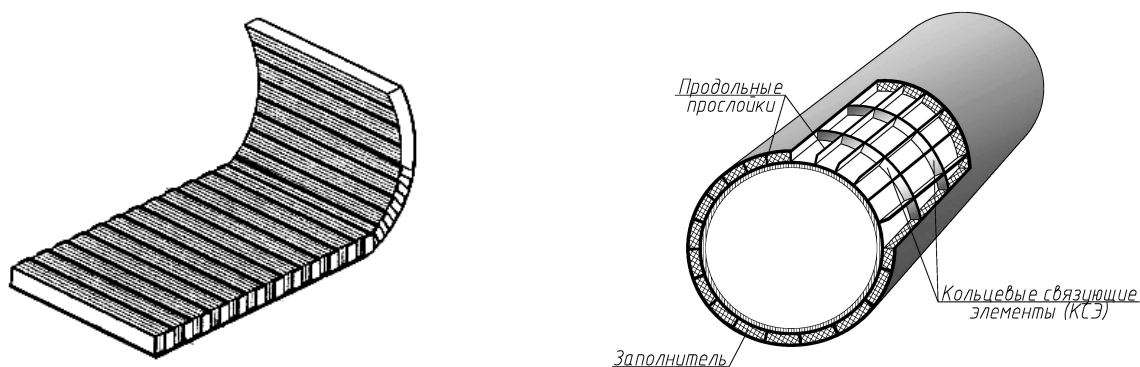


Рис. 3. Конструкционно-теплоизоляционный элемент и оболочка с наполнителем на его основе

В третьей главе изложена методика экспериментального исследования механических свойств минераловатных плит различных марок при работе на сдвиг.

Для исследования было выбрано несколько распространенных марок минераловатных плит различной плотности. Из них была отобрана базовая марка, для которой определялись модуль сдвига (G_{xy}) и прочность на срез

(T_{xy}) по методу сдвоенных образцов (рис. 4). Для остальных марок модуль сдвига и прочность на срез непосредственно не определялись, но были проведены испытания по методике, применяемой для испытаний грунтов на срез, и получены коэффициенты перехода для определения механических свойств относительно базовой марки.

Результаты исследований показали, что модуль сдвига минераловатных плит по методу сдвоенных образцов необходимо определять с учетом изгиба образцов, который при низком модуле поперечной деформации E_x существенно влияет на получаемые результаты. Поэтому вместо приводимой в литературе формулы, не учитывающей изгиб образцов, для определения G_{xy} применялась формула:

$$G_{xy} = \frac{P \cdot A^2 \cdot H \cdot E_x}{2(d_{exp} \cdot E_x \cdot A^3 \cdot B - 2 \cdot P \cdot H^3)}$$

Жесткостные характеристики минераловатных плит при комнатной температуре на порядок ниже аналогичных свойств конструкционных пенопластов, что позволяет характеризовать минераловатный наполнитель как сверхслабый. На рис. 5,а представлены гистограммы относительных частот w_t распределения значений прочности на срез в продольном направлении T_{xy} (МПа) минераловатных плит марки Limerock Руф-В, на рис. 5,б – относительных частот w_g распределения значений модуля сдвига G_{xy} .

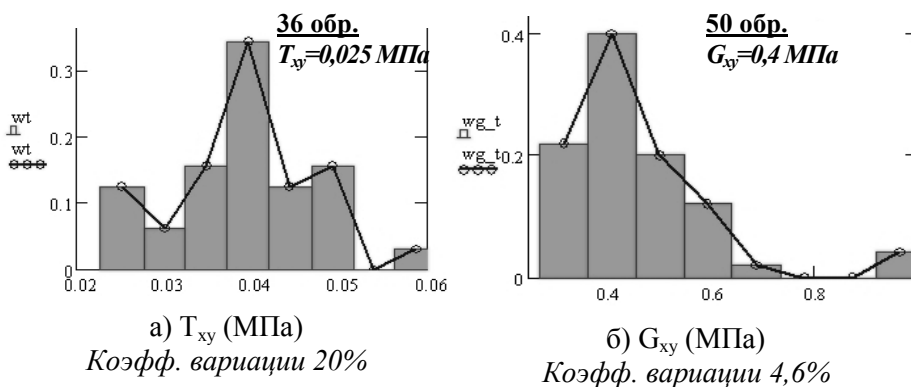
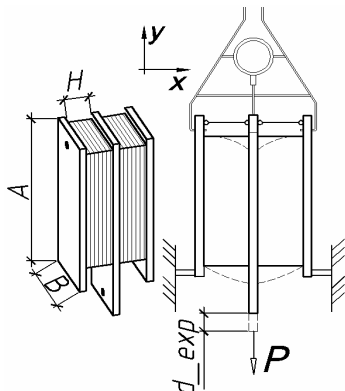


Рис. 4. Схема испытаний

Рис. 5. Гистограмма относительных частот распределения: а) прочности на срез T_{xy} ; б) модуля сдвига G_{xy}

Исследованные типы минераловатных плит обладают низкими, но относительно стабильными механическими свойствами в пределах одной партии. Численные исследования влияния подрезки на G_{xy} показали, что в зависимости от глубины прорезей модуль сдвига снижается на 10...40%. Это необходимо учитывать при задании свойств наполнителя в расчетах сэндвичевых стеклопластиковых оболочек, а при их изготовлении стремиться к выполнению прорезей минимально достаточной глубины. Экспериментальная проверка показала, что при воздействии температуры 200 °С кратковременный модуль сдвига минераловатных плит не снижается.

Также получены данные о термодеструкции и температурной зависимости упругих свойств нескольких новых эпоксидных стеклопластиков, которые свидетельствуют о возможности их применения в сэндвичевых стеклопластиковых оболочках, длительно эксплуатирующихся при температуре до 200 °С.

В *четвертой главе* дано описание разработанного модуля к пакету ANSYS для расчета многослойных оболочек газоотводящих трактов и емкостей и выполнена проверка получаемых в нем результатов расчета с натурным экспериментом и известными аналитическими решениями.

Разработанный на встроенном в ANSYS языке программирования APDL программный модуль предназначен для расчета НДС и устойчивости многослойных оболочек при различных видах силовых и тепловых воздействий, он позволяет автоматически формировать расчетные схемы оболочек различных типов при разных сочетаниях нагрузок и условиях закрепления. В модуле предусмотрено моделирование сэндвичевых оболочек стандартным способом при помощи многослойных элементов из библиотеки ANSYS, а также предлагаемым способом, при котором стеклопластиковые тонкостенные элементы сэндвичевых оболочек моделируются оболочечными элементами (shell), а наполнитель объемными элементами (solid). Последний способ позволяет осуществить единый подход к расчету оболочек различных классов, учитывать общий случай анизотропии свойств наполнителя, действие локальных нагрузок, моделировать локальные особенности геометрии оболочек, КСЭ в толще среднего слоя, исследовать влияние повреждений наполнителя на НДС и устойчивость оболочки.

Для повышения точности расчетов оболочек степень сгущения сетки повышается с увеличением кривизны конструкции. Был определен оптимальный относительный размер оболочечного элемента обшивок равный $1/20$ радиуса оболочки, который использовался при дальнейших численных исследованиях.

Для проверки результатов расчета *устойчивости* по применяемой методике, на примере решения тестовой задачи по определению критической нагрузки шарнирно закрепленных по торцам трехслойных цилиндрических оболочек, нагруженных равномерным внешним давлением, выполнено сопоставление с известными аналитическими решениями Куршина, Григолюка и Чулкова. В ANSYS задача решалась с использованием методов: Subspace iteration (SI), Block Lanczos (BL). Моделирование оболочек выполнялось как стандартным способом (конечный элемент (КЭ) Shell181 с трехслойным сечением), так и предлагаемым способом: обшивки моделируются КЭ оболочки Shell181, наполнитель объемными КЭ Solid185. Рассматривались оболочки средней длины ($D < L < 4D$), являющиеся основным объектом исследования, и длинные ($L \gg D$), где L – длина оболочки, D – диаметр. Также рассматривалось два типа наполнителя: слабый (трансверсальный модуль деформации 6 МПа, модуль сдвига 4 МПа) и сверхслабый (трансверсальный модуль деформации 0,6 МПа, модуль сдвига 0,4 МПа). Свойства

заполнителя первого типа соответствуют конструкционным пенопластам, второго – жестким минераловатным плитам.

Моделирование трехслойных оболочек предложенным способом показало для оболочек со сверхслабым наполнителем лучшую сходимость при расчете методами BL и SI, тогда как использование стандартного способа во многих рассмотренных случаях не позволило получить искомого решения. Максимальное расхождение с аналитическими результатами для оболочек средней длины не превышает 15%. Из вышесказанного следует, что предлагаемый способ моделирования улучшает сходимость решения по сравнению со стандартным и позволяет решать задачи устойчивости трехслойных оболочек при больших диапазонах варьирования геометрии и свойств материалов.

Для проверки расчета по применяемой методике деформаций было выполнено сравнение результатов с натурным экспериментом, который проводился на трех трехслойных оболочках $D=3,0$ м с минераловатным наполнителем, изготовленных для дымовой трубы на горно-обогатительном комбинате в г. Гае. Упругие характеристики и плотность входивших в состав оболочки конструкционных материалов определялись на основании испытаний образцов-свидетелей, полученных при изготовлении оболочки.

После изготовления, отверждения и снятия с оправки оболочки укладывались на сплошное жесткое основание и деформировались от собственного веса. При этом фиксировались их начальные размеры и размеры после деформации. Разница расчетных и экспериментальных перемещений точек контура оболочки составила от 5 до 20%, что может считаться хорошим совпадением расчета и эксперимента.

В пятой главе приведены результаты численных исследований НДС и устойчивости сэндвичевых оболочек с минераловатным наполнителем.

Исследования выполнялись для следующих типов сооружений и условий эксплуатации: горизонтально складываемые оболочки на предэксплуатационной стадии; вертикальные оболочки газоотводящих стволов при ветровой нагрузке (расчетное значение ветрового давления для VII ветрового района на высоте 150 м с учетом пульсации), температуре газов 200 °С, наружной температуре –30 °С; горизонтальные газоходы при внутреннем разрежении (5 кПа).

Исследования НДС. Рассматривались оболочки с раструбными торцами. В разработанном модуле детально моделируется геометрия раструба, что позволило анализировать НДС в зоне законцовки оболочки, т. е. месте соединения внутренней и наружной обшивок.

С использованием модуля оптимизации ANSYS для оболочек диаметрами 0,5...5,0 м, горизонтально складываемых на *предэксплуатационной стадии*, были определены требуемые параметры (толщины обшивок и заполнителя) исходя из ограничений по второй группе предельных состояний: перемещений точек контура ($D/100$) и относительных удлинений гелькоут-слоя (0,1% согласно работам В. И. Альперина из условия герметичности). Полученные параметры оболочек соответствуют минимальной стоимости материалов на 1 м^2 поверхности оболочки и удовлетворяют ограничениям. Стоимость материалов в зависимости от диаметра оболочек с минераловатным заполнителем показана на рис. 6.

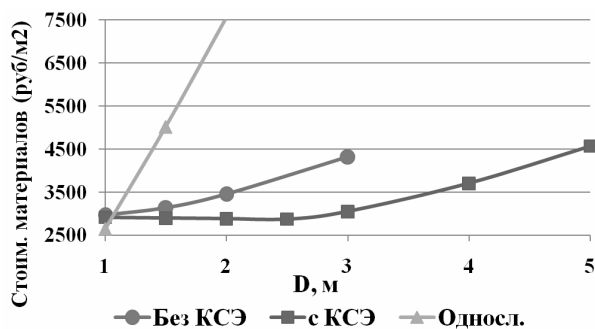


Рис. 6. Стоимость материалов однослойных, трехслойных без КСЭ и трехслойных с КСЭ оболочек при параметрах, подобранных из ограничений по II гр. предельных состояний

Анализ НДС оболочек на предэксплуатационной стадии показал, что при подобранных параметрах запас по прочности получается не менее чем двукратный. Касательные напряжения в минераловатном заполнителе в 5...10 раз ниже значений разрушающих напряжений, полученных в главе 3. Наибольшие напряжения в стеклопластиковых элементах наблюдаются в законцовках оболочек, где они более чем в 2 раза выше, чем в средней части.

Также исследования показали, что выполнение в среднем слое оболочек с минераловатным заполнителем КСЭ снижает деформативность их контура. При этом снижается требуемая толщина обшивок и, как следствие, стоимость материалов оболочки (рис. 6). В итоге был сделан вывод о том, что в случаях, когда для оболочек определяющими являются нагрузки предэксплуатационной стадии, их рекомендуется выполнять при диаметре до 1,0 м однослойными, при диаметрах более 1,0 м – сэндвичевыми с КСЭ. Для малонагруженных оболочек диаметрами до 2,0 м с минераловатным заполнителем КСЭ в среднем слое допускается не выполнять.

Подобранные для предэксплуатационной стадии параметры принимались в качестве начальных при исследовании оболочек на стадии эксплуатации. В КЭ моделях вертикальных оболочек связи по перемещениям прикладывались к верхним торцам, нижний торец оставался свободным, что соответствует условиям закрепления натуральных оболочек с раструбным стыком (рис. 7).

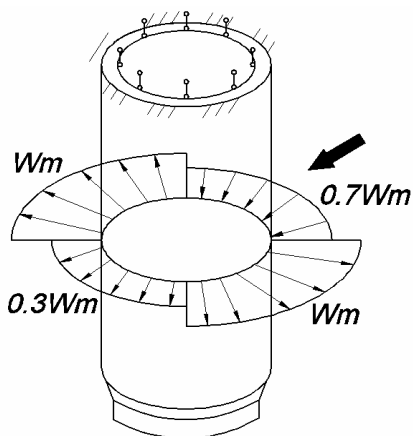


Рис. 7. Расчетная схема оболочки при действии ветрового давления (VII ветровой р-н, на высоте 150 м, с учетом пульсационной составляющей)

Прочностных и жесткостных свойств минераловатного заполнителя достаточно для выполнения условий первой и второй групп предельных состояний.

При температуре внутренней обшивки $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$, наружной $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и отсутствии ветровой нагрузки (что соответствует условиям эксплуатации внутренних газоотводящих стволов в ж/б трубах) условия первой и второй групп предельных состояний для стеклопластиковых элементов выполняются при параметрах, подобранных для предэксплуатационной стадии.

При этом в законцовках оболочек стесненность деформаций обшивок вызывает проявление краевого эффекта и возникает зона локального температурного изгиба стенки в осевом направлении (рис. 8). В связи с этим вблизи законцовок знак напряжений в обшивках меняется, наружная в данной локальной зоне нагружена сжимающими напряжениями, внутренняя – растягивающими. Минимальный запас прочности стеклопластиковых элементов получен в законцовках по осевым сжимающим напряжениям в наружной обшивке. Теплоизоляция данного участка снижает нагруженность стеклопластиковых элементов в этих зонах примерно на 35%.

При высоком градиенте температур по толщине стенки в заполнителе в плоскостях продольных сечений оболочки возникают высокие касательные напряжения (рис. 9), сопоставимые по величине с пределом прочности минераловатных плит на срез, что может привести к расслоению заполнителя и выключению его из работы на сдвиг.

Переменное по периметру оболочки ветровое давление прикладывалось к наружной обшивке. При рассмотрении оболочек, стенка которых эксплуатируется при градиенте температур, предварительно выполнялся теплотехнический расчет, результаты которого задавались в качестве исходных данных для прочностного расчета.

Для оболочек газоотводящих стволов, эксплуатируемых при ветровой нагрузке и постоянной температуре $(+20\text{ }^{\circ}\text{C})$ напряжения в стеклопластиковых элементах оболочек по крайней мере в 4 раза ниже, чем для складываемых в горизонтальном положении оболочек с такими же конструк-

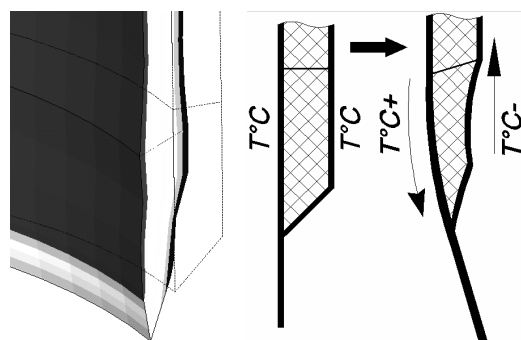


Рис. 8. Температурный изгиб стенки в зоне законцовки

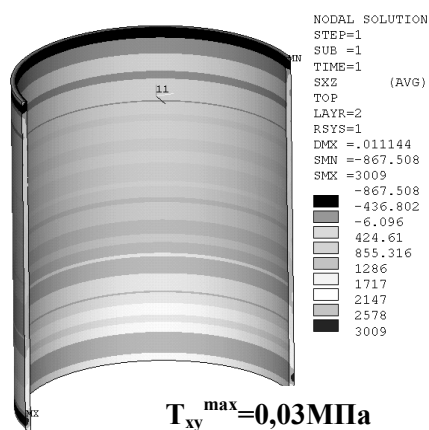


Рис. 9. Касательные напряжения в заполнителе в продольном сечении оболочки

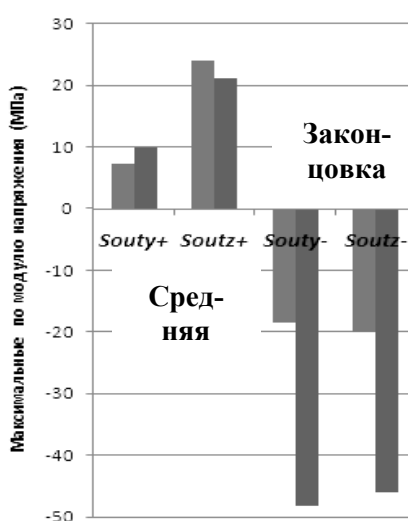


Рис. 10. Напряжения в наружной обшивке при ненарушенном заполнителе (светлее) и при его выключении из работы на сдвиг (темнее)

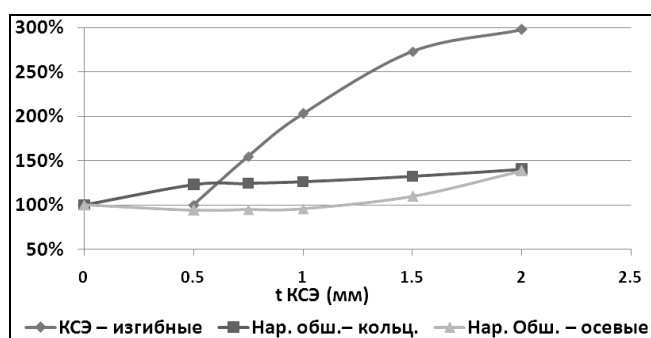


Рис. 11. Зависимость изменения напряжений в КСЭ и обшивках от толщины КСЭ ($t=0,75 \dots 2,0$ мм)

Для оболочек газоотводящих стволов при ветровой нагрузке и температуре внутренней обшивки $200 \text{ }^\circ\text{C}$, наружной $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ при ненарушенном заполнителе условия первой и второй групп предельных состояний для стеклопластиковых элементов выполняются при параметрах, подобранных для предэксплуатационной стадии.

При выключении заполнителя из работы на сдвиг основные изменения НДС наблюдаются в законцовках оболочек, где напряжения и относительные удлинения возрастают в 2...3 раза, при этом НДС в средней части оболочек меняется незначительно (см. рис. 10).

Поэтому в оболочках с минераловатным заполнителем обшивки вблизи законцовок следует проектировать утолщенными для снижения в них напряжений и обеспечения равномерной нагруженности. При этом увеличение толщины наружной обшивки выше определенного предела приводит к возрастанию осевых относительных удлинений в гелькоут-слое, вследствие возрастания влияния краевого эффекта.

В оболочках с КСЭ в среднем слое в последних наблюдаются высокие изгибные напряжения в местах стыка с обшивками. Увеличение толщины КСЭ с 0,75 до 2,0 мм приводит к возрастанию в них напряжений вследствие снижения податливости, при этом НДС обшивок практически не изменяется (рис. 11). Поэтому КСЭ следует проектировать минимально возможной толщины.

Исследования устойчивости вертикальных оболочек газоотводящих стволов были выполнены при действии ветровой нагрузки и температуры. Уровень нагрузок и температуры принят таким же, как и при исследовании НДС, начальные параметры оболочек приняты как для предэксплуатационной стадии.

Для оболочек с ненарушенным минераловатным наполнителем, эксплуатируемых при ветровой нагрузке и постоянной температуре (+20 °С), коэффициенты запаса устойчивости по крайней мере в 2 раза выше минимально допустимого значения (равного 6 согласно работам Обухова). При выключении наполнителя из работы на сдвиг в оболочках *без КСЭ* коэффициент запаса устойчивости снижается в 3 раза, при этом в аналогичной оболочке *с КСЭ* он снижается всего на 40%.

Для оболочек, эксплуатируемых при температуре внутренней обшивки +200 °С, наружной –30 °С при параметрах, подобранных для предэксплуатационной стадии, наименьший запас наблюдается во внутренней обшивке оболочки, теряющей устойчивость от сжимающих температурных напряжений. При этом значение коэффициента запаса устойчивости в 3...4 раза ниже минимально допустимого. Полное исключение наполнителя из работы не приводит к существенному изменению коэффициента запаса устойчивости оболочки. Таким образом, для таких условий эксплуатации определяющими являются нагрузки эксплуатационной стадии.

Установка КСЭ в среднем слое в данном случае несущественно влияет на устойчивость внутренней обшивки. Введение в расчетную схему внутренней обшивки компенсатора в виде кольцевого гофра также не приводит к значительному повышению коэффициента запаса ее устойчивости, а при увеличении толщины обшивки вызывает его существенное снижение из-за потери местной устойчивости обшивки в зоне компенсатора.

Кардинально повысить запас устойчивости внутренней обшивки (из рассмотренных мероприятий) можно только увеличением ее толщины, при увеличении которой до определенного значения потеря устойчивости происходит уже в наружной обшивке от сжимающих напряжений в месте локального температурного изгиба стенки в зоне законцовки. Поэтому для дальнейшего повышения запаса устойчивости следует также увеличивать толщину наружной обшивки в зоне законцовки.

Исследования устойчивости оболочек горизонтальных газоходов. Для

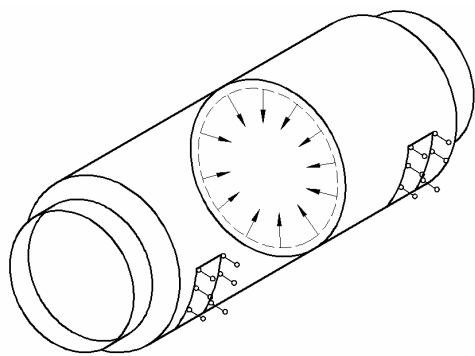


Рис. 12. Расчетная схема газохода

оценки возможности использования оболочек с минераловатным наполнителем в горизонтальных газоходах при высоком внутреннем разрежении, были выполнены исследования их устойчивости. Оболочки газохода опирались на ложементы с углом охвата 120°, для чего в зонах опирания оболочки в соответствующих узлах КЭ модели наружной обшивки запрещались перемещения. Расчетная схема показана на рис. 12, расчетная интенсивность разрежения составляла 5 кПа.

Полученные результаты показали, что трехслойные оболочки с наполнителем из минераловатных плит без КСЭ в среднем слое при одинаковом уровне нагрузки и температуре +20 °С обладают значительно меньшими (в 4...7 раз для оболочек диаметром 2,0 м, в 2...4 раза для оболочек диаметром 5,0 м) коэффициентами запаса устойчивости по сравнению с оболочками с наполнителем из пенопластов (рис. 13). Выполнение КСЭ в толще минераловатного наполнителя повысило устойчивость в 2,5...3,3 раза, изменение толщины КСЭ в пределах 0,75...2,0 мм на нее существенно не повлияло.

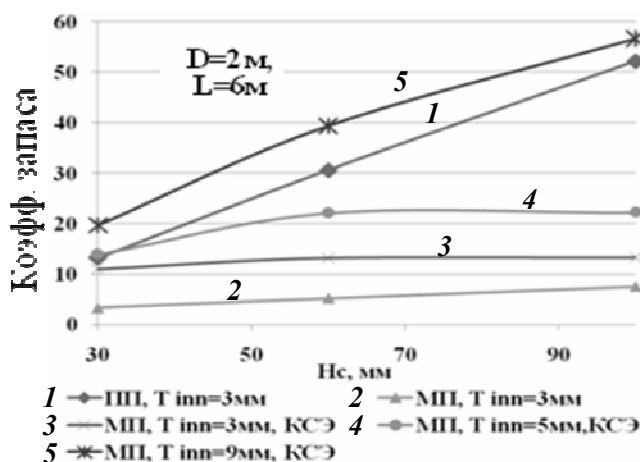


Рис. 13. Коэффициенты запаса устойчивости горизонтальных трехслойных оболочек с пенопластовым наполнителем (ПП) и с минераловатным (МП) в зависимости от толщины наполнителя и при различных толщинах внутренней обшивки T_{inn} и толщине наружной 4 мм

Коэффициенты запаса устойчивости для рассмотренных оболочек с минераловатным наполнителем при определенных параметрах значительно превышают минимально допустимое значение, что свидетельствует о том, что оболочки с минераловатным наполнителем могут работать при высокой интенсивности внутреннего разрежения.

Исследование зависимости коэффициента запаса устойчивости оболочек от изменения жесткостных свойств наполнителя показало, что при полном выключении наполнителя из работы в оболочке без КСЭ теряется совместность работы обшивок и происходит потеря устойчивости внутренней обшивки, при этом коэффициент запаса устойчивости оболочки снижается в 15 раз. В аналогичной оболочке с КСЭ при выключении наполнителя из работы совместность работы обшивок обеспечивается КСЭ, при этом коэффициент запаса устойчивости снижается всего в 2 раза, как следствие оболоч-

В оболочках с минераловатным наполнителем и КСЭ в среднем слое при увеличении толщины наполнителя H_c выше определенного значения меняется характер потери устойчивости оболочки с общего на локальный (рис. 14), после чего увеличение толщины наполнителя не приводит к увеличению критической нагрузки. В данном случае увеличение коэффициента запаса устойчивости достигается увеличением толщин обшивок, главным образом внутренней.

Полученные коэффициен-

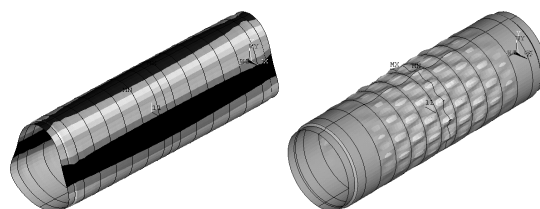


Рис. 14. ФПУ оболочки при $H_c=30$ мм (слева), при $H_c=60$ мм (справа)

ки с КСЭ в среднем слое обладают повышенной надежностью при использовании в конструкциях, в которых возможно со временем понижение жесткости заполнителя. Для оболочек с КСЭ в среднем слое большее влияние на устойчивость оказывает изменение модуля поперечной деформации заполнителя, чем его модуля сдвига (рис. 15).

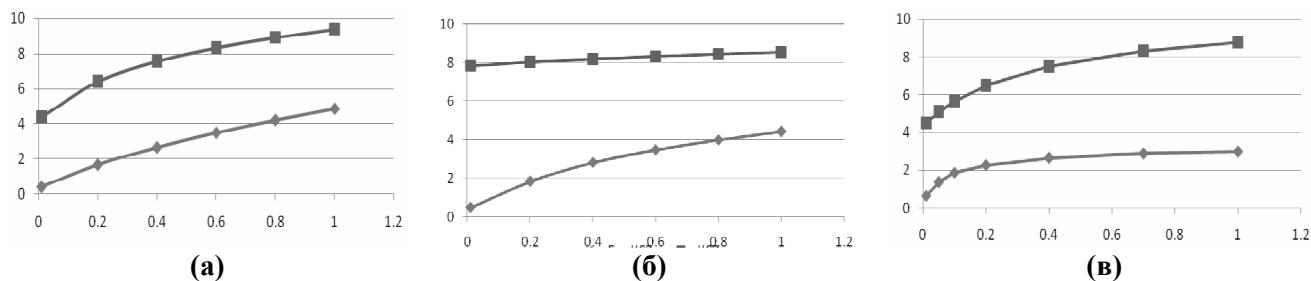


Рис. 15. Зависимость коэффициента запаса устойчивости оболочек (кривая сверху с КСЭ, снизу без КСЭ): а) при одновременном изменении E_x и G_{xy} от 0 до 1 МПа; б) при $E_x=0,6$ МПа и G_{xy} от 0 до 1 МПа; в) при $G_{xy}=0,4$ МПа и E_x от 0 до 1 МПа

В шестой главе описаны примеры внедрения результатов исследований.

Впервые результаты работы были применены в 2004...2005 г. при реконструкции аварийной ж/б дымовой трубы на Магнитогорском металлургическом комбинате (рис. 16). Верхняя часть трубы была демонтирована, на оставшуюся нижнюю часть была установлена решетчатая башня с трехслойным стеклопластиковым газоотводящим стволом диаметром 3,6 м. Температура газов в данном сооружении достигает 150 °С, поэтому было принято решение запроектировать внутреннюю обшивку ствола на термостойком эпоксидном связующем, наружную на связующем ЭД-20, а заполнитель выполнить из жестких минераловатных плит.



Рис. 16. Дымовая труба на ММК

Следующим объектом, на котором были внедрены результаты исследований, является запроектированная и построенная в 2005 г. дымовая труба высотой 60 м на металлургическом заводе им. Серова в г. Серове Свердловской области (рис. 17). Дымовая труба представляет собой решетчатую металлическую башню с установленным внутри стеклопластиковым газоотводящим стволом диаметром 5,0 м. Температура отводимых газов составляет 100...120 °С. Для данного газоотводящего ствола факторами, определяющими конструктивные параметры оболочек, являлись ограничения по второй группе предельных состояний. Чтобы обеспечить требуемую жесткость контура оболочек, их поперечное сечение выполнялось в пятислойном варианте, с заполнителем из жестких минераловатных плит.



Рис. 17. Дымовая труба на металлургическом заводе им. Серова

В 2005...2006 г. трехслойные стеклопластиковые оболочки с минераловатным наполнителем были применены в качестве внутренних газоотводящих стволов диаметрами 3,0 и 2,8 м при реконструкции железобетонных дымовых труб на горно-обогательном комбинате в г. Гае и на Добринском сахарном заводе в Липецкой области. В 2007 г. они были применены при возведении четырехствольной дымовой трубы на комбинате «Амурметалл» в г. Комсомольске на Амуре (2 ствола диаметром 2,8 м и 2 ствола – 3,0 м).

Результаты исследований, выполненных в настоящей работе, были использованы при разработке ТУ 2296-001-78827965-2007 «Трубы газоотводящие из стеклопластика на эпоксидном связующем».

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. В сооружениях промышленности и энергетики, подверженных химически агрессивным, силовым и тепловым воздействиям, широко применяются стеклопластиковые цилиндрические оболочки диаметром 0,5...8,0 м. Эффективными являются сэндвичевые оболочки, однако их использование в конструкциях, эксплуатирующихся при высоких температурах, сдерживалось низкой теплостойкостью материалов среднего слоя. Поэтому разработка и исследование сэндвичевых стеклопластиковых оболочек с теплостойким минераловатным наполнителем являются актуальными.

2. Разработаны и запатентованы три варианта конструктивно-технологических решений изготавливаемых намоткой сэндвичевых оболочек с минераловатным наполнителем, имеющих расширенный диапазон температур применения и технологичных в изготовлении.

3. Экспериментально определены механические характеристики жестких минераловатных плит различных марок, оказавшиеся по сравнению с конструкционными пенопластами на порядок ниже, что позволяет характеризовать минераловатный наполнитель сэндвичевой оболочки как сверхслабый.

4. На базе конечноэлементного пакета ANSYS разработан программный модуль для расчета многослойных оболочек газоотводящих трактов и емкостей на различные виды эксплуатационных воздействий. Результаты расчетов деформаций трехслойных оболочек по разработанной методике хорошо согласуются с натурным экспериментом, а результаты расчета устойчивости – с аналитическими решениями тестовых задач.

5. Для предэксплуатационной стадии факторами, определяющими конструктивные параметры оболочек, являются ограничения по деформациям. Исходя из этих ограничений для оболочек диаметрами 0,5...5,0 м определены рекомендуемые конструктивные параметры, при этом по прочности имеется по крайней мере двукратный запас.

6. В рассмотренных случаях основной выявленной особенностью формирования НДС оболочек с минераловатным наполнителем является значи-

тельно более высокая нагруженность обшивок в зоне законцовок, чем в средней части оболочек. Нагруженность понижается с утолщением обшивок в данной зоне. Ограничением на утолщение наружной обшивки являются увеличивающиеся при этом относительные осевые удлинения гелькоут-слоя вследствие возрастающего влияния краевого эффекта.

7. Выполнение кольцевых связующих элементов (КСЭ) в среднем слое оболочек при нагрузках, вызывающих искажение контура оболочки, существенно повышает их жесткость и несущую способность. При совместном действии ветровой нагрузки и температуры увеличение толщины КСЭ приводит к возрастанию в них изгибных напряжений вследствие снижения их податливости, при этом НДС обшивок существенно не изменяется. Поэтому КСЭ следует проектировать минимально возможной толщины.

8. В оболочках, эксплуатирующихся при ветровой нагрузке и высокой температуре, минимальные запасы по устойчивости наблюдаются от температурных сжимающих напряжений во внутренней обшивке. Наиболее эффективно можно повысить запас устойчивости обшивки увеличением ее толщины, при этом для толщин обшивки 3 мм и более свойства минераловатного заполнителя (вплоть до его полного исключения из работы) не оказывают существенного влияния на устойчивость обшивки.

9. Применение КСЭ в среднем слое горизонтальных оболочек с минераловатным заполнителем, эксплуатирующихся при высоком уровне внутреннего разрежения, значительно повышает их устойчивость и позволяет использовать такие оболочки при данных условиях эксплуатации.

10. На основе проведенных исследований были запроектированы, изготовлены и введены в эксплуатацию ряд конструкций газоотводящих трактов, показавших свою эффективность. С использованием результатов исследований разработаны ТУ 2296-001-78827965-2007 «Трубы газоотводящие из стеклопластика на эпоксидном связующем».

Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в следующих публикациях:

1. Конструкционно-теплоизоляционный элемент: Патент на ПМ 36845 РФ: МПК-7 Е 04 В 1/78/ В. М. Асташкин, М. В. Мишнёв, Г. В. Мишнёв и др. – Заявлено 10.12.2003; опубликовано 27.03.2004, Бюлл. № 9.

2. Слоистая цилиндрическая оболочка: Патент на ПМ 45333 РФ: МПК-7 В 32 В 1/08 / В. М. Асташкин, М. В. Мишнев, Г. В. Мишнев и др. – Заявлено 14.01.2005; опубликовано 10.05.2005, Бюлл. № 13.

3. Слоистая цилиндрическая оболочка: Патент на ПМ 49758 РФ: МПК-7 В32 В 1/08 / В. А. Пазушан, В. М. Асташкин, М. В. Мишнев и др. – Заявлено 27.06.2005; опубл. 10.12.2005, Бюлл. № 34.

4. Асташкин, В. М. Крупногабаритные оболочки из стеклопластиков в химических аппаратах и газоотводящих трактах / В. М. Асташкин, М. В. Мишнев, В. А. Пазушан // Композитный мир. – 2006. – №6. – С. 10–14.

5. Мишнёв, М. В. Исследование механических свойств минераловатных плит при работе на сдвиг в продольном направлении / М. В. Мишнёв, Г. В. Мишнёв // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2007. – №5 – С. 49–51.

6. Мишнёв, М. В. Конструкционно-теплоизоляционный элемент на основе полужестких минераловатных плит и его применение / М. В. Мишнёв, В. М. Асташкин // Проблемы строительного комплекса России. Материалы VIII Международной научно-технической конференции при VIII Международной специализированной выставке «Строительство. Коммунальное хозяйство. Энергосбережение – 2004». – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. – Т. 1. – С. 121–123.

7. Мишнёв, М. В. Параметрическое моделирование сэндвичевых стеклопластиковых оболочек в ANSYS / М. В. Мишнёв, Г. В. Мишнёв // Сборник трудов седьмой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH. – М.: Полигон пресс, 2007. – С. 238–242.

8. Мишнёв, М. В. Сопоставление аналитических результатов расчета устойчивости трехслойных цилиндрических оболочек с результатами конечноэлементных расчетов в ANSYS / М. В. Мишнёв // Сборник трудов седьмой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH. – М.: Полигон пресс, 2007. – С. 243–247.

9. Мишнёв, М. В. Исследование физико-механических свойств стеклопластиков на основе эпоксидных смол при повышенных температурах / М. В. Мишнёв, В. А. Пазушан, С. А. Севастьянов // Композитный мир. – 2007. – №1. – С. 21–25.

Мишнёв Максим Владимирович

СЭНДВИЧЕВЫЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫЕ ОБОЛОЧКИ
С МИНЕРАЛОВАТНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ
Специальность 05.23.01 – «Строительные конструкции,
здания и сооружения»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 05.10.2007. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 357.

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 76