

*На правах рукописи*

**ФЕДУЛОВ ЕВГЕНИЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**ТЕХНОЛОГИЯ УСТРОЙСТВА АНКЕРНЫХ КРЕПЛЕНИЙ  
В ГАЗОБЕТОННЫХ НЕСУЩИХ И ОГРАЖДАЮЩИХ  
КОНСТРУКЦИЯХ МЕТОДОМ НАГНЕТЕНИЯ**

Специальность **05.23.08** – Технология и организация строительства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: **Верстов Владимир Владимирович**,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Кузьмичев Виктор Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кафедра транспортно-технологических систем, профессор;

**Панарин Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ООО «ТЕХНОАРМ+» (г. Санкт-Петербург), генеральный директор

Ведущая организация **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)**

Защита диссертации состоится «21» июня 2016 года в 16<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.223.01 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербургский, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219). Тел./Факс: (812) 316-58-72, email: [rector@spbgasu.ru](mailto:rector@spbgasu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://www.spbgasu.ru>

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью организации) просим направлять по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул., д.4.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета кандидат  
технических наук \_\_\_\_\_

Владимир Викторович  
Конюшков

## **I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность исследования.** Вопрос обеспечения высокой надежности крепления фасадных систем к ограждающим конструкциям из газобетона при воздействии повышенных нагрузок на них требует глубокой проработки в целях обеспечения безопасности зданий и сооружений.

С учетом невысоких прочностных и деформационных характеристик строительных изделий из газобетона необходима разработка специальных конструктивных и технологических решений при устройстве в них анкерных креплений. Существующие способы устройства анкерных креплений в газобетонных изделиях обладают рядом недостатков: снижение несущей способности с течением времени, значительное нарушение структуры базового материала при установке анкера, невозможность обеспечения достаточной зоны проникновения клеевой композиции в поровое пространство.

Таким образом, очевидна необходимость в разработке более совершенных технологических решений устройства анкерных креплений в газобетоне для обеспечения высоких и стабильных показателей несущей способности крепления наряду с сокращением стоимости и трудоемкости его устройства.

**Степень разработанности темы исследования.** Работа основана на результатах теоретических и экспериментальных исследований отечественных и зарубежных ученых – Н.И. Ватина, В.В. Верстова, В.П. Вылегжанина, А. В. Грановского, Г.И. Гринфельда, А.А. Давидюка, Ю.Н. Казакова, Д.А. Киселева, В.А. Кузьмичева, Н.О. Куликовой, А.С. Малинкина, А.П. Меркина, В.И. Морозова, С.Н. Панарина, В.А. Пинскера, А.Е. Пискуна, А.Ф. Питулько, Л.А. Прокудиной, Ю.В. Пухаренко, С.Б. Сапожников, Г.И. Шапиро, R. Eligehausen, I. Ioannou, G. Schober и др.

**Целью диссертационной работы** является проведение исследований, направленных на совершенствование и отработку конструктивных и технологических решений устройства анкерных креплений нагнетанием клеевой композиции в массив базового поризованного материала при рациональных параметрах технологического процесса, – плотности материала, вязкости клеевой композиции, значении избыточного давления нагнетания, времени нагнетания.

В соответствии с определенной целью были сформулированы следующие **задачи исследования:**

– выполнить классификацию существующих технологий и технических средств устройства первичных анкерных креплений навесных строительных конструкций;

– разработать более совершенные технологические решения устройства первичных средств крепления навесных строительных конструкций, отвечающих критерию повышения несущей способности;

– разработать метод подачи клеевой композиции в массив базового материала под избыточным давлением через специальные каналы в теле дюбеля, при возможности выдерживания избыточного давления необходимое время;

– обосновать теоретическую и физическую модели происходящих процессов, отвечающих методике выполнения экспериментальных исследований с использованием необходимых измерительных средств и обеспечивающих необходимый уровень достоверности;

– провести экспериментальные исследования предложенных решений, при этом определить рациональные физико-механические характеристики клеевой массы и массива базового материала, а также установить рациональные режимы нагнетания клеевой композиции в массив базового материала при его исходной пористости;

– разработать технологический регламент по реализации новой технологии устройства анкерных креплений в несущих и ограждающих строительных конструкциях.

**Объект исследований** – строительные технологические процессы при устройстве анкерного крепления в газобетонных изделиях методом нагнетания.

**Предмет исследований** – параметры технологических процессов при устройстве анкерной системы в газобетонных изделиях методом нагнетания; факторы, влияющие на конечную несущую способность анкерного крепления, установленного по новой технологии.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

1. Предложена гипотеза повышения несущей способности и надежности анкерных креплений в газобетонных конструкциях за счет вовлечения большего объема базового материала в работу путем пропитки клеевой композицией зоны базового материала, приконтактной к дюбелю. Разработан новый метод устройства анкерных креплений в газобетонных изделиях для монтажа навесных строительных конструкций и инженерных систем здания, обеспечивающий объемное проникновение клеевой композиции в поровое пространство газобетона при различных технологических параметрах, – плотности газобетона, вязкости клеевой композиции, значения избыточного давления и времени подачи композиции – через дюбель усовершенствованной конструкции.

2. Разработаны и обоснованы физическая и математическая модели распространения клеевой композиции в поровом пространстве газобетона в зависимости от технологических параметров, позволяющие определить время движения клеевой композиции в нагнетательной установке и время её проникновения в поровую структуру газобетона.

3. Экспериментально установлена зависимость несущей способности анкерного крепления от технологических параметров. Исследована фактиче-

ская работа анкера под нагрузкой и разгрузкой и установлено, что анкер, установленный методом нагнетания, включается в работу сразу после приложения нагрузки. Предложены формулы, позволяющие прогнозировать несущую способность анкера при различных физико-механических свойствах клеевой композиции и основания, времени подачи и значения избыточного давления.

4. Выявлены и экспериментально подтверждены рациональные технологические параметры режимов нагнетания клеевых композиций при устройстве анкеров методом нагнетания с учетом минимальных материальных, трудовых и энергозатрат, на основании которых разработан технологический регламент. Разработаны и сформулированы методы контроля качества анкерных креплений, установленных методом нагнетания.

**Методологической основой** исследования являются: анализ литературных и патентных источников, обобщение производственного опыта, математическое планирование экспериментальных исследований, проведение натурных экспериментов, статистическая обработка полученных результатов. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях по стандартным и специальным методикам. По стандартным методикам исследовались: прочность газобетонных блоков, влажность пористого основания. По специальным методикам исследована зависимость нагрузка-деформация анкерного крепления на его вырыв из газобетонного блока.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Предложена гипотеза повышения несущей способности и надежности анкерных креплений в газобетонных конструкциях за счет вовлечения большего объема базового материала в работу путем пропитки клеевой композицией зоны базового материала, приконтактной к дюбелю. Разработан новый метод устройства анкерных креплений в газобетонных изделиях для монтажа навесных строительных конструкций и инженерных систем здания, обеспечивающий объемное проникновение клеевой композиции в поровое пространство газобетона при различных технологических параметрах, – плотности газобетона, вязкости клеевой композиции, значения избыточного давления и времени подачи композиции – через дюбель усовершенствованной конструкции.

2. Разработаны и обоснованы физическая и математическая модели распространения клеевой композиции в поровом пространстве газобетона в зависимости от технологических параметров, позволяющие определить время движения клеевой композиции в нагнетательной установке и время её проникновения в поровую структуру газобетона.

3. Экспериментально установлена зависимость несущей способности анкерного крепления от технологических параметров. Исследована фактическая работа анкера под нагрузкой и разгрузкой и выявлено, что анкер, установлен-

ный методом нагнетания, включается в работу сразу после приложения нагрузки. Предложены формулы, позволяющие прогнозировать несущую способность анкера при различных физико-механических свойствах клеевой композиции, основания, времени подачи и значениях избыточного давления.

4. Выявлены и экспериментально подтверждены рациональные технологические параметры режимов нагнетания клеевых композиций при устройстве анкеров методом нагнетания с учетом минимальных материальных, трудовых и энергозатрат, на основании которых разработан технологический регламент. Разработаны и сформулированы методы контроля качества анкерных креплений, установленных методом нагнетания.

**Область исследования** соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 05.23.08 – Технология и организация строительства, а именно: содержанию специальности по следующим основным направлениям: п.2 «Разработка конкурентоспособных новых и совершенствование существующих технологий и методов производства строительно-монтажных работ на основе применения высокопроизводительных средств механизации и автоматизации»; п.4 «Теоретические и экспериментальные исследования эффективности технологических процессов; выявления общих закономерностей, путей моделирования и оптимизации организационно-технологических решений».

**Теоретическое и практическое значение исследования:**

Разработан и запатентован в соавторстве новый метод устройства анкерных креплений в газобетонных изделиях методом нагнетания;

Разработаны и обоснованы физическая и математическая модели распространения клеевой композиции в поровом пространстве газобетона в зависимости от технологических параметров, позволяющие определить время движения клеевой композиции в нагнетательной установке и время её проникновения в поровую структуру газобетона;

Предложены формулы, позволяющие прогнозировать несущую способность анкера при различных физико-механических свойствах клеевой композиции, основания и времени подачи и значения избыточного давления;

Установлено повышение несущей способности анкерного крепления на 4,2% по сравнению с наиболее прогрессивными технологиями устройства анкерных креплений в газобетонные изделия.

Получен экономический эффект от внедрения предложенного технологического решения в виде сокращения стоимости на 8,2% при монтаже 1 кв.м. навесного вентилируемого фасада при незначительно возрастающей трудоемкости.

Разработаны методы контроля качества устройства анкерных креплений методом нагнетания.

Внедрен технологический регламент по устройству анкерных креплений в несущих и ограждающих конструкциях из газобетона методом нагнетания, который утвержден ООО «Центр экспертизы и проектирования строительных конструкций» // ООО «ЦЭиПСК» и использован в рамках выполнения раздела ППР: «Рабочий проект на устройство навесных вентилируемых фасадов без утепления входной группы частного жилого дома, расположенного по адресу: Ленинградская область, п.г.т. Лебяжье, ТПЛХ “Авиатор”, участок 208».

**Достоверность результатов исследований** подтверждается использованием метода математического планирования экспериментов и проведением экспериментальных исследований с использованием поверенных приборов; выполнением статистической обработки полученных экспериментальных данных и установлением аналитических зависимостей для расчета параметров строительного процесса. Для обработки данных использовалось современное программное обеспечение: *Curve Expert 1.3, Comsol Multiphysics*.

**Апробация и публикация работы.** Основные результаты исследований доложены на 68-м и 70-м Международном конгрессе «Актуальные проблемы строительства» (СПбГАСУ 2013, 2015), III международном конгрессе студентов и молодых ученых (аспирантов, докторантов) (СПбГАСУ, 2014), 71-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов (СПбГАСУ, 2015), XXIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты» (Новосибирск, 2015). Разработан и внедрен «Технологический регламент по устройству анкерных креплений в несущих и ограждающих конструкциях из газобетона методом нагнетания», который утвержден ООО «Центр экспертизы и проектирования строительных конструкций» // ООО «ЦЭиПСК» и принят ко внедрению при разработке раздела ППР на устройство навесных вентилируемых фасадов без утепления входной группы частного жилого дома, что подтверждается актом внедрения.

**Публикации.** Материал диссертации опубликован в 9 печатных работах общим объемом 2,22 п. л., из них лично автором 1,97 п. л., в том числе 4 работы – в изданиях по перечню ВАК РФ. Получен патент «Способ установки анкерного крепления», № 2580494 с приоритетом от 25.12.2014, авторы В.В. Верстов, Е.С. Федулов, А.С. Шеховцов. Решение Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент) о выдаче патента от 25.01.2016.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов, списка литературы, включающего 121 наименований, 6 приложений. Общий объем диссертации составляет 173 страниц, в том числе 28 страниц приложений. В работе представлено 56 рисунков, 38 таблиц, 22 формулы.

*Во введении* обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, сформулирована научная новизна и практическая значимость работы.

*В первой главе* раскрыта актуальность научных исследований. Показаны их достоинства и недостатки существующих способов крепления, ограниченная область применения. Произведен анализ способов установки первичных средств крепления на изделия из газобетона и сформулированы пути их совершенствования.

*Во второй главе* приведены предпосылки возможности повышения качества устройства анкерных креплений в газобетонных элементах методом нагнетания. Исследованы технические характеристики газобетона и клеевых композиций. Представлены достоинства, недостатки и область применения различных клеевых композиций. Сформулированы требования к строительным растворам при их использовании в технологии устройства анкерных креплений методом нагнетания. Разработан новый метод устройства анкерных креплений с учетом указанных требований. Предложена физическая модель проникновения композиции в поровую структуру материала. Приведены прикладные зависимости, позволяющие определять оптимальное время нагнетания.

*В третьей главе* описан лабораторный экспериментальный стенд и перечень технологических операций по устройству анкерных креплений методом нагнетания. Приведен перечень технологических операций при установке креплений. Рассмотрена методика проведения испытания анкера на вырыв, позволяющая выявить фактическую схему работы анкера под нагрузкой с возможностью фиксации остаточных деформаций. Получены зависимости несущей способности анкерных креплений от технологических режимов. Построены графики, позволяющие провести качественный и количественный анализ эффективности новой технологии и определить рациональные технологические параметры – плотность материала, вязкость клеевой композиции, значение избыточного давления нагнетания, время нагнетания. Путем аппроксимации данных испытаний представлены аналитические зависимости, позволяющие прогнозировать несущую способность анкерного крепления в зависимости от технологических режимов нагнетания. Приведены рекомендации по подбору технологических режимов нагнетания клеевых композиций.

*В четвертой главе* проведено технико-экономическое сравнение вариантов устройства анкерных креплений при монтаже навесных вентилируемых фасадов. Рассмотрено формирование трудозатрат при различных вариантах крепления. Разработаны технологические указания по устройству анкерных креплений в газобетонных основаниях по критерию несущей способности. Разработаны методы контроля качества установленных анкерных креплений.

## II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

**1. Предложена гипотеза повышения несущей способности и надежности анкерных креплений в газобетонных конструкциях за счет вовлечения большего объема базового материала в работу путем пропитки клеевой композицией зоны базового материала, приконтактной к дюбелю. Разработан новый метод устройства анкерных креплений в газобетонных изделиях для монтажа навесных строительных конструкций и инженерных систем здания, обеспечивающий объемное проникновение клеевой композиции в поровое пространство газобетона при различных технологических параметрах, – плотности газобетона, вязкости клеевой композиции, значения избыточного давления и времени подачи композиции – через дюбель усовершенствованной конструкции.**

На основе анализа выявлены недостатки известных способов установки анкерных креплений в газобетонных изделиях, среди которых необходимо отметить следующие: смятие базового материала под выступающими элементами анкерных креплений под нагрузкой, наличие монтажных напряжений в базовом поризованном материале после установки анкерного крепления, раскручивание анкерных креплений, нестабильное значение несущей способности во времени.

Предложена рабочая гипотеза по повышению несущей способности и надежности анкерного крепления за счет вовлечения большего объема основного материала в работу путем пропитки приконтактной к дюбелю зоны материала клеевой композицией. Расчетным путём обоснован перечень вариативных параметров исследуемого технологического процесса (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Вариативные параметры технологического процесса

<b>Вариативный фактор</b>	<b>Значение</b>
Базовые пористые основания	газобетонные блоки D300, ШxВxГ – 200x250x300 мм; газобетонные блоки D400,500 - 200x250x250 мм
Клеевые композиции	Клеевая композиция на основе эпоксидных смол ЭД-20 и ЭД-22 с отвердителем ХТ-1186; полимочевинная композиция – ХТ-2004 (в составе компонентов А и Б)
Время нагнетания	15, 30, 60, 120 с.
Избыточное давление нагнетания	3 и 6 атм.

Разработан и запатентован новый метод устройства анкерного крепления в поризованные (газобетонные) материалы. В основе технологии лежит возможность обеспечения объемного проникновения клеевой композиции в газобетон под избыточным давлением при изменении конструкции дюбеля.

Новый метод реализуется нагнетанием клеевой композиции установки дюбеля специальной конструкции в лидерное отверстие и с предварительной загрузкой клеевой композиции в нагнетательную установку (см. рисунок 1 а, б). Используемый дюбель (см. рисунок 1 в) при завинчивании образует в теле газобетона поло-

сти, через которые в последующем свободно проходит композиция. Подача композиции и её выдерживание под давлением происходит в течение оптимального времени. Рекомендуются к использованию эпоксидно-диановые смолы ввиду нейтральности к щелочной среде, отсутствию усадки при отверждении, длительном времени жизни (3-5 ч.) при использовании специальных отвердителей.

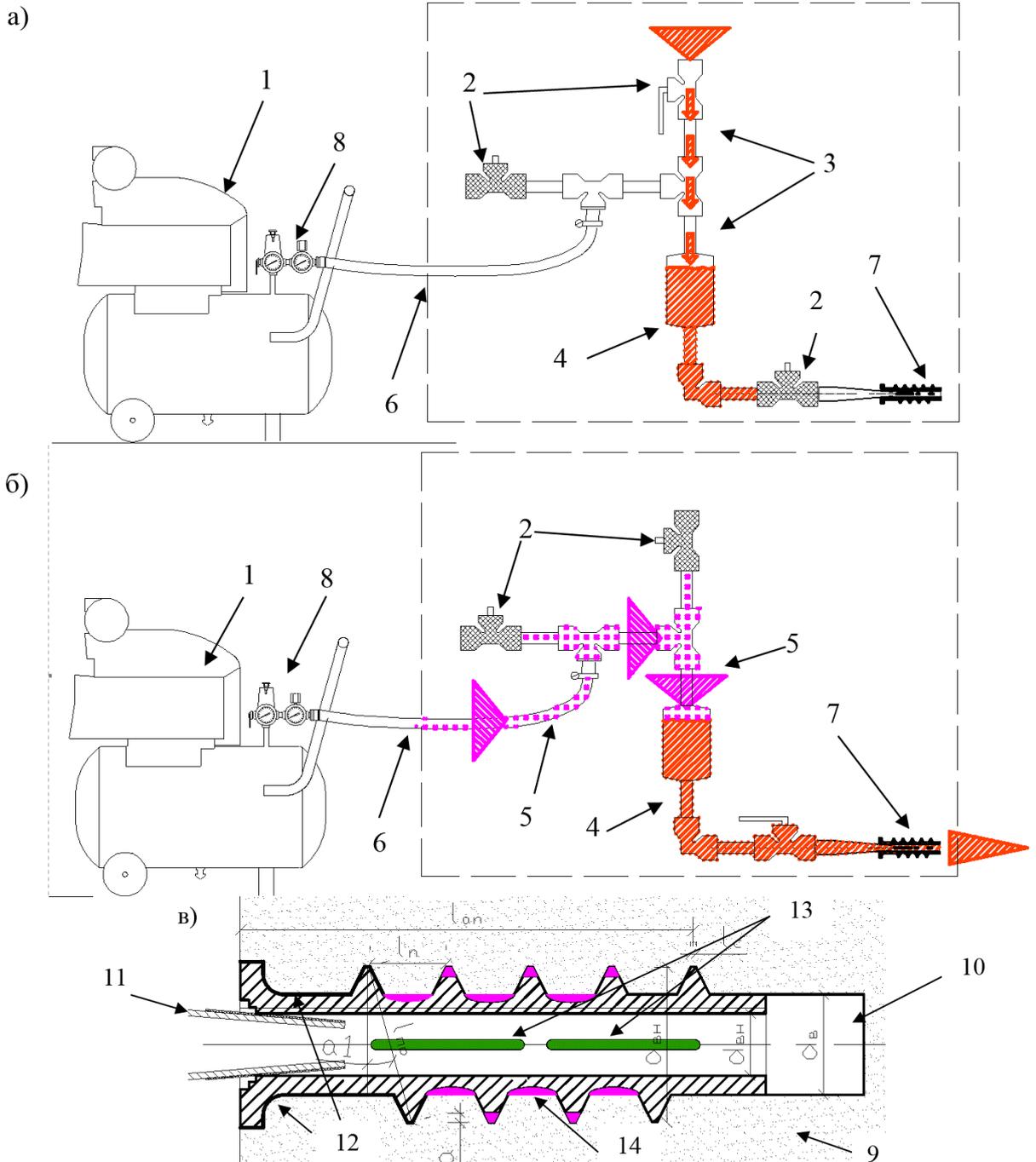


Рисунок 1 – Схема нагнетательной установки и направление движение композиции под избыточным давлением. а) – Загрузка композиции. б) – Процесс нагнетания. 1 – компрессор; 2 – запорная арматура; 3 – полимерные трубы; 4 – ёмкость для временного хранения композиции; 5 – избыточное воздушное давление; 6 – полый гибкий патрубок; 7 – дюбель; 8 – регулировочный манометр; в) – Конструктивная схема модернизированного дюбеля *Sormat kbt 6*.

9 –газобетон; 10 – полость в пяте, образуемая при сверлении; 11 – сопло нагнетательной установки; 12 – герметизирующий уплотнитель (лента ФУМ); 13 – прорези, выполненные в заводских условиях (показаны зеленым); 14 – полости, образовавшиеся при установке дюбеля, модернизированного автором (показаны фиолетовым);

Предлагаемый метод имеет следующие преимущества: 1) повышение прочностных характеристик материала в приконтактной зоне; 2) перераспределение монтажных напряжений со скелета газобетона на композитное клеегазобетонное тело и далее на значительный объем прилегающего материала; 3) передача динамических нагрузок на основной массив газобетона без образования дополнительного смятия, и, следовательно, без возникновения микроударных нагрузок при динамическом воздействии; 4) предотвращение раскручивания анкера в процессе эксплуатации.

**2. Разработаны и обоснованы физическая и математическая модели распространения клеевой композиции в поровом пространстве газобетона в зависимости от технологических параметров, позволяющие определить время движения клеевой композиции в нагнетательной установке и время её проникновения в поровую структуру газобетона.**

Возможность проникновения и нагнетания клеевых композиций обеспечена пористой структурой газобетона. Материал имеет соединенную поровую структуру, выраженную – гелевыми, капиллярными и макропорами. Клеевые композиции по составу и структуре близки к вязко-текучим жидкостям. К механике движения данных типов жидкостей применимы теории, связанные с движением жидкостей.

Рабочей гипотезой выступает возможность улучшить материал путем нагнетания (пропитки) клеевой композицией под действием избыточного давления и последующим отверждением, что повышает несущую способность анкерного крепления. Подачу клеевой композиции производят под избыточным давлением, созданным компрессором. Композиция под давлением продвигается по технологическим каналам оборудования; по соплу оборудования; по полостям дюбеля; по зазору между телом, выступами и газобетоном; по соединенным микро- и макропорам (см рисунок 2).

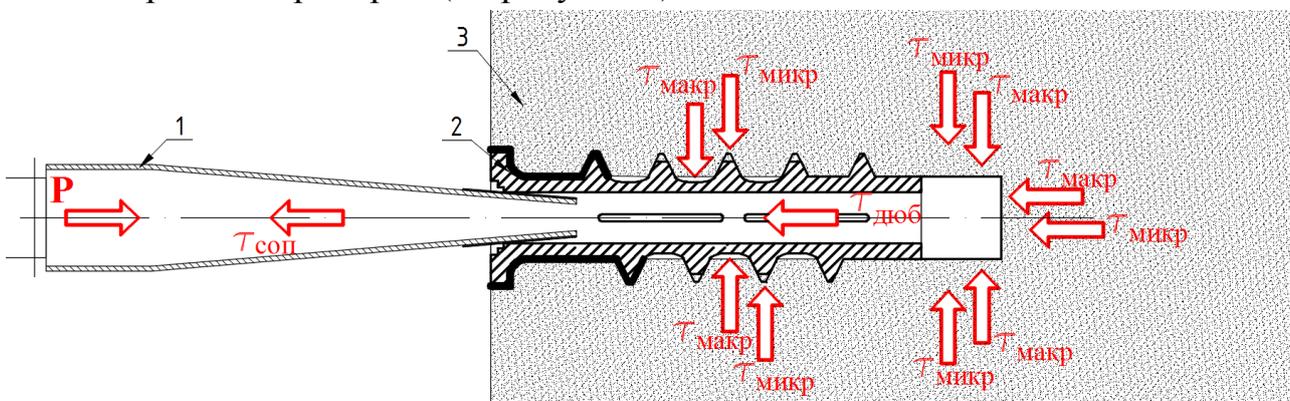


Рисунок 2 – Физическая модель движения клеевой композиции при устройстве анкеров методом нагнетания. Поперечный разрез, фрагмент. 1 – сопло нагнетательной установки; 2 – установленный дюбель; 3 – газобетонный блок

Необходимо, чтобы давление  $P$ , создаваемое компрессорной установкой, было больше, чем давление  $P_1$ , равное сумме сил, противодействующих распространению бетонной смеси в полости, т.е.:

$$P > P_1 \quad (1)$$

$$\text{где } P_1 = \tau_{\text{соп}} + \tau_{\text{дюб}} + \tau_{\text{макр}} + \tau_{\text{микр}} + \tau_{\text{внутр}} - p_{\text{капил}} + p_{\text{вытесн}}$$

где  $\tau_{\text{соп}}$  – “противодавление” от силы трения клеевой композиции о внутреннюю стенку сопла;  $\tau_{\text{дюб}}$  – “противодавление” от силы трения, возникающей при движении клеевой композиции через внутреннюю полость дюбеля;  $\tau_{\text{макр}}$ ,  $\tau_{\text{микр}}$  – “противодавление” от силы трения клеевой композиции при преодолении макро- и микропор соответственно;  $\tau_{\text{внутр}}$  – “противодавление” от силы внутреннего трения клеевой композиции;  $p_{\text{капил}}$  – давление от силы капиллярного подсоса;  $p_{\text{вытесн}}$  – “противодавление” от силы, необходимой для вытеснения сорбционной влаги из пор газобетона.

В общей постановке уравнение движения вязкой жидкости записывают с помощью уравнения Навье-Стокса. Одним из точных решений данного уравнения является плоское параболическое движение композиции, которое может быть выражено следующей формулой Пуайзеля:

$$v = \frac{\Delta P}{4\eta l} (R^2 - r^2), \quad (2)$$

где  $\Delta P$  – градиент давлений, в нашем случае это разница значения избыточного давления, Па, для каждого режима нагнетания  $3 \cdot 10^5$  Па и  $6 \cdot 10^5$  Па и атмосферного давления;  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости, Па\*с;  $l$  – длина участка, м;  $R$  – радиус канала, м;  $r$  – расстояние от оси канала (поры), на котором рассчитывается скорость движения вязкой жидкости, в нашем случае 0 м;

Для определения момента перехода жидкости в турбулентный режим движения применяют критерий – число Рейнольдса, определяемого по формуле:

$$Re = \frac{q \rho \delta}{\eta}, \quad (3)$$

где  $q$  – скорость фильтрации (движения), м/с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – вязкость жидкости Па\*с;  $\delta$  – диаметр, определяемый пористой средой, м.

Расчеты показывают, что в нашем случае число Рейнольдса лежит на отрезке от 0,1 до 25 для различных технологических режимов, что много меньше критического значения числа Рейнольдса (1000-1500), что свидетельствует от том, что перехода в турбулентный режим наблюдаться не будет.

**3. Экспериментально установлена зависимость несущей способности анкерного крепления от технологических параметров. Исследована фактическая работа анкера под нагрузкой и разгрузкой и установлено, что анкер, установленный методом нагнетания, включается в работу сразу по-**

сле приложения нагрузки. Предложены формулы, позволяющие прогнозировать несущую способность анкера при различных физико-механических свойствах клеевой композиции, основания, времени подачи и значения избыточного давления.



Рисунок 3 – Экспериментальный стенд для устройства анкеров методом нагнетания при устройстве в газобетонных блоках. 1 – гидроизоляция сопла (лента ФУМ); 2 – сопло (миксер *Hilti*); 3 – регулировочные манометры; 4 – полый гибкий патрубок для подачи сжатого воздуха; 5 – полимерные трубы Ø20-50мм; 6 – шаровые краны; 7 – загрузочное отверстие; 8 – ресивер компрессионной установки; 9 – шаровый кран регулирования подачи клеевой композиции; 10 – емкость для размещения рабочего объема композиции

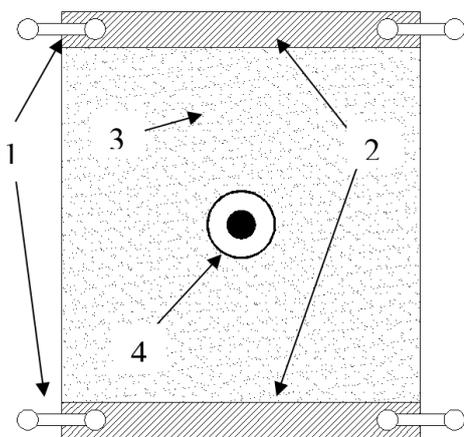


Рисунок 4 – Схема закрепления испытываемого образца размером 250x300 мм. 1 – струбцина, 2 – стальной лист 4x25x250 мм; 3 – газобетонный блок; 4 – установленный анкер с закрепленным самоцентрирующимся захватом

Стеновые испытания по устройству анкерных креплений методом нагнетания проведены в зависимости от 4-х вариативных факторов (см. таблицу 1) в лабораторных условиях при нормальных условиях. В качестве фиксированных параметров приняты: тип дюбеля, глубина эффективной анкерки – 41,2 мм, диаметр дюбеля, технология установки, условия набора прочности клеевых композиций, влажность газобетона. Экспериментальный стенд показан на рисунке 3. Дюбель специальной конструкции обеспечивает объемное проникновение композиции в материал и по диаметру, и по рабочей длине дюбеля (см. рисунок 1 в). Технология устройства анкерного крепления на базовые пористые материалы методом нагнетания включает в себя следующие технологические процессы: 1. Разметка основания. 2. Устройство лидерного отверстия. 3. Продувка и очистка отверстия. 4. Установка дюбеля. 5. Временная установка сопла нагнетательной установки в проходное отверстие дюбеля. 6. Подача

клеевой композиции под избыточным давлением различных значений и в течение различного времени (см. таблица 1); 7. установка шпильки или самореза. 8. Выдерживание устроенного крепления в течении 24 ч без нагрузки до набора проектной прочности.

По результатам нагнетания клеевой композиции и продольного распиливания образцов видно, что проникновение клеевой композиции на основе смолы ЭД-22 и отвердителя ХТ-118Б при нагнетании в течение 60 с под давлением 3 атм. составило 2-3 мм. Клеевая композиция проникла до третьей-четвертой макропоры (см. рисунок 5).

Крепление анкеров в испытательной машине *Instron* проведено с помощью самоцентрирующегося захвата. Схема закрепления образца приведена на рисунке 4. Приложение нагрузки во времени, которая позволяет определить упругую работу анкера, приведено рисунке 6. Разрушающей нагрузкой на анкер по СТО ФЦС 44416204-09-2010 принята нагрузка, после приложения которой остаточные деформации составляют более 0,1 мм.

Разрушение образца, установленного по классической технологии, сопровождается первоначальным смятием газобетона под выступами канального анкера, затем срезом площадки по газобетону на втором-третьем шаге спирали от пяты анкера (см. таблицу 2). При использовании полимочевинной композиции (пункт 2, таблицы 2), видно, что образовались дополнительные усадочные напряжения. Данная глубина создает площадку с концентраторами напряжения,



Рисунок 5 – Продольный разрез установленного анкера. Фотография выполнена до отверждения композиции

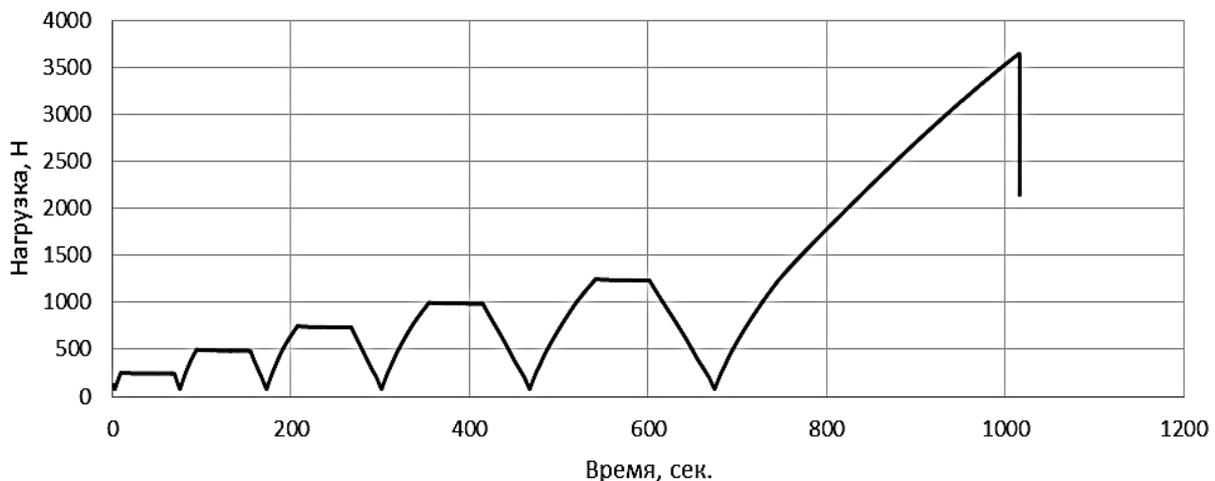


Рисунок 6 – Пример этапов нагружения образца №35 – плотность газобетона 300 кг/м<sup>3</sup>, избыточное давление 6 атм., время нагнетания клеевой композиции 15 с.

и впоследствии при приложении к анкерному креплению разрушение происходит по указанной площадке. Композиции на основе эпоксидных смол не дают усадку и эффективно передают усилия на массив материала (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Испытанные образцы с использованием модернизированного дюбеля Sormat kbt 6, установленные методом нагнетания и по классической технологии в газобетонные блоки различных марок

Метод установки анкерного крепления и описание характера разрушения	Общий вид разрушенного образца	Профиль разрушенного образца
<p><b>Sormat kbt 6, установленный по классической технологии в газобетон.</b></p> <p>При циклическом нагружении наблюдаются значительные остаточные деформации. После чего происходит хрупкое разрушение с конусом отрыва диаметром 100мм</p>		
<p><b>Метод нагнетания, полимочевинная композиция.</b></p> <p>Наблюдается хрупкое разрушение. На фото видны контуры газобетона, повторяющие контуры дюбеля. На границе проникновения композиции образуются дополнительные напряжения при усадке композиции при отверждении, по которым и происходит разрушение</p>		
<p><b>Метод нагнетания, эпоксидная композиция, давление 3 атм.</b></p> <p>Хрупко разрушается лицевая поверхность газобетона глубиной от 30-50 мм, конус отрыва выходит за грани элемента</p>		
<p><b>Метод нагнетания, эпоксидная композиция, давление 6 атм.</b></p> <p>Характер разрушения аналогичен вышеуказанному</p>		

Проекции конусов отрыва отражены на рисунке 7. При установке анкерного крепления по классической технологии конус отрыва значительно меньше, чем при устройстве методом нагнетания. Кроме того, анкерные крепления, устроенные методом нагнетания, включаются в работу сразу после приложения нагрузки, без предварительного обжатия.

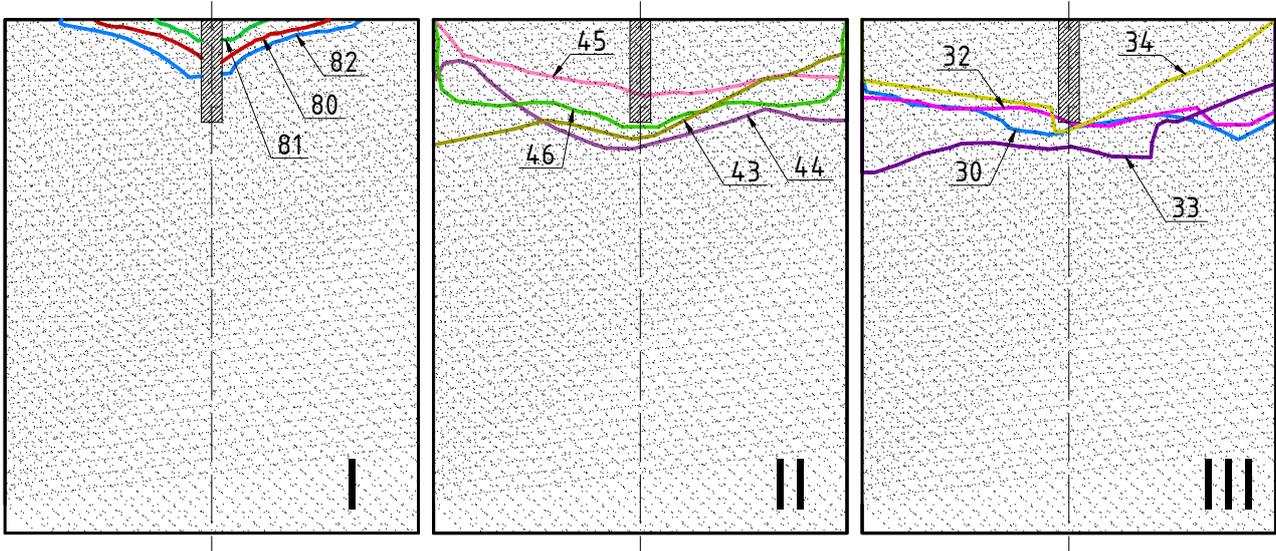


Рисунок 7 – Режим I - D400-Sormat kbt 6, Режим II - D400-ЭД22-3 атм., Режим III - D400-ЭД22-6 атм. Числами указаны номер образцов

Зависимость разрушающей нагрузки от времени нагнетания приведена на рисунке 8.

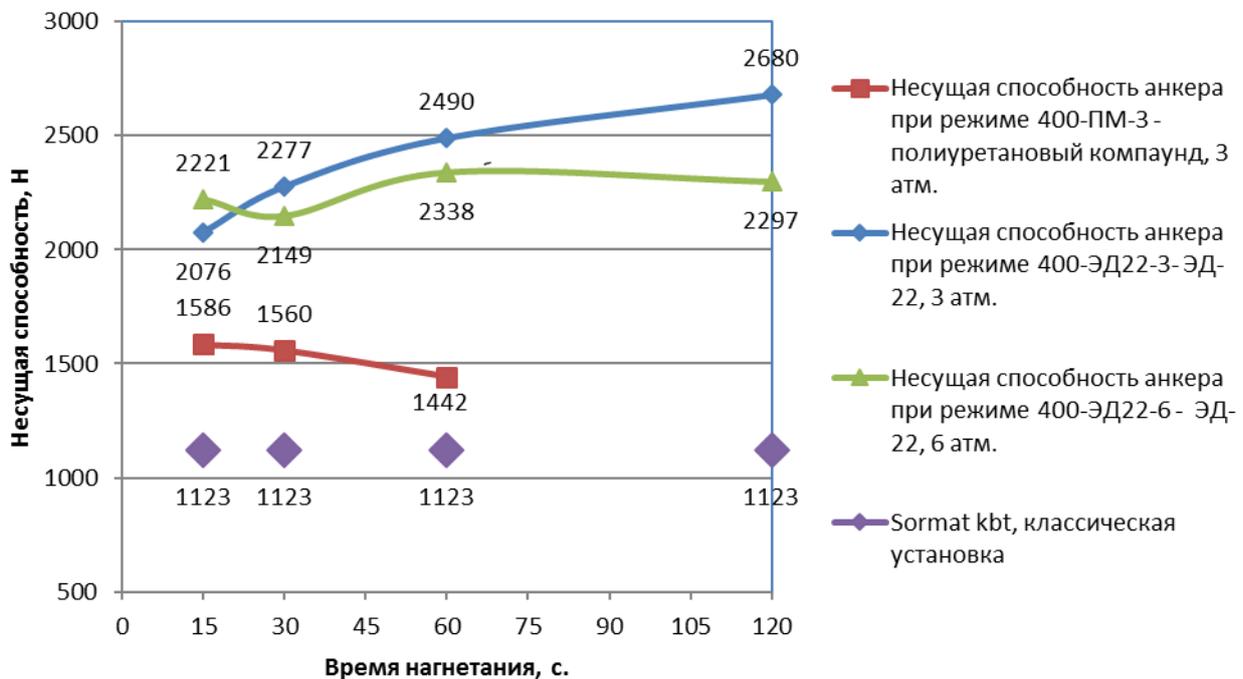


Рисунок 8 – Зависимость несущей способности от времени нагнетания в газобетонные блоки D400

Значение несущей способности анкерного крепления является функцией ряда факторов. В настоящей работе рассматривается влияние технологических

факторов на значение несущей способности при прочих равных, что может быть выражено формулой 4:

$$N_{\text{анк}} = f(R, p, t, \dots, \eta) \quad (4)$$

где  $R$  – кубиковая прочность газобетона на сжатие,  $p$  – значение избыточного давления при нагнетании,  $t$  – время нагнетания,  $\eta$  – динамическая вязкость клеевой композиции.

После проведения стендовых испытаний автором аппроксимированы полученные значения несущей способности в зависимости от параметров, указанных в формуле 4, предложены аналитические зависимости расчета несущей способности. Таким образом, при установке анкерного крепления в газобетонные блоки марки D300, D400 при использовании композиции на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-22 при избыточном давлении 3 атм. значение несущей способности рассчитывают по формулам 5, 6:

*При установке анкерных креплений в газобетонные блоки марки D300, D400:*

$$y = ae^{\frac{b}{x}}, \quad (5)$$

*При установке анкерных креплений в газобетонные блоки марки D500:*

$$y = e^{a + \frac{b}{x} + c \ln x}, \quad (6)$$

где  $y$  – значение несущей способности, Н;  $x$  – время нагнетания, с;  $a, b, c$  – эмпирические коэффициенты (см. таблицу 3)

Таблица 3 – Значения эмпирических коэффициентов, полученных в ходе аппроксимации по основным технологическим режимам

Шифр режима:	Значения коэффициентов
1	2
300-ЭД22-3	$a = 1.77439245817E+003$ ; $b = -3.59542904966E-001$ ; Стандартное отклонение: 55.7202776; К-т корреляции: 0.6429182
400-ЭД22-3	$a = 2.71116195334E+003$ ; $b = -4.30596052237E+000$ Стандартное отклонение: 77.8145621; К-т корреляции: 0.9700315
500-ЭД22-3	$a = 8.46293243889E+000$ ; $b = -1.14986945839E+000$ ; $c = -8.88762322408E-002$ ; Стандартное отклонение: 44.0652266 К-т корреляции: 0.9887355

По результатам стендовых испытаний дополнительно построены графики зависимости несущей способности и от повышения значения избыточного давления (рисунок 9а, б). Как можно видеть из графиков, увеличение избыточного давления благотворно сказывается и целесообразно при устройстве анкерных креплений методом нагнетания только в газобетонные блоки плотностью 500 кг/м<sup>3</sup>.

Повышение избыточного давления не оказало положительного влияния на несущую способность в газобетонных блоках марок D300, 400. На рисунке

10, а. приведен общий вид диаграммы «нагрузка-деформация». Как видно по резкому изменению значений по ординате вблизи экстремума – разрушение анкера проходит хрупко.

Анкерное крепление, установленное методом нагнетания, работает упруго вплоть до 50% разрушающей нагрузки (см. рисунок 10б). Анкерное крепление, установленное по классической технологии, работает упруго до 3-ей ступени нагружения (30% от значения разрушающей нагрузки), при которой остаточные деформации не превышают 0,1 мм, причем значение разрушающей нагрузки двукратно ниже, чем при установке методом нагнетания (см. рисунок 10в).

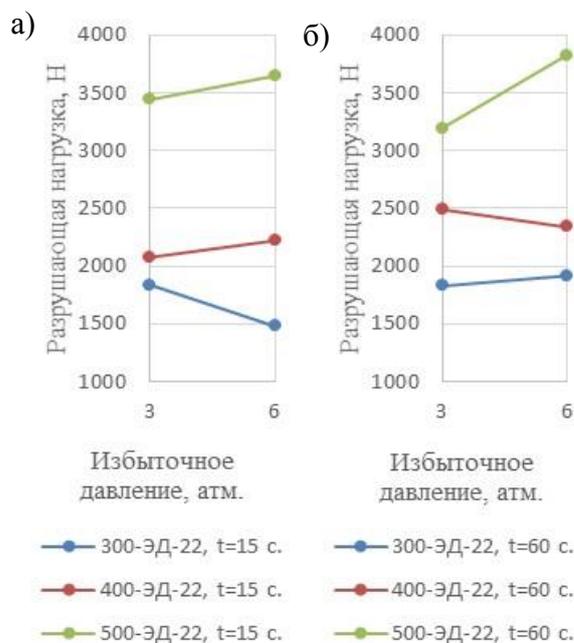


Рисунок 9 – Диаграмма «несущая способность-избыточное давление» для а) режима со временем нагнетания 15 с. и б) для режима со временем нагнетания 60 с.

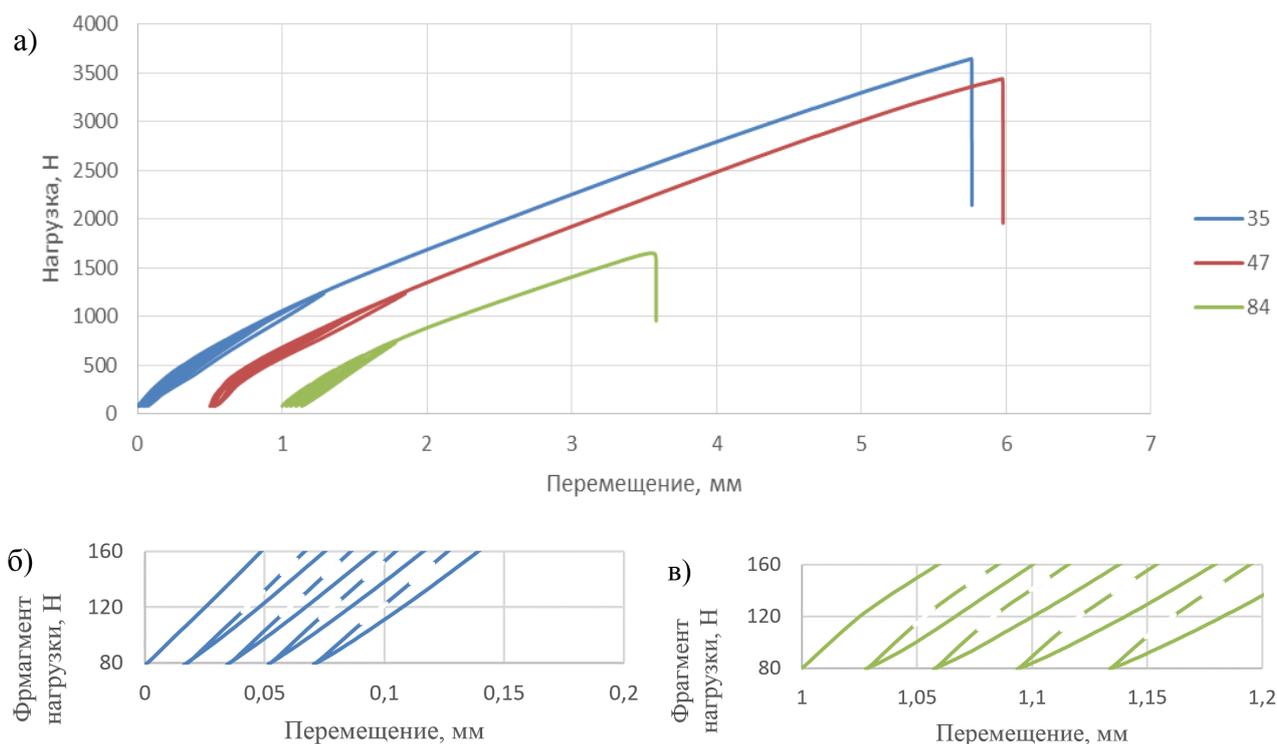


Рисунок 10 – Диаграмма «нагрузка-перемещение», газобетон марки D500. 35 – режим нагнетания смолы ЭД-22 под давлением 6 атм. в течение 15 с., 47 – режим нагнетания смолы ЭД-22 под давление 3 атм., в течение 15 с., 84 – *Sormat kbt 6*, установка без нагнетания.

10а – общий вид диаграммы; 10б – фрагмент диаграммы нагрузка-перемещение на участке 0,0-0,2 мм для D500-ЭД22-6-15; 10в – тоже для *Sormat kbt 6* с установкой по классической технологии. На графиках 10б, в сплошной линии показано нагружение, а пунктирной – разгрузка.

**4. Выявлены и экспериментально подтверждены рациональные технологические параметры режимов нагнетания клеевых композиций при устройстве анкеров методом нагнетания с учетом минимальных материальных, трудовых и энергозатрат, на основании которых разработан технологический регламент. Разработаны и сформулированы методы контроля качества анкерных креплений, установленных методом нагнетания.**

На основе данных, полученных экспериментальным путем, определены оптимальные технологические режимы для устройства анкерных креплений в газобетонные изделия различных марок (см. таблицу 4) при обеспечении максимальной несущей способности крепления.

Таблица 4 – Оптимальные технологические режимы, обеспечивающие максимальную несущую способность анкерного крепления

Марка газобетона	Клеевая композиция	Значение избыточного давления, атм.	Время нагнетания, с
1	2	3	4
D300	эпоксидно-диановая смола ЭД-22, отвердитель ХТ-1186	3	15
D400	эпоксидно-диановая смола ЭД-22, отвердитель ХТ-1186	3	15
D500	эпоксидно-диановая смола ЭД-22, отвердитель ХТ-1186	6	60

При проектировании узла крепления кронштейна навесного вентилируемого фасада на ограждающую конструкцию возможно применение анкеров различных типов, в т. ч. анкеров, устраиваемых по новой улучшенной технологии. Технология устройства анкера не оказывает влияния на конструкцию узла крепления и конструкцию кронштейна. Вариант узла сопряжения с использованием анкера, установленного методом нагнетания, приведен на рисунок 11.

В целях проведения технико-экономического сравнения рассмотрены несколько вариантов устройства анкерных креплений при монтаже навесного вентилируемого фасада (далее – НВФ): вариант I – *Hitli HPD*; вариант II – *Sormat kbt 6*; вариант III – химический анкер с устройством отверстия конусной формы; IV - модернизированный дюбель *Sormat kbt 6* с установкой методом нагнетания. В качестве объема работ, подлежащего сравнению, выбран участок навесного вентилируемого фасада с габаритами – 0,45х3 м, общей площадью 1,35 кв. м. При использовании креплений по вариантам 1, 2 необходимо устройство 12 анкеров и 3 вертикальных направляющих, а по вариантам 3, 4 – необходимо устройство 4 анкеров и 1 направляющей.

Оценка трудозатрат по каждой технологической операции проведена частично на основе нормативно-технологической литературы, а те позиции, которые не освещены в ней, приняты по опытным данным, полученным при проведении стендовых испытаний.

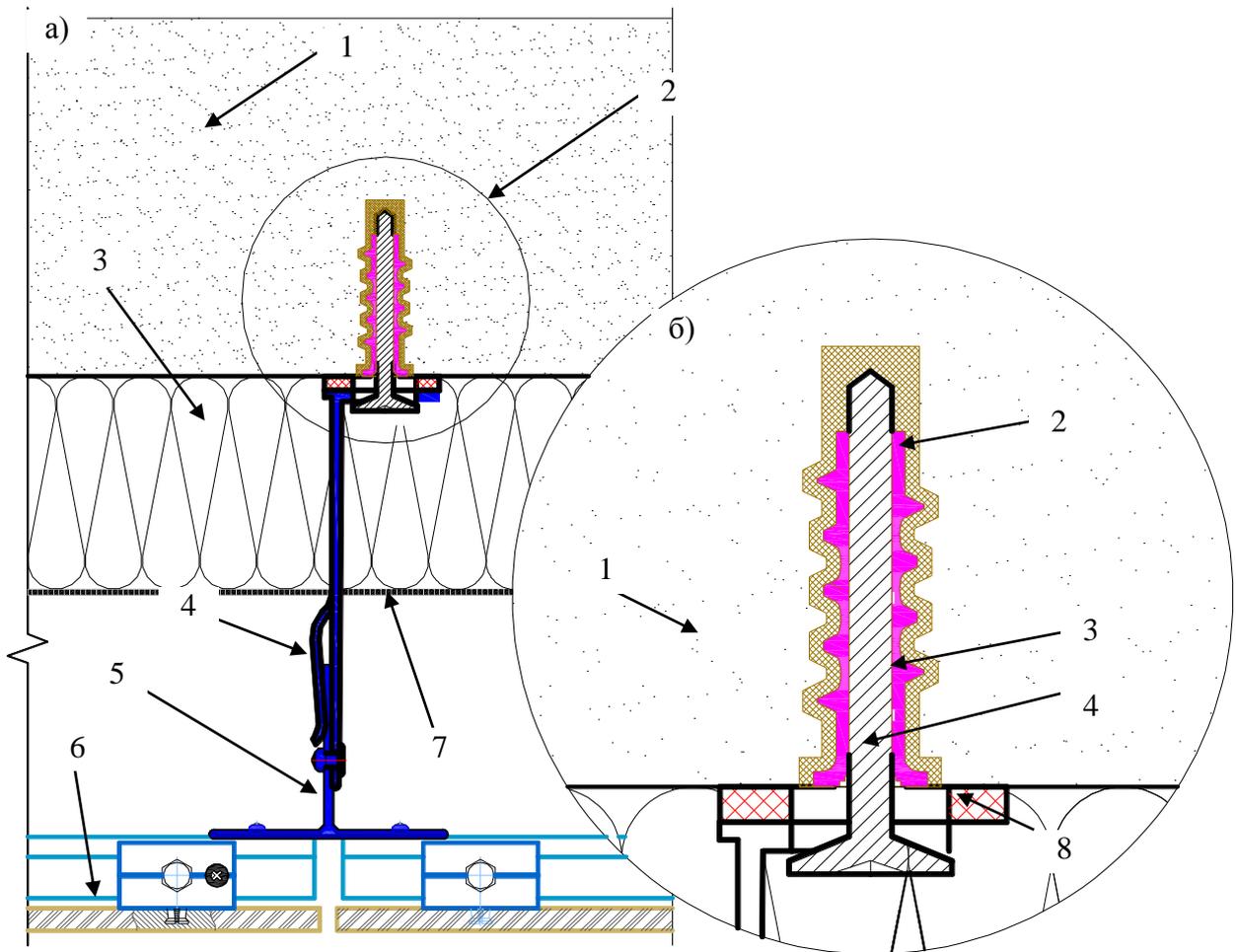


Рисунок 11 – Принципиальный узел крепления НВФ на ограждающую конструкцию из газобетонных блоков с помощью усовершенствованного анкерного крепления.

а) горизонтальный разрез. 1 – газобетонное основание; 2 – узел сопряжения кронштейна с ограждающей конструкцией; 3 – утеплитель; 4 – кронштейн; 5 – вертикальная направляющая; 6 – навесные панели (кассеты); 7 – ветрозащитная мембрана;

б) узел сопряжения кронштейна с ограждающей конструкцией (увеличено); 1 – газобетонное основание; 2 – пропитанная клеевой композицией приконтактная зона дюбель-газобетон; 3 – дюбель; 4 – шуруп или саморез; 8 – резиновая прокладка.

Стоимость прямых затрат на объем работ от разметки основания до фиксации вертикальной направляющей приведена в таблице 5.

Таблица 5 – Относительные показатели по экономическим и трудовым затратам на устройство НВФ по разработанной технологии устройства анкерных креплений методом нагнетания

Вариант устройства анкерных креплений	Стоимость устройства НВФ по каждому из вариантов	Общие трудозатраты, ч-час/м <sup>2</sup>	Приращение трудоемкости выполнения СМР, %	Приращение экономических затрат выполнения СМР, %
1	2	3	4	5
Базовый вариант IV – установка анкерных креплений методом нагнетания	2 901,31	2,8	0	0

Продолжение таблицы 5

Вар. I – установка анкеров НРД	3 515,23	2,9	+ 21,2 %	+ 3,5 %
Вар. II – установка дюбелей <i>Sormat kbt 6</i>	3 392,04	2,7	+ 16,9 %	- 3,5 %
Вар. III – установка химических анкеров с помощью конусного сверла	3 141,23	2,6	+ 8,2 %	- 7,1 %

При контроле качества установки анкерных креплений методом нагнетания применяют как стандартные методы контроля качества так и специальные, а именно контроль наличия пропитанной приконтактной зоны на лицевой поверхности, что свидетельствует о факте нагнетания композиции, и контроль невозможности раскручивания по истечении 24 ч. физическим усилием установленных анкерных креплений методом нагнетания, что дополнительно свидетельствует о требуемых физико-механических свойствах клеевой композиции в отвержденном состоянии.

Технико-экономический эффект от внедрения предложенного технологического решения состоит в повышении несущей способности анкерного крепления на 4,2% по сравнению с наиболее прогрессивными технологиями устройства анкерных креплений в газобетонные изделия. Экономический эффект от внедрения предложенного технологического решения представлен в виде сокращения стоимости на 8,2% при монтаже 1 кв.м. навесного вентилируемого фасада при незначительно возрастающей трудоемкости.

### III Общие выводы

1. Разработан, запатентован и апробирован новый метод анкерных креплений методом нагнетания с использованием дюбеля специальной конструкции, при вкручивании которого образуются каналы в газобетоне, которые обеспечивают свободное прохождение клеевой композиции в поровую структуру газобетона. Устройство анкерных креплений методом нагнетания позволяет обеспечить глубокое и объемное проникновение композиции в газобетонное изделие, что в дальнейшем значительно повысит несущую способность анкерного крепления.

2. Разработаны и обоснованы физическая и математическая модели распространения клеевой композиции в поровом пространстве газобетона в зависимости от параметров подачи, свойств клеевой композиции и свойств материала, а также позволяющие определить время движения клеевой композиции в нагнетательной установке и скорость её проникновения в поровую структуру газобетона.

3. Определены технологические требования к базовым материалам и клеевым композициям при установке анкеров по нагнетательной технологии.
4. Экспериментально установлена зависимость входных технологических параметров на несущую способность анкерного крепления.
5. Исследована фактическая работа анкера под нагрузкой и разгрузкой и установлено, что анкер, установленным методом нагнетания, включается в работу сразу после приложения нагрузки.
6. Предложены формулы, позволяющие прогнозировать несущую способность анкера при различных физико-механических свойствах клеевой композиции, основания, времени подачи и значения избыточного давления.
7. Показана возможность снижения глубины анкеровки дюбеля анкерного крепления.
8. Разработаны методы контроля качества устройства анкерных креплений методом нагнетания.
9. Установлено повышение несущей способности анкерного крепления на 4,2% по сравнению с наиболее прогрессивными технологиями устройства анкерных креплений в газобетонные изделия.
10. Получен экономический эффект от внедрения предложенного технологического решения в виде сокращения стоимости на 8,2% при монтаже 1 кв.м. навесного вентилируемого фасада при незначительно возрастающей трудоемкости.
11. Разработан и внедрен «Технологический регламент по устройству анкерных креплений в газобетонные несущие и ограждающие конструкции методом нагнетания», содержащий указания к проектированию и подбору оптимальных технологических параметров, утвержденный ООО «Центр экспертизы и проектирования строительных конструкций» // ООО «ЦЭиПСК».

#### **IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:**

**публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. **Федулов, Е.С.** Повышение надежности и несущей способности анкерных систем при креплении навесных конструкций на пористые основания [Текст] / В.В. Верстов, Е.С. Федулов // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 5 (46). – С. 68-71. (0,20/0,05 п. л.).
2. **Федулов, Е.С.** Исследование структурного состояния пористых ограждающих конструкций здания в связи с технологическими параметрами установки химических анкерных креплений нагнетательным способом [Текст] /

Е.С. Федулов // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 1 (48). – С. 122-126. (0,33 п. л.).

3. **Федулов, Е.С.** Результаты стендовых испытаний устройства анкерных креплений в поризованные материалы методом нагнетания [Текст] / Е.С. Федулов // Научное обозрение. – 2015. - №10. – С. 2-5. (0,25 п. л.).

4. Пат. №2580494 РФ, МПК F16/B 11/00. Способ установки анкерного крепления/ В.В. Верстов, **Е.С. Федулов**, А.С. Шеховцов; опубл. 10.04.2016, Бюл. №10.

**в прочих изданиях:**

5. **Федулов, Е.С.** Классификация первичных средств креплений (ПСК) по критерию несущей способности и удобству монтажа [Текст] / Е.С. Федулов // Сб. докл. III международн. конгресса студентов и молодых ученых (аспирантов, докторантов) – «Актуальные проблемы современного строительства». – СПб: СПбГАСУ, 2014 – Ч2.С-245-247 (0,19 п. л.).

6. **Федулов, Е.С.** Пути повышения надежности и несущей способности первичных средств крепления [Текст] / В.В. Верстов, Е.С. Федулов // Доклады. 70-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. – СПб: СПбГАСУ, 2014. – Ч1. С.106-109. (0,15 / 0,10 п. л.).

7. **Федулов, Е.С.** Методика экспериментальных исследований несущей способности анкерных креплений, установленных в поризованные стеновые конструкции [Текст] / Е.С. Федулов // Сб. докл. 68-ой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы строительства». – СПб: СПбГАСУ, 2015 – В 2 ч. Ч. 2. С.231-236 (0,3 п. ч.).

8. **Федулов, Е.С.** Основные положения методики экспериментальных исследований несущей способности анкерных креплений и методы их интерпретации [Текст] / В.В. Верстов, Е.С. Федулов // Докл. 71-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета: в 3 ч.: СПбГАСУ. – СПб, 2015. – Ч.1.С.99-103(0,15-0,10 п. ч.).

9. **Федулов, Е.С.** Методика исследования прочностных свойств высоко-деформативных строительных материалов [Текст] / А.В. Тихомиров, Е.С. Федулов // Сб. докл. XXIII международной науч.-пр. конф. – «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты» / Новосибирск. – 2015, - С.129-134 (0,4 п. л.).