

**ХАРКІВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Фомін Станіслав Леонідович

УДК 624.012:536.4:614.841.33

**РОБОТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ
ВПЛИВІ КЛІМАТИЧНОГО, ТЕХНОЛОГІЧНОГО
І ПОЖЕЖНОГО СЕРЕДОВИЩА**

Спеціальність 05. 23. 01 - будівельні конструкції,

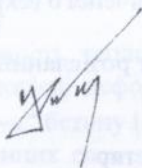
будівлі та споруди,

05. 26. ⁰²~~03~~ - пожежна безпека

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук



Харків - 1997

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі за
Харківського державного технічного ун-ту
(ХДТУБА).

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00752964 (X)

Офіційні опоненти:

1. Доктор технічних наук,
професор Кричевський Олександр Павлович,
професор кафедри залізобетонних конструкцій Донбаської
державної академії будівництва та архітектури.
2. Доктор технічних наук,
професор Коляков Маркус Йосипович,
заступник директора Українського зонального науково-дослідного і
проектного інституту експериментального та типового проектування
житлових і громадських споруд (КиївЗНДНІЕП), м. Київ.
3. Доктор технічних наук,
професор Жартовський Володимир Михайлович,
професор Київського факультету Черкаського інституту
пожежної безпеки

Провідна організація - Державний науково-дослідний інститут будівель-
них конструкцій державного комітету України у
справах будівництва, архітектури та житлової по-
літики. Лабораторія теорії та методів розрахунку
залізобетонних конструкцій (м. Київ)

Захист відбудеться "26" грудня 1997 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 02. 15. 05 Харківської державної академії
залізничного транспорту за адресою : 310050, м. Харків, пл. Фейербаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківської державної
академії залізничного транспорту за адресою : 310050, м. Харків, пл. Фейерба-
ха, 7.

Відгук на автореферат у двох примірниках, завірених печаткою, просимо
надсилати на ім'я вченого секретаря.

Автореферат розісланий "26" грудня 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
канд. техн. наук, доцент

Ермак Є. М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми і ступінь її досліджуваності. Одним із найважливіших напрямків підвищення техніко-економічного рівня будівництва є опрацювання і впровадження нових будівельних конструкцій на основі удосконалювання засобів розрахунку і достовірного обліку зовнішніх впливів. Найбільш поширеними зовнішніми впливами є температурно-вологісні, які діють на всі без винятку залізобетонні конструкції в будь-яких умовах експлуатації.

Для звичайних умов зміни температури і вологості навколишнього середовища розроблено надійні методики їх обліку, конструктивні і технічні заходи щодо зниження додаткових зусиль і деформацій, що виникають при цьому.

При інтенсифікації температури і вологості кліматичного середовища, наявності технологічних джерел чи пожежі температурно-вологісні впливи на залізобетонні конструкції набувають вагомого значення.

Незважаючи на численні розробки в цій галузі, існуючі рекомендації і нормативні положення не охоплюють всі випадки, що зустрічаються в практиці.

Виконання робіт по проектуванню і будівництву об'єктів для країн Африки, а також Азії і Америки з жарким кліматом при несуровості існуючих методик, недостатня вивченість роботи залізобетонних конструкцій, особливо вплив пожежі, необхідність опрацювання норм для України на точній основі, утворення нових типів споруд з забезпеченою межею вогнестійкості, підвищення залишкової міцності будов і споруд як тих, що будуються, так і тих, що реконструюються, висувають проблему, що розглядається, в число першорядних.

Робота проводилася за цільовими і галузевими програмами НДП 0. 55. 16. 031, 055. 01. 121, 0. Ц. 31. 0. 55. 16 Ц, а також Держбюджетним НДП України № 0026 і № 0037.

Метою дисертаційної роботи є створення методу розрахунку залізобетонних елементів, працюючих в умовах впливу кліматичного, технологічного і пожежного середовища, опрацювання і впровадження на його основі ефективних конструкцій будов і споруд.

Для досягнення поставленої мети намічено такі основні задачі:

1. Експериментально дослідити закономірності тепловологопереносу у важкому бетоні, його вільні температурні і вологісні деформації, повзучість, вплив нагрівання на характер повних діаграм "σ-ε" бетону і арматури.

2. Розробити метод розрахунку залізобетонних елементів, працюючих в умовах впливу кліматичного, технологічного і пожежного середовища.

ЛНУ ім. Е. Г. Шен-
Гену
АН України

3. На основі створеного методу розробити числові методики визначення температурних і вологісних полів в перерізах залізобетонних елементів.

4. Розробити способи оцінки напружено-деформованого стану залізобетонних елементів, працюючих при температурно-вологісних впливах середовища і механічних навантажень.

5. Розробити способи розрахунку вогнестійкості залізобетонних елементів і їх залишкової міцності після пожежі, на основі запропонованого методу.

6. Провести експериментальну перевірку розробленого методу.

7. Розробити ефективні конструктивні рішення різноманітних типів залізобетонних елементів, працюючих при температурно-вологісних впливах, на основі запропонованого методу, в тому числі з забезпеченою межею вогнестійкості і заданої залишкової міцності після пожежі.

8. Впровадити результати роботи.

Об'єкт дослідження - залізобетонні конструкції будов і споруд, які працюють під впливом кліматичного, технологічного і пожежного середовища.

Методологія дослідження побудована на дослідному вияві впливу температури і вологості на характеристики тепловологопровідності, вільні температурно-вологісні деформації, повзучість, повні діаграми "σ-ε" бетону і арматури, що складають експериментальну основу методу розрахунку залізобетонних конструкцій, працюючих в умовах впливу кліматичного, технологічного і пожежного середовища; на опрацюванні нових теоретичних підходів до явища, яке вивчається, і критеріїв, що забезпечують якість і безпеку залізобетонних конструкцій; на використанні числових способів рішення нелінійних диференціальних рівнянь тепловологопровідності й оцінок напружено-деформованого стану з опрацюванням на їх основі методики розрахунку вогнестійкості і залишкової міцності, а також на експериментальній перевірці і впровадженні результатів дослідження в практику.

Особисто отримані дисертантом результати, що виносяться на захист:

- експериментальні дані про вологопровідність, вологоємкість важкого бетону і його вологообміну з навколишнім середовищем; імпульсний спосіб визначення теплопровідності, теплоємності і температуропровідності будівельних матеріалів і виробів без порушення їх суцільності, методика ідентифікації тепло-вологофізичних характеристик шляхом рішення інверсної задачі в інтерактивному режимі на IBM PC/AT; експериментальні дані про теплопровідність і теплоємність бетону;

- уточнена методика визначення температурно-вологісних деформацій бетону на основі теоретичного аналізу об'ємного напружено-деформованого стану зразків-призм в процесі сушіння;

- експериментальні дані про вплив температури і вологості на деформації усадки і набухання важкого бетону, температурні деформації, усадки глинистих ґрунтів підвалин, що приводить до додаткових зусиль в фундаментах при їх нагріві технологічним середовищем, деформації повзучості;

- нова методика експериментальних досліджень і установка для визначення повних діаграм "σ-ε" бетону при високих температурах; експериментальні дані про вплив температури на повні діаграми "σ-ε" важкого бетону, вперше виявлена афінноподібність повних діаграм при нагріві.

- метод, що пропонує розрахунок залізобетонних елементів, працюючих в умовах впливу кліматичного, технологічного і пожежного середовища, який включає нові теоретичні положення оцінки вологопровідності бетону, оснований на понятті потенціалу вологості; запропонована модифікована система диференційних рівнянь тепловологопереносу в бетоні; теоретичні положення розрахунку вільних температурно-усадочних деформацій важкого бетону і глинистих ґрунтів, напружено-деформованого стану, вогнестійкості і залишкової міцності; реалізація запропонованого методу при опрацюванні числових способів визначення температурних і вологісних полів в перерізах залізобетонних елементів;

- алгоритми і програми розрахунку температурно-вологісних полів в залізобетонних конструкціях при одномірному, двомірному та тримірному потоках тепла і вологи; аналогові засоби і прилади для рішення завдань тепло- і вологопровідності в бетоні;

- методика числового рішення системи нелінійних диференційних рівнянь тепловологопереносу для прямокутного перерізу з застосуванням консервативної скінченно-різницевої схеми, алгоритм і програма розрахунку на IBM PC/AT;

- методика теплотехнічного розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій при одно-, двох, трьох і чотирьохсторонньому нагріві;

- способи оцінки напружено-деформованого стану залізобетонних елементів з використанням розробленого методу; алгоритми і програми розрахунку на IBM PC/AT температурно-вологісних напружень при обліку повної діаграми "σ-ε" бетону і арматури;

- методика розрахунку напружено-деформованого стану масивних залізобетонних елементів прямокутного перетину при змушених температурно-вологісних деформаціях ураховуючи повзучість; результати математичного моделювання напружено-деформованого стану в системі залізобетонний елемент - підвалина при температурно-вологісних впливах; спосіб зниження температурно-усадочних зусиль в будівельних конструкціях;

- теоретичні основи розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій з урахуванням повних діаграм "σ-ε" бетону і арматури;

- розроблена методика розрахунку вогнестійкості і залишкової міцності, після впливу пожежі стислих, вигнутих, статично невизначених залізобетонних конструкцій;

- результати натурних досліджень несучих конструкцій будівель і споруд в помірному, субтропічному, тропічному і субекваторіальному кліматі;

- результати досліджень температурно-усадочних напружень в прямих і криволінійних балках при впливі технологічних температур;

- результати досліджень стислих, вигинальних і статично невизначених залізобетонних конструкцій при впливі пожежного середовища і наступного охолодження водяними струменями, вогнестійкості і залишкової міцності;

- розроблені і впроваджені ефективні конструктивні рішення залізобетонних елементів будівель і споруд, працюючих при температурно-вологісних впливах.

В і р о г і д н і с т ь одержаних результатів підтверджується коректністю методик, сучасним рівнем експериментальних досліджень, використанням засобів математичної статистики при обробці результатів і висновку емпіричних формул, задовільним збігом результатів проведених експериментів із розрахунками, виконаними за розробленими методиками, використанням останніх досягнень нелінійної теорії залізобетону, тривалою експлуатацією відновлених конструкцій.

Наукова новизна роботи:

- експериментально встановлені закономірності впливу температури і вологості на вологопровідність, вологоємкість, теплопровідність, теплоємкість, тепло- і водообмін бетону з навколишнім середовищем; запропоновані нові залежності температурних деформацій, усадки і набухання важкого бетону, повзучості від температури і вологості; одержані повні діаграми "σ-ε" важкого бетону при нагріві;

- розроблено метод розрахунку залізобетонних елементів, працюючих в умовах впливу кліматичного, технологічного і пожежного середовища з обліком фізичної нелінійності в усіх аспектах проблеми: нелінійності рівнянь тепловологопровідності в зв'язку з залежностями характеристик переносу від температури і вологості; нелінійності рівнянь, що описують напружено-деформований стан, обумовлених мінливістю міцнісних і деформативних характеристик бетону і арматури;

- розроблені нові способи числового визначення температурних і вологісних полів в перерізах залізобетонних елементів;

- запропоновані способи оцінки напружено-деформованого стану залізобетонних елементів з використанням розробленого методу ;

- розроблені нові принципи розрахунку вогнестійкості і залишкової міцності залізобетонних елементів після впливу пожежі на основі запропоно-

ваного методу;

- виявлені нові закономірності зміни залишкової міцності залізобетонних елементів в залежності від температури попереднього нагріву, тривалості пожежі, зміни міцності при одночасному впливі пожежі і навантаження;

- розроблені нові ефективні рішення залізобетонних конструкцій, що працюють при температурно-вологісному впливі.

Практична значимість роботи полягає в тому, що на основі запропонованого методу розрахунку залізобетонних елементів відкривається можливість раціонального проектування будівель і споруд, працюючих в умовах впливу кліматичного, технологічного і пожежного середовища з забезпеченням заданих меж вогнестійкості, точної оцінки наслідків нагріву, залишкової міцності залізобетонних елементів, опрацювання рішень захисту, тактики гасіння пожеж, відбудови і підсиленню конструкцій, які постраждали від пожеж.

Рівень реалізації, впровадження результатів роботи. Розроблений метод розрахунку і принципи конструювання впроваджено в таких нормативних, інструктивних документах : розділ БНіП 2.03. 04-84 "Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур", "Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций, предназначенных для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур" к БНіП 2.03.04-84, "Руководство по проектированию фундаментов оборудования и сооружений подземного хозяйства прокатных и трубных цехов", "Рекомендации по проектированию фундаментов под технологическое оборудование, возводимых в условиях реконструкции на основе анализа и обобщения существующего опыта", "Рекомендации по проектированию и усилению железобетонных хранилищ для сыпучих материалов, в том числе с повышенной температурой, применительно к условиям реконструкции", "Руководство по проектированию силосов для сыпучих материалов", "Руководство по обеспечению долговечности железобетонных конструкций предприятий черной металлургии при их реконструкции и восстановлении", "Инструкция по расчету и конструированию фундаментов электропечей большой единичной мощности", "Руководство по проектированию бетонных и железобетонных конструкций для жаркого климата", "Рекомендации по расчету температуры нагрева подземных строительных конструкций", Руководство "Нагрузки и воздействия на здания, сооружения, вызванные деформациями земной поверхности", "Рекомендации по проектированию подпорных стен, подвергающихся воздействию высоких температур".

Результати роботи впроваджені при проектуванні і будівництві таких нових об'єктів: фундаментів доменної печі № 6 і повітрянагрівача Ново-Липецького металургійного заводу, доменних печей № 4, 5, 6, Магнітогорського металургійного комбінату, доменних печей № 5 Череповецького, № 2 Челябінського

металургійних заводів, № 2 НВО " Тулачермет " Ново-Тульського, № 5 Єнакіївського, № 4 Макіївського металургійних заводів.

Нові технічні рішення і методики розрахунку впроваджені при будівництві фундаментів повітрянагрівачів доменної печі №2 металургійного заводу Аріамехр м. Ісфахан (Іран), доменної печі № 2 метзаводу в м. Карачі (Пакистан), доменної печі на метзаводі в м. Іскендеруні (Турція), доменної печі № 2 метзаводу м. Бхілаї (Індія), будівельних конструкцій ливарного цеху заводу ім. Хосе Марті (Куба), Чендїїнського метзаводу (Кореїська НДР).

Результати досліджень впроваджені в робочі креслення і в будівництво фундаментів коксових батарей № 5, 6, 7, 8, 9 на Авдіївському КХЗ, коксових батарей № 1, 2, 4, 5 Дніпропетровського КХЗ, коксових батарей № 2 і № 4 Орсько-Халіловського МК, фундаментів коксових батарей на Західносибірському, Карагандинському, Череповецькому КХЗ, в проєктах нового будівництва і реконструкції фундаментів на заводах Железара Зеніца (Югославія), Кремиковці (Болгарія), Дунай Вашмю (Угорщина), Ель-Ходжар (Алжир), Алжаокута (Нігерія).

Нова кострукція фундаменту повітрянагрівача впроваджена на Нижньо-Тагільському металургійному комбінаті і металургійному заводі в м. Візакхпатнамі (Індія), в проєкти перекриттів будівель і споруд, розроблених Укрміськбудпроектм.

Розробки за технічними рішеннями фундаментів електропечей, в тому числі при аварійному пролитті металу, впроваджені в проєкти реконструкції фундаментів на Єрмаковському, Нікопольському, Зестафонському, Дружківському заводах, Московському машинобудівному заводі, Оскольському електрометалургійному комбінаті та ін.

Розроблені методики розрахунку вогнестійкості і залишкової міцності впроваджені в проєкти реконструкції будівель, які постраждали від пожеж (будівлі Красноградської дослідної станції, житлових будівель в м. Харкові та ін.), в рекомендації тактики гасіння пожеж в будівлях і спорудах з несучими залізобетонними конструкціями, в навчальний посібник для курсантів і слухачів, що навчаються за спеціальністю "Пожежна безпека".

А п р о б а ц і я р о б о т и. Основні результати дисертації доповідалися і обговорювалися на Всесоюзних наукових конференціях по бетону і залізобетону (VII конференція, м. Ленінград, 1972 р., VIII конференція, м. Харків, 1977 р., IX конференція, м. Ташкент, 1983 р., X конференція, м. Казань, 1988 р.), Всесоюзній нараді з моделювання при дослідженні будівельних конструкцій (м. Київ, 1972 р.), Всесоюзному семінарі з рішень задач математичної фізики на електроінтеграторі ЕГДА (м. Київ, 1968 р.), Всесоюзній нараді з досліджень процесів сушіння і першого нагріву жаростійкого бетону і їх впливу на міцність конструкцій (м. Москва, 1973 р.), Всесоюзній нараді з проблем опрацювання,

проектування і зведення висотних промислових залізобетонних труб (м. Москва, 1979 р.), Всесоюзній нараді з підвищення надійності енергетичних споруд (м. Москва, 1982 р.), Всесоюзних нарадах з проектування бетонних і залізобетонних конструкцій, призначених для роботи в умовах сухого жаркого клімату (м. Ташкент, 1984 р., м. Наманган, 1986 р.), Всесоюзній конференції з фундаментальних досліджень і нової технології в будівельному матеріалознавстві (м. Белгород, 1989 р.), Міжнародній конференції "Ресурсозберігаючі технології будівельних матеріалів, виробів і конструкцій" (м. Белгород, 1993 р.), конференції з оцінки надійності і довговічності залізобетонних будов і споруд при їх реконструкції (м. Челябінськ, 1984 р.), Всесоюзній координаційній нараді з впливу кліматичних умов і режимів навантаження на деформації і міцність залізобетонних конструкцій (м. Тбілісі, 1985 р.), нараді з експлуатаційної надійності інженерних споруд при складних навантаженнях і впливі зовнішнього середовища (м. Ташкент, 1991 р.), Зональній конференції з зниження матеріалоемкості і вартості в будівництві при реконструкції будов (м. Пенза, 1990 р.), Республіканській конференції з удосконалення залізобетонних конструкцій, працюючих на складні види деформацій (м. Полтава, 1989 р.), конференції з удосконалення реконструкції промислових будов і споруд (м. Дніпропетровськ, 1990 р.), 40 - 49 конференціях ХІБІ (м. Харків, 1986-1994 рр), на Міжнародній конференції "Удосконалення будівельних матеріалів, технологій і засобів розрахунку конструкцій в нових економічних умовах" (м. Суми, 1994 р.), Міжнародній конференції "Ресурсозберігаючі матеріали, конструкції, будівлі та споруди" (м. Рівно, 1996 р.), на першій Всеукраїнській науково-технічній конференції "Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону" (м. Київ, 1996 р.), конференціях ХДГУБА 1994-1997 рр.

За участь в розробці нових методів розрахунку залізобетонних конструкцій та вдосконалення конструктивних рішень автор у 1980 і 1982 рр нагороджений срібною та бронзовою медалями ВДНГ; у 1986 р. - Знаком "Винахідник СРСР". Окремі дослідження виконувалися спільно з аспірантами, роботою яких керував автор, нині кандидатами технічних наук, А. А. Ахмедовим, О. А. Петровим, А. В. Колісником, Баха Елдін Мохамед Меккі, Магді Шаріф Саліхом, Н. Н. Кулешовим, Джафар Шакер Халід Шахіном, О. А. Стельмахом, інженерами Є. Г. Лобасенко, І. А. Плахотниковою, А. І. Галичем, Л. А. Фурсовою.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 123 праці.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, дев'яти розділів, висновків і списку використаних джерел і викладена на 515 сторінках машинописного тексту, в тому числі, 286 сторінок основного тексту, 171 малюнок і 13 таблиць на 168 сторінках, бібліографія з 289 найменувань на 27 сторінках і 34 сторінок додатку.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Стан питання. Дослідженнями О. П. Кричевського, Г. Ліпсмайера, І. Н. Малінського, А. Ф. Милованова, С. А. Миронова, В. П. Пунагіна, А. Н. Рімши, Б. Саїні, В. Н. Самойленка, О. Г. Тарасова, Є. М. Щербакова, Т. М. Юмоля, З. Ю. Юсупова, Я. Ясичака та ін. встановлено, що виникнення температурно-вологісних деформацій у перерізі елементів при кліматичних впливах призводить до появи внутрішніх чи зовнішніх тріщин, викришування та відслоювання бетону, зміни його фізико-механічних характеристик. В роботах В. Н. Горячева, В. В. Жукова, І. Н. Заславського, С. І. Рижова, В. Ф. Рябчича, В. І. Сіденко, С. Ф. Тімановського, В. В. Фігаровського, Н. П. Шаламова та ін. викладений досвід експлуатації залізобетонних конструкцій в гарячих цехах скляної, металургійної та ін. галузей промисловості, в дослідженнях В. І. Агаджанова, Л. А. Аштона, Б. Бартемі, Д. Є. Бессі, Б. Г. Демчини, В. М. Жартовського, Н. А. Ільїна, М. Й. Колякова, Ж. Крюпа, Г. Дж. Ленгдон-Томаса, Х. Л. Мальхотра, А. Ф. Милованова, В. І. Мурашова, П. Х. Петерсена, В. А. Пчелинцева, М. Я. Ройтмана, І. Г. Романенкова, А. Е. Сегалова, В. В. Соломонова, В. І. Сичева, В. С. Федоренко, А. І. Яковлева та ін. виявлено негативний вплив пожежі на залізобетонні конструкції.

Оцінка впливу температурно-вологісного середовища складається з визначення температурно-вологісних полів у перерізах елементів, вияві залежностей вільних температурних, усадочних деформацій і деформацій набухання від температури та вологості, аналізу напружено-деформованого стану конструкції.

Розрахунку температурно-вологісних полів у бетонних та залізобетонних конструкціях присвячені роботи С. В. Александровського, А. В. Белова, П. І. Васильєва, Г. Д. Вишневецького, А. А. Гвоздева, І. Д. Запорожця, А. В. Ликова, Ш. Н. Плята, І. Е. Прокоповича, К. Ф. Фокіна, А. У. Франчука, С. А. Фріда, В. М. Штейнберга, А. І. Яковлева та багатьох інших авторів.

Досвід показує, що у діапазоні зміни кліматичних температур її розподіл в перерізі елементів може бути визначено на основі рішення лінійного диференційного рівняння теплопереносу. Застосування аналогічного рівняння для розрахунку полів вологості, відповідно до існуючих нормативних документів, призводить до істотних розходжень з експериментом, до великих помилок в оцінці напружено-деформованого стану конструкцій.

Виявлена доцільність застосування теорії вологопровідності В. Н. Богословського на основі введення поняття експериментального потенціалу вологості, що визначається функцією, яка характеризує ступінь вологості бетону. Перенос вологи йде від вищого потенціалу до нижчого. Ця теорія дозволила пояснити невідповідність експериментальних дослідів розрахунковому розподі-

лу вологості за класичною теорією, сформулювати диференційне рівняння вологопереносу, встановити пряму математичну аналогію з рівнянням теплопровідності та фізичну аналогію з характеристиками теплопереносу.

Диференційне рівняння вологопровідності у зв'язку з мінливістю характеристик вологопереносу є нелінійним та вимагає спеціальних засобів його рішення (Л. А. Коздоба, Дж. Кранк, А. В. Ликов, Ю. М. Мацевитий, Н. Фрідман та ін.). Відносно молода теорія вологопровідності вимагає свого розвитку в частині уточнення шкали потенціалу вологості, уточнення диференціальних рівнянь тепловологопереносу, експериментального визначення характеристик важкого бетону, температурно-вологісних режимів середовища, розробки засобів, приладів для визначення температурних та вологісних полів.

Дослідження деформацій усадки і набухання при нагріві проводилися С. В. Александровським, А. Я. Барашиковим, А. В. Беловим, М. Беннетом, О. Я. Бергом, А. В. Голишєвим, Т. Л. Інгляндом, О. П. Кричевським, М. Кохда, А. Ф. Міловановим, А. В. Путансом, Л. Р. Сірих, В. М. Самойленком, Й. І. Улицьким, С. Г. Фарбером, К. Чуйо, Є. М. Щербаковим та ін. Незважаючи на розроблені стандарти і рекомендації щодо методики експериментального визначення вимушених деформацій, вони мають ряд неточностей. Однією з причин погіршеності є наявність об'ємного напруженого стану у торцевих частинах дослідних зразків.

Дослідження, проведені Н. С. Бушевим, Н. С. Бушуєвим, Н. І. Зенковим, Л. М. Завісновою, О. П. Кричевським, А. Ф. Міловановим, К. Д. Некрасовим, В. Г. Олімпієвим, М. В. Яковлевим свідчать, що міцність важкого бетону на осьовий стиск та осьовий розтяг при високих та підвищених температурах істотно знижується.

А. А. Гвоздевим та В. Н. Байковим відзначалося, що уточнення теорії залізобетону у стадії, близькій до руйнування, може бути проведено з використанням повної діаграми " σ - ϵ " бетону. Визначенням параметрів повної діаграми присвячені роботи В. Н. Байкова, А. Я. Барашикова, А. Н. Бамбури, В. Я. Бачинського, А. Б. Голишева, С. В. Горбатова, Ю. П. Гуши, З. А. Димитрова, Ю. А. Івашенко, Л. Л. Лемиша, А. Д. Лобанова, М. С. Марате, А. Л. Моріна, Р. М. Еванса та ін., на основі яких розроблені пропозиції до нормативних документів. Разом з цим повна діаграма " σ - ϵ " для важкого бетону в умовах високо-температурного нагріву практично не вивчена, у той час як вірогідність оцінки меж вогнестійкості, залишкової міцності та жорсткості залізобетонних конструкцій пов'язана з урахуванням непружних властивостей бетону і арматури.

Внаслідок виконаного аналізу визначені та сформульовані завдання нинішніх досліджень.

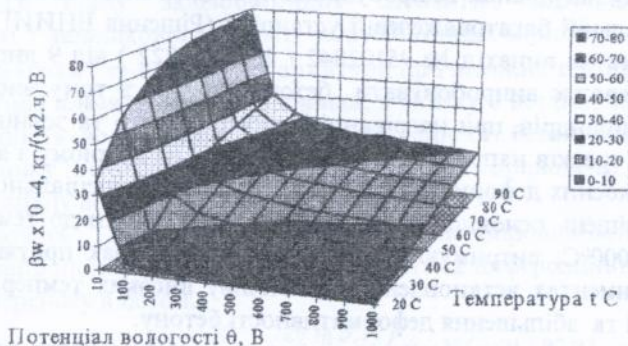
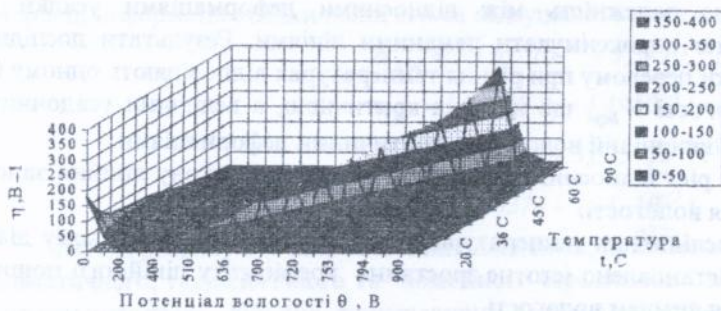
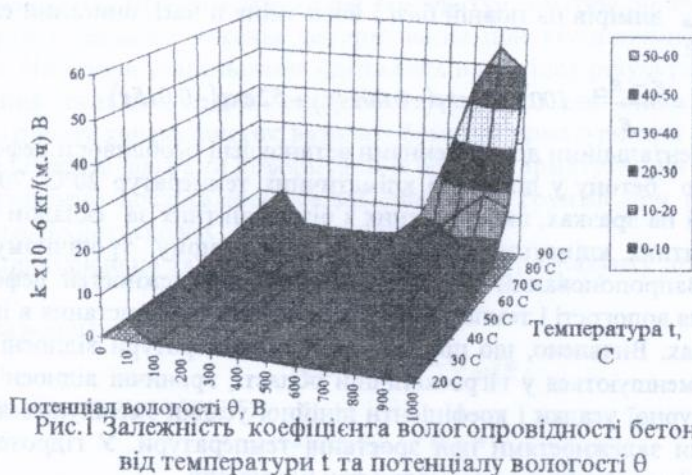
З метою створення експериментальної основи методу, що забезпечує розрахунки залізобетонних конструкцій, проведено комплекс експериментальних досліджень. Була підвищена вірогідність шкали потенціалу вологості

В. І. Тертичника у гігрометричній області, розроблена методика аналітичного її визначення; встановлено розмір граничного потенціалу. Проведене узагальнення всіх експериментальних даних дозволило скласти таблиці, зручні для практичного вжитку. Визначені умови подібності поміж сорбційними характеристиками різноманітних сортів фільтрувального паперу і одержано коефіцієнт переходу від будь-якого сорту до еталонного Ф-1, що значно поширює можливості практичного виміру потенціалу вологості. Розроблено новий спосіб електричного виміру потенціалу вологості (а. с. 389452). Запропонована методика визначення потенціалу вологості повітря навколишнього середовища, на основі якої складені достеменні таблиці для визначення потенціалу вологості, залежно від температури і відносної вологості. На основі одержаних експериментальних даних традиційним та запропонованим способом (а. с. 1746273) отримана емпірична формула для визначення ізотерм сорбції важкого бетону. Проведені експериментальні дослідження вологості, вологості провідності і вологообміну з навколишнім середовищем важкого бетону, що виявили істотний вплив на них температури і потенціалу вологості (рис.1...3). За результатами досліджень складені таблиці для розрахунку. Розроблено новий спосіб виміру теплопровідності, теплоємності та температуропровідності будівельних матеріалів без порушення їх суцільності (а. с. 1620733), за допомогою якого проведено експериментальні дослідження теплофізичних характеристик бетону. Розроблено обладнання для визначення теплотехнічних характеристик бетону при підвищених і високих температурах імпульсним способом і програма у табличному процесорі Excel for Windows для визначення інтегральних характеристик імпульсного способу, а також програма для ідентифікації теплофізичних характеристик з результатами рішення інверсної задачі при обробці дослідних даних. Експериментально виявлені залежності коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності від температури і вологості.

Запропоновано методику визначення температурно-вологісних режимів роботи бетонних і залізобетонних конструкцій при впливі кліматичного середовища, яка ґрунтується на міжнародній класифікації розподілу території Земної кулі на кліматичні пояси і області. Режим роботи району будівництва визначаються завданням перебігу середньомісячних температур і значень потенціалів вологості повітря. Розроблено таблиці узагальнених режимів для кожного кліматичного поясу всесвіту.

Запропоновано методику експериментального визначення температурно-вологісних деформацій бетону, що дозволить істотно спростувати випробування і знизити погрішність виміру деформацій.

Теоретичне дослідження величини цієї погрішності проведено шляхом визначення двовірного поля вологості в перерізах призми при боковому вологообміні з навколишнім середовищем з розробленої методики і наступному аналізі напружено-деформованого стану засобом кінцевих елементів у перемі-



щеннях. Запропоновано перехідний коефіцієнт для визначення дійсних деформацій усадки ε_{cs} вимірів на повній базі і його зміна в часі, описаний емпіричною формулою:

$$k = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{cs}}{\varepsilon} \cdot 100 = 52 \exp(-0,0014\tau) - 52 \exp(-0,015\tau) \quad (1)$$

Експериментальними дослідженнями встановлені особливості деформацій усадки важкого бетону у діапазоні кліматичних температур 20°C...70°C. Досліди проведені на зразках, виготовлених з різноманітних за складом бетонів та у різноманітних кліматичних поясах: субтропічному, тропічному, екваторіальному. Запропонований новий спосіб запису залежностей деформацій усадки від рівня вологості і температури, зручний для використання в інженерних розрахунках. Виявлено, що при підвищенні температури відносні деформації усадки зменшуються у гігроскопічній області, граничні відносні деформації температурної усадки і коефіцієнти лінійної усадки зменшуються за експоненціальними залежностями при зростанні температури. У гідротермічній області спостерігається зростання усадки при нагріванні.

Запропоновано залежність між відносними деформаціями усадки і відносною вологістю апроксимувати ламаними лініями. Результати дослідів показують, що точки перелому при різних температурах відповідають одному й тому ж рівню вологості W_{bc} , що названа критичною, а величини усадочних деформацій ε_{cs} , відповідні цій вологості - критичними деформаціями.

Виявлено, що ріст відносних деформацій набухання бетону лінійно залежить від збільшення вологості.

Проведено дослідження температурних деформацій бетону у всьому діапазоні вологості. Встановлено істотне зростання коефіцієнту лінійного поширення бетону із збільшенням вологості.

Виявлено закономірності деформування бетону при інтенсивному високо-температурному нагріванні. Випробування проведені на спеціально сконструйованій оригінальній багатоважелевій установці (Рішення ВНИИГП Э про видавання патента на винахід № 95102842 / 28 (004322) від 9 липня 1996 р.). Установка дозволяє випробовувати бетонні зразки, в тому числі, у вигляді порожнистих циліндрів, при нагріванні із внутрішнього та зовнішнього боку. Навантаження зразків напрацьовувалось етапами, на кожному з яких задавався припуск відносних деформацій бетону за допомогою спеціального приладу - приводу переміщень основного важеля. Нагрівали зразки до температур 200, 400, 600, 800, 1000°C, витримуючи їх при цих температурах протягом 1 години.

В експериментах встановлена міра впливу високих температур на зниження міцності та збільшення деформативності бетону.

На основі аналізу проведених досліджень зроблено надто важливий висновок про афінноподібність діаграм "σ-ε" бетону при різноманітних температу-

рах, що дозволяє скористатися найбільш показною системою нормування, розробленою ДНДІБК для звичайних температур, з метою опису необхідної забезпеченості реальних законів деформування при високотемпературному нагріванні. На основі узагальнення одержаних в дослідях результатів і літературних даних складено пакет емпіричних формул для опису напружено-деформативних характеристик важкого бетону і арматури при нагріванні. На рис. 4, 5 показані діаграми деформування бетону і арматури при нагріванні.

Проведено дослідження усадки глинистих ґрунтів при нагріванні, яка приводить до додаткових зусиль в конструкціях.

Запропоновано такі емпіричні формули для розрахунку деформацій усадки:

для вологого ґрунту

$$\varepsilon_{gtd} = \varepsilon_{gutd} - \alpha_{gtd} W, \quad (2)$$

для підсушеного ґрунту

$$\varepsilon_{gt} = \varepsilon_{gut} - \alpha_{gt} W, \quad (3)$$

де α_{gtd} , α_{gt} , ε_{gutd} , ε_{gut} - коефіцієнти лінійної усадки та граничні відносні деформації усадки вологого та підсушеного ґрунту відповідно.

$$\alpha_{gtd} = 5,136 \cdot 10^{-2} - 9,3 \cdot 10^{-5} t \quad (4)$$

$$\alpha_{gt} = 1,56 \cdot 10^{-2} - 1,4 \cdot 10^{-4} t \quad (5)$$

$$\varepsilon_{gutd} = 0,13125 - 3,625 \cdot 10^{-5} t \quad (6)$$

$$\varepsilon_{gut} = 0,080374 - 1,14 \cdot 10^{-5} t \quad (7)$$

Метод розрахунку залізобетонних елементів, працюючих в умовах впливу кліматичного, технологічного та пожежного середовища, включає оцінку тепловологопереносу, вільних температурно-вологісних деформацій; повзучості, повних діаграм "σ-ε" бетону і арматури, визначення напружено-деформованого стану залізобетонних елементів, методики розрахунку вогнестійкості і залишкової міцності залізобетонних конструкцій з урахуванням повних діаграм "σ-ε" бетону і арматури при високих температурах.

При впливі кліматичного середовища, в зв'язку з встановленою в експериментах залежністю вологоємкості і вологопровідності бетону від температури і вологості оцінку вологопереносу в ньому треба проводити, застосовуючи теорію потенціалу вологості.

Грунтуючись на положеннях теорії вологопровідності В. Н. Богословського, запропонована модифікована система диференціальних рівнянь тепло- і вологопереносу в бетоні:

$$\rho \eta(\theta, t) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \rho \frac{\partial [\eta(\theta, t)]}{\partial \tau} \theta = \nabla [\kappa(\theta, t) \nabla \theta] \quad (8)$$

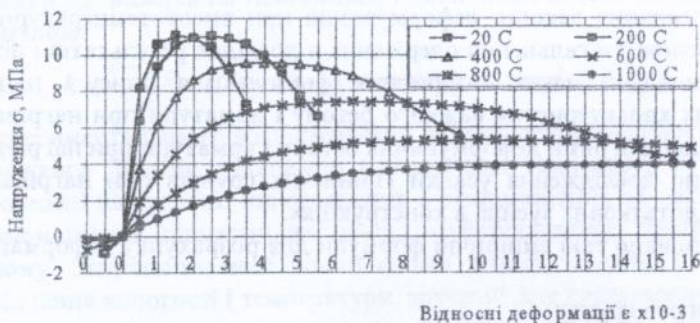


Рис. 4 Діаграма "σ - ε" бетону при нагріві

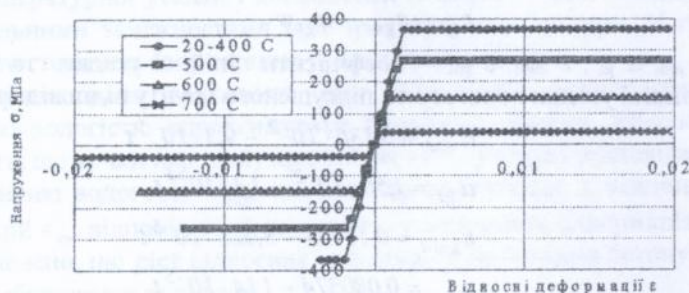


Рис. 5 Діаграма "σ - ε" арматури при нагріві

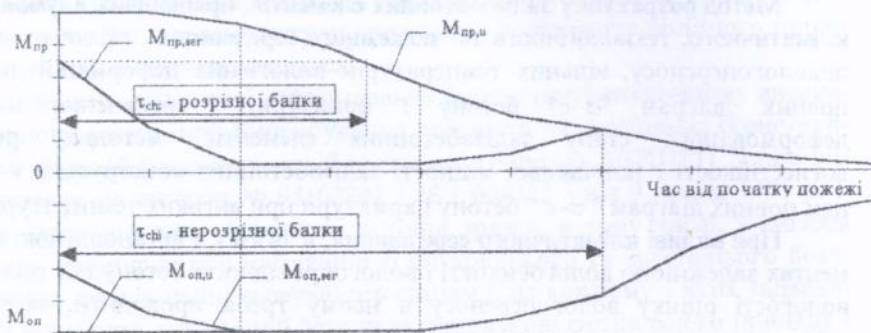


Рис. 6 Схема розрахунку межі вогнестійкості нерозрізних залізобетонних конструкцій

$$\rho C(\theta, t) \frac{\partial}{\partial \tau} + \rho \frac{\partial C(\theta, t)}{\partial \tau} t = \nabla [\lambda(\theta, t) \nabla t] \quad (9)$$

Рівняння (8)...(9) з граничними умовами, складені за описаними вище табличними даними про зміну температури та потенціалу вологості середовища, повністю визначають завдання розрахунку температурних та вологісних полів в перерізах залізобетонних конструкцій.

Аналіз температурно-вологісних режимів роботи бетонних і залізобетонних конструкцій запропоновано проводити, опираючись на класифікацію, до якої відповідно входять кліматичні пояси та області.

Температурно-вологісний режим району будівництва визначається за метеорологічними даними (температури та відносної вологості повітря) та включає завдання перебігу середньомісячних температур t , $^{\circ}\text{C}$ та середньомісячних потенціалів вологості θ $^{\circ}\text{B}$ повітря впродовж року, а також середньорічну температуру t та середньорічний потенціал повітря θ . За відсутністю більш повних метеорологічних даних про район будівництва рекомендується користуватися узагальненими режимами для кожного кліматичного поясу, наведеними в роботі.

При впливі технологічного середовища процес розповсюдження тепла в бетоні може бути наближено описаний схемою, згідно з якою бетон поділений поверхнею випаровування з температурою 100°C на дві зони : 1 суху та 2 вологу, розміри яких безперервно змінюються із підвищенням температури. При цьому теплофізичні характеристики кожної із зон є різноманітними функціями температури.

Визначення температурного поля такого двозонного середовища слід вести з урахуванням змінного стану межі розділу зон, а також безперервного поглинання прихованої теплоти пароутворення в зоні розподілу (за аналогією з завданням Стефана):

для сухої зони

$$\rho C(t) \frac{\partial}{\partial \tau} + \rho \frac{\partial C(t)}{\partial \tau} t_1 = \nabla [\lambda(t) \nabla t_1], \quad (10)$$

для вологій зони

$$\rho C(t) \frac{\partial}{\partial \tau} + \rho \frac{\partial C(t)}{\partial \tau} t_2 = \nabla [\lambda(t) \nabla t_2] \quad (11)$$

На межі розділу зон слід задовольнятися умовою :

$$-\lambda_1 \nabla t_1(\xi, \tau) + \lambda_2 \nabla t_2(\xi, \tau) = r W \rho \frac{\partial \xi}{\partial \tau} \quad (12)$$

При впливі пожежного середовища високотемпературне інтенсивне нагрівання викликає утворення в середині вологого бетону градієнту загального тиску вологого повітря, внаслідок чого утворюється додаткове перенесення

вологи і тепла завдяки наявності гідродинамічного (фільтраційного) руху пара та рідини. При цьому дифузійне перенесення незначне.

Математична модель може бути представлена у вигляді системи нелінійних диференційних рівнянь, що описують розвиток поля температур й тиску з внутрішніми джерелами та стоками :

$$C_t \rho \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} = \nabla [\lambda_t \nabla t] + r_t \rho B_t \frac{\partial \alpha}{\partial \tau}; \quad (13)$$

$$C_p \rho \frac{\partial p}{\partial \tau} = \nabla [\lambda_p \nabla p] - \rho B_t \frac{\partial \alpha}{\partial \tau}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = B_t \frac{\partial \alpha}{\partial \tau}; \quad (15)$$

Запропоновано модифікацію засобу В. М. Ройтмана для визначення характеристики інтенсивності фазових перетворень; експериментально одержана така формула:

$$B_t = \frac{\partial W}{\partial \alpha} = -2698 \cdot 10^{-4} + 472 \cdot 10^{-6} t - 1,086075 \cdot 10^{-6} t^2 + 7,70504 \cdot 10^{-9} t^3 - 1,722365 \cdot 10^{-11} t^4 \quad (16)$$

Введення характеристики інтенсивності фазових перетворень дозволяє об'єднати у рівняннях (13)...(15) члени із похідними за часом, запровадивши поняття еквівалентної теплоємності та пароемності, записавши їх таким чином:

$$C_{red,t}(t) \rho \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} = \nabla [\lambda_t \nabla t]; \quad (17)$$

$$C_{red,p}(t) \rho \frac{\partial p}{\partial \tau} = \nabla [\lambda_p \nabla p]; \quad (18)$$

$$C_{red,t} = C_t - r_t B_t; \quad (19)$$

$$C_{red,p} = C_p - B_t; \quad (20)$$

При такому підході система рівнянь (13)...(15) розпадається на окремі диференційні рівняння, кожне з яких вирішується послідовно : спочатку рівняння теплопровідності (17), після цього, за відомими із рішення рівняння теплопровідності швидкості зміни температури в елементарному обсязі та характеристики інтенсивності фазових перетворень, рівняння поля підвищеного тиску (18) і, нарешті, рівняння вологопровідності (15).

Коефіцієнти теплопровідності та питомої теплоємності залежно від температури та вологості запропоновано визначати за формулами :

$$\lambda = 1.37(1 + 0.175W - 0.016W^2)(1 - 0.000277t), \quad (21)$$

$$C = 0.83(1 + 0.077W - 0.0007W^2)(1 + 0.001t) \quad (22)$$

Розроблена методика визначення вільних температурно-вологісних деформацій; деформацій повзучості, повних діаграм "σ-ε" бетону та арматури.

Температурні деформації пропонується визначати залежно від вологості за формулою:

$$\varepsilon_{bw} = \alpha_b (1 + 63,6W) \cdot t \quad (23)$$

Відносні деформації усадки визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} \text{при } 0 \leq W_b \leq W_{bcy} \\ \varepsilon_{cst} = \varepsilon_{cst} - \alpha_{cst} W_b, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{при } W_{bcy} \leq W_b \leq W_{b,max} \\ \varepsilon_{cst} = \frac{W_{b,max} - W_b}{W_{b,max} - W_{bcy}} \varepsilon_{cy}, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\varepsilon_{cy} = \varepsilon_{cst} - \alpha_{cst} 3,2 \cdot 10^{-2} \quad (26)$$

Граничні деформації усадки при підвищених температурах визначаються за виразом:

$$\varepsilon_{cst} = \varepsilon_{cst,20} \cdot \exp[-0,0068(t - 20)] \quad (27)$$

Граничні деформації усадки при температурі $t=20^\circ\text{C}$ визначаються залежно від класу бетону на стиск B (МПа) та рухливості бетонної суміші Δ (осадка конуса, см) за формулою:

$$\varepsilon_{cst,20} = (89,73 + 0,167 \cdot B) [1,026 - 0,221 \cdot \exp(-0,213 \cdot \Delta)] \cdot 10^{-5} \quad (28)$$

Середнє значення коефіцієнта усадки важкого бетону при температурі 20°C пропонується приймати рівним $3 \cdot 10^{-2}$. Коефіцієнт лінійної усадки бетону при підвищених температурах - за формулою:

$$\alpha_{cst} = \alpha_{cs,20} (1,125 - 0,00625t) \quad (29)$$

Для бетонних та залізобетонних конструкцій, призначених для роботи в умовах впливу підвищених та високих температур, передбачаються звичайні та жаростійкі бетони, склади яких наведені у БНіП 2. 03. 04-84. Для цих складів $\alpha_{cs,20}$ і $\varepsilon_{csu,20}$ рекомендується визначати за таблицею 1

Таблиця 1

Номери складів бетону за БНіП 2.03.04-84	Граничні відносні деформації усадки $\varepsilon_{csu,20}$ 10^{-5}	Коефіцієнт лінійної усадки $\alpha_{cs,20}$ 10^{-2}
1-4	62	3,2
5-11,23,24	82	4,3
12-18,27,29	110	5,3
19-21	76	4,2

Відносні деформації набухання визначаються за формулою:

$$\varepsilon_e = \alpha_e (W - W_0) \quad (30)$$

Коефіцієнт лінійного набухання

$$\alpha_e = [3,45 + 0,045(t - 20)] \cdot 10^{-2} \quad (31)$$

Діаграма "σ - ε" бетону при нагріванні

$\varepsilon_{bT} < 0$ [стиснення]

$$\text{при } \varepsilon_{buT} \leq \varepsilon_{bT} \leq 0 \quad \sigma_{bT} = R_{bT} \left[a_1 \eta_T + a_2 \eta_T^2 + a_3 \eta_T^3 + a_4 \eta_T^4 + a_5 \eta_T^5 \right], \quad (32)$$

$$\text{де} \quad \eta_T = \frac{\varepsilon_{bT}}{\varepsilon_{bRT}}, \quad (33)$$

$$\text{при } \varepsilon_{bT} < \varepsilon_{buT} \quad \sigma_{bT} = 0, \quad (34)$$

$\varepsilon_{bT} > 0$ [розтягання]

$$\text{при } \varepsilon_{bRT} \geq \varepsilon_{bT} \geq 0 \quad \sigma_{bT} = \varepsilon_{bT} E_{bT}, \quad (35)$$

$$\text{при } \varepsilon_{bruT} \geq \varepsilon_{bT} \geq \varepsilon_{bRT} \quad \sigma_{bT} = R_{bT}, \quad (36)$$

$$\text{при } \varepsilon_{bT} > \varepsilon_{bruT} \quad \sigma_{bT} = 0 \quad (37)$$

Параметри, що входять в рівняння (32)...(37), змінюються від температури у відповідності з такими емпіричними формулами:

$$R_{bT} = \gamma_{bT} R_b \quad (38)$$

Коефіцієнт умов роботи бетону, що досліджується, на стиснення

$$\gamma_{bT} = 1,003 + 4 \cdot 10^{-4} t - 2,4 \cdot 10^{-6} t^2 + 1,35 \cdot 10^{-9} t^3, \quad (39)$$

$$R_{bRT} = \gamma_{RT} R_{bT} \quad (40)$$

Коефіцієнт умов роботи бетону на розтягання

$$\gamma_{bRT} = 1,008 - 1,1 \cdot 10^{-3} t + 2,214 \cdot 10^{-7} t^2 + 10,4 \cdot 10^{-10} t^3, \quad (41)$$

$$E_{bT} = \beta_{bT} E_b \quad (42)$$

Коефіцієнт, що враховує зниження початкового модуля пружності при нагріванні

$$\beta_{bT} = 1,009 - 1,5 \cdot 10^{-3} t - 4,67 \cdot 10^{-7} t^2 + 1,01 \cdot 10^{-9} t^3, \quad (43)$$

$$\varepsilon_{bRT} = K_{bT} \varepsilon_{bR} \quad (44)$$

Коефіцієнт, що враховує збільшення стиснення при нагріванні

$$K_{bT} = 0,92 + 1 \cdot 10^{-3} t + 6,2 \cdot 10^{-6} t^2 \quad (45)$$

Діаграма "σ-ε" арматури при нагріванні, що має фізичну межу текучості, отримана за запропонованою методикою внаслідок обробки літературних даних.

$$\text{При } \varepsilon_{scR} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sR} \text{ або } R_{scT}/E_{sT} < \varepsilon_s < R_{sT}/E_{sT} \\ \sigma_s = E_{sT} \cdot \varepsilon_s, \quad (46)$$

$\varepsilon_s < 0$ [стиснення]

$$\text{при } \varepsilon_{scu} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{scR} \text{ або } \varepsilon_{buT} \leq \varepsilon_s \leq R_{scT}/E_{sT} \\ \sigma_s = R_{scT}, \quad (47)$$

$$\text{при } \varepsilon_s < \varepsilon_{buT} \quad \sigma_s = 0, \quad (48)$$

$\varepsilon_s > 0$ [розтягання]

$$\text{при } \varepsilon_{sRT} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{suT} \quad \sigma_s = R_{sT}, \quad (49)$$

$$\text{при } \varepsilon_{буТ} < \varepsilon_s \quad \sigma_s = 0, \quad (50)$$

де при $20^\circ \text{C} \leq t \leq 400^\circ \text{C}$

$$R_{sT} = R_s, \quad (51)$$

при $400^\circ \text{C} \leq t \leq 800^\circ \text{C}$

$$R_{sT} = \gamma_s R_s = (-0,61 + 1,26 \cdot 10^{-2} t - 2,81 \cdot 10^{-5} t^2 + 1,651 \cdot 10^{-8} t^3) R_s, \quad (52)$$

при $t > 800^\circ \text{C}$

$$\gamma_s = 0 \quad (53)$$

$$E_{sT} = E_s \quad \beta_s = (1,01 - 6,436 \cdot 10^{-4} t + 1,1 \cdot 10^{-6} t^2 - 1,3 \cdot 10^{-9} t^3) E_s \quad (54)$$

Функцію впливу температури та часу нагрівання на деформації повзучості важкого бетону пропонується визначати за формулою:

$$\zeta = (t_b - 20)^{0,454} \left(0,098 + \frac{4,05}{\tau} \right) + 1 \quad (55)$$

Методика визначення напружено-деформованого стану залізобетонних елементів. В залежності від впливу середовища розроблено ряд методик. Розрахунок напружено-деформованого стану при тривалому впливі кліматичного й технологічного середовища та лінійного зв'язку між пружно-миттєвими напруженнями та деформаціями з урахуванням повзучості провадиться числовим способом, урахувуючи мінливість модуля пружності, коефіцієнтів лінійного розширення, усадки й повзучості від температури та вологості. Переріз залізобетонного елементу зображують у вигляді окремих смужок, середню температуру t_{bi} і вологість W_{bi} кожної з яких можна вважати сталими. Вибирають центральні координатні осі, тобто початок координат суміщують з положенням центру ваги перерізу зведеного до ненагрітого бетону.

Напруження та деформації визначаються із гіпотези плоских перерізів та рівнянь рівноваги. При обліку реологічних властивостей бетону зв'язок між напруженнями та деформаціями приймається за теорією старіння:

$$\frac{\sigma_{bi}}{\beta_{bi} E_b} [1 - \varphi_c(t)_i] + \frac{1}{\beta_{bi} E_b} \int_0^t \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} [1 - \varphi_c(t)_i] d\tau = \varepsilon_{tot,i} + \left(\frac{1}{r} \right)_{tot,i} y_i - \varepsilon_{tot,i}$$

Напруження в арматурі i -тої частини бетону визначаються за формулами:

$$\sigma_{si} = E_s \left[\varepsilon_{tot,i} + \left(\frac{1}{r} \right)_{tot,i} y_{si} - \varepsilon_{si} \right] \quad (56)$$

$$\sigma_i = \frac{2E_b}{2 + \varphi_c(t)_i} \left[\varepsilon_{tot,i} + \left(\frac{1}{r} \right)_{tot,i} y_{bi} - \varepsilon_{tot,i} \right] - \frac{\sigma_{bi} \varphi_c(t)_i}{2 + \varphi_c(t)_i} \quad (57)$$

Характеристика повзучості $\varphi_c(t)_i$ i -тої частини перерізу бетону визначається за формулою:

$$\varphi_c(t)_i = C_i \zeta_i E_b \quad (58)$$

Міру повзучості C_t знаходять за експериментальними даними для застосовуваного складу бетону. Функцію впливу температури і часу нагрівання на деформації повзучості важкого бетону i -тої частини перерізу елемента пропонується визначати за формулою (55).

Розроблено методику розрахунку напружено-деформованого стану масивних монолітних залізобетонних елементів прямокутного перерізу при змущених температурно-вологісних деформаціях на основі теорії повзучості. Використовуючи теореми Н. Х. Арутюняна про подання рішення задачі повзучості через рішення пружно-миттєвої задачі, методику С. В. Александровського числового визначення коефіцієнтів затухання, що враховують зміну напружень внаслідок повзучості, та й одержані рішення задач вологопровідності розроблені алгоритми для рішення одномірної, двомірної та трьохмірної задач. Визначення повних напружень зводиться до множення відповідних складових частин тензора пружних напружень, що замінює пружно-миттєву задачу на коефіцієнт приведення $H(t, t_0)$. Для обчислення цього коефіцієнту необхідно знати спадкоємну функцію бетону другого роду $R(t, \tau)$, значення якої визначається через перемінні значення заданої функції $T(\tau)$. Для загального випадку запропоновані наступні функції:

$$T(t) = \sum_n^{\infty} \sum_j^{\infty} \sum_i^{\infty} A_n A_j A_i \exp(-\mu_n^2 Fo_x) \exp(-\mu_j^2 Fo_y) \exp(-\mu_i^2 Fo_z) \quad (59)$$

Рішення пружно-миттєвої задачі може бути проведене одним з числових способів.

Істотне уточнення напружено-деформованого стану при короткочасному нагріванні, особливо в стадії, близькій до руйнування, може бути отримане при використанні одержаних залежностей повних діаграм "σ-ε" бетону і арматури від температури. Запропонований числовий спосіб розрахунку, що припускає дискретизацію перерізу елемента на окремі смужки, у кожній з яких стала температура t_{bi} та вологість w_{bi} . Зв'язок між напруженнями та деформаціями у бетоні описує формули (32)...(45); в арматурі - формули (46)...(54).

Для середніх перерізів бруса використовують гіпотезу плоских перерізів:

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{tot,t} + \left(\frac{l}{r} \right)_{tot,t} y_{bi} \quad (60)$$

Деформації, які спричиняються власними напруженнями в бетоні та арматурі, визначаються різницею між деформаціями плоского перерізу й вільними температурно-усадочними деформаціями.

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{tot,t} + \left(\frac{l}{r} \right)_{tot,t} y_{bi} - \varepsilon_{tot,j} \quad (61)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bm}} = \frac{l}{\varepsilon_{bm}} \left[\varepsilon_{tot,l} + \left(\frac{l}{r} \right)_{tot,l} y_{bi} - \varepsilon_{tot,i} \right]$$

Напруження в арматурі при умові

$$\frac{R_s}{E_s} \geq \varepsilon_s \geq -\frac{R_s}{E_s}$$

визначаються виразом

$$\sigma_s = E_s \left(\varepsilon_{tot,l} + \left(\frac{l}{r} \right)_{tot,l} y_{si} - \varepsilon_{si} \right) \quad (62)$$

Невідомі значення відносного подовження осі центра ваги зведеного перерізу елемента $\varepsilon_{tot,l}$ та її кривизну $\left(\frac{l}{r} \right)_{tot,l}$ визначають з двох рівнянь рівноваги:

$$R_b \sum_{i=1}^n A_{bi} \sum_{k=1}^5 a_k \eta^k + E_s \sum_{i=1}^n A_{si} \left(\varepsilon_{tot,l} + \left(\frac{l}{r} \right)_{tot,l} y_{si} - \varepsilon_{si} \right) = 0 \quad (63)$$

$$R_b \sum_{i=1}^n A_{bi} y_{bi} \sum_{k=1}^5 a_k \eta^k + E_s \sum_{i=1}^n A_{si} y_{si} \left(\varepsilon_{tot,l} + \left(\frac{l}{r} \right)_{tot,l} y_{si} - \varepsilon_{si} \right) = 0 \quad (64)$$

Рішення цієї системи проводимо ітераційним способом.

Методика розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій з урахуванням повної діаграми "σ-ε" бетону та арматури при високих температурах. Розрахунок межі вогнестійкості складається із двох частин: теплотехнічної та статичної. У теплотехнічній частині визначається розподіл температури за перерізом конструкції в процесі нагрівання за стандартним температурним режимом заведеною вище методикою. За результатами розрахунку визначається втрата теплоізолявальної здатності.

На основі експериментальних та числових досліджень виявлено механізм переходу залізобетонних конструкцій у граничний стан при нагріві та запропоновано методику розрахунку, що враховує додаткові температурні зусилля S_p , які виникають під час пожежі від стримування температурних деформацій елемента зв'язками (сусідніми конструкціями), які, накладаючись на зусилля від нормативного навантаження S_{ser} , знижують межу вогнестійкості порівняно з розрахунком за існуючою методикою.

Власні температурні напруження, що виникають при нелінійному розподілі температури за перерізом залізобетонних елементів, також впливають на несучу здатність R_n , збільшуючи або зменшуючи її в залежності від форм температурного поля. Цей вплив можна висловити додатковим зусиллям в перерізі R_{nt} . Таким чином, основна розрахункова формула вогнестійкості за граничним станом першої групи має вигляд:

$$S_{ser} + S_t \leq R_u \pm R_{usn} \quad (65)$$

В статично невизначених конструкціях у процесі нагрівання виникають температурні моменти, змінюючи зусилля від нормативного навантаження. **Запропоновано методика розрахунку нерозрізних залізобетонних конструкцій**, яку ілюструє наведена на рис. 6 схема.

Нерозрізна залізобетонна конструкція у процесі нагрівання проходить 3 характерні стадії роботи. У першій стадії в конструкції виникають зусилля від нормативного навантаження, що значно нижче граничних, які визначають міцність конструкції і максимальні згинальні моменти в прольоті $M_{ser, np, t=20^{\circ}C}$ та на опорі $M_{ser, on, t=20^{\circ}C}$. Від нагрівання конструкції знизу в ній виникають температурні моменти, що збільшують опорний момент та зменшують прольотний. При досягненні опорним моментом граничної величини $M_{u, on, t=20^{\circ}C}$ на опорі утворюється перший пластичний шарнір. Цей стан характеризується другою стадією роботи. Прольотний момент істотно зменшується, а при тривалому нагріванні може змінити свій знак і нижня зона балки в прольоті може стиснутися. Зниження міцності перерізу в прольоті ($M_{u, np, t} < M_{u, np, t=20^{\circ}C}$) внаслідок втрати міцності арматури не призведе до руйнування.

Зниження міцності опорного перерізу в зв'язку зі зміною міцностних та деформативних характеристик нагрітого бетону стислої зони знижує момент в опорному пластичному шарнірі, що в свою чергу призводить до збільшення прольотного моменту. До цієї миті суттєво знижується міцність прольотного перерізу. Третя стадія характеризується утворенням пластичного шарніра в прольоті, що призводить до геометрично змінної схеми, тобто до руйнування конструкції. З чого виходить, що межа вогнестійкості нерозрізних конструкцій вище межі вогнестійкості розрізних, статично визначених.

Розроблена методика розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій за нормальними перерізами, яка ґрунтується на обліку реальних законів деформування при нагріванні, власних температурних напружень у бетоні та арматурі, перерозподіл зусиль в статично невизначених конструкціях.

Розрахунок провадиться числовим ітераційним способом, дискретизуючи переріз: при одновимірному температурному полі у вигляді полосок, при двовимірному - у вигляді прямокутних елементів з урахуванням таких передумов: приймається справедливою гіпотеза плоских перерізів; бетон у стиснутій та розтягнутій зонах вилучається із роботи при досягненні деформаціями граничних значень $\varepsilon_{buT}, \varepsilon_{btT}$; приймаються повні діаграми "σ-ε" бетону та арматури при нагріванні; міцність перерізу визначається максимальним зусиллям при варіюванні величиною деформацій плоского перерізу.

Розподіл деформацій при одновимірному температурному полі запишемо через фіброві деформації бетону ε_{bn} та нижньої арматури ε_s :

$$\varepsilon = \varepsilon_{tot} + \left(\frac{l}{r} \right)_{tot} \quad y = \frac{\varepsilon_s \cdot h - \varepsilon_{bn} \cdot a}{h - a} - \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{bn}}{h - a} y \quad (66)$$

Напруження в бетоні та арматурі визначимо із діаграм "σ-ε" бетону та арматури за деформаціями :

$$\varepsilon_{bi} = \varepsilon_{tot} + (1/r)_{tot} \cdot y_{ib} - \alpha_{bT} \cdot (t_{bi} - t_0) \quad (67)$$

i

$$\varepsilon_{sj} = \varepsilon_{tot} + (1/r)_{tot} \cdot y_{sj} - \alpha_{sT} \cdot (t_{sj} - t_0) \quad (68)$$

Рівняння рівноваги відповідно :

$$N = \sum_{i=1}^n \sigma_{bi} \cdot A_{bi} + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \quad (69)$$

$$M = \sum_{i=1}^n \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot y_{bi} + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot y_{sj} \quad (70)$$

Ітераційний процес визначення міцності залізобетонного перерізу у загальному спільному випадку полягає в підборі максимального значення шуканого зусилля : головного вектора N за відсутності головного моменту M для центрального стиску, головного моменту M при $N=0$ для чистого вигину, M при заданому N , або N при заданому M для вигину з поздовжнім зусиллям. Підбір здійснюється одним із відомих способів, наприклад, способом дихотомії при послідовній варіації значеннями відносної деформації арматури ε_s й кривини $(1/r)_m$.

При розрахунку залишкової міцності до прийнятих передумов додається перевірене на практиці положення про необоротність втрати міцності охолодженого бетону та арматури. Залишкова міцність визначається за формулами (70)...(72), в яких напруження в бетоні та арматурі підраховується за деформаціями:

$$\varepsilon_{bi} = \varepsilon_{tot} + (1/r)_{tot} \cdot y_{ib} \quad (71)$$

$$\varepsilon_{sj} = \varepsilon_{tot} + (1/r)_{tot} \cdot y_{sj} \quad (72)$$

Виявлено, що при цьому необхідно визначати температурне поле і в період охолодження елемента, оскільки внутрішні волокна продовжують нагріватися, втрачаючи свою міцність.

Запропонована методика розрахунку реалізована при розробці числових способів визначення температурних та вологісних полів у перерізах залізобетонних елементів.

Розроблені методики визначення температурних полів при одномірному та осесиметричному стаціонарному потоках тепла з урахуванням змінності коефіцієнта теплопровідності від температури; наближена методика визначення температурних полів у вологому бетоні з урахуванням фазового переходу за рівняннями (10)...(12); методика визначення поля вологості при одномірному стаціонарному струмі вологи в ізотермічних умовах з урахуванням змінності коефіцієнта вологопровідності від вологості; нестаціонарні поля вологості у залізобетонних елементах з прямокутним перетином у ізотермічних умовах.

Збудовано апарат розрахунку на основі використання аналогових засобів для рішення плоских задач тепловологопровідності з урахуванням змінності характеристик переносу. Розроблена нова конструкція електроінтегратора для моделювання нестационарних та стаціонарних фізичних полів, наприклад, температурних та вологісних, що містить вакуумний стенд з електродами, розміщеною на ньому моделлю із електропровідного паперу з підложкою та дільник напруження; у вигляді цифрового вимірювального приладу використовується блок формування випробувального ступеня напруження, компаратор та електронно-рахівний вимірник інтервалів часу.

Розроблено уточнену методику числового рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь тепловологопереносу (8)...(9), при двовірних нестационарних потоках.

Враховуючи істотну залежність коефіцієнтів вологопровідності, вологості та вологообміну від температури та потенціалу вологості, а також досвід розрахунку традиційними скінченно-різницевиими способами, які показують виникнення монотонно зростаючої помилки статичної нестійкості, диференціальне рівняння вологопереносу перетворено так, що шуканими перемінними є консервативні величини - відносна вологість та потенціал. Це рівняння відбиває суттєвість фізичного закону збереження маси та дозволяє зберегти інтегральні характеристики переносу за скінченно-різницевою схемою, що істотно підвищує точність рішення.

Застосування консервативної скінченно-різницевої схеми підвищує точність також за рахунок прямого використання залежності $W(\theta, t)$, що виключає процедуру числового диференціювання для визначення коефіцієнта вологості.

Розроблено алгоритм та програму розрахунку на IBM PC/AT у середовищі Turbo C. Програма функціонує під керівництвом інтерактивної оболонки, що дозволяє простежити процес рішення, а коли виявиться нестійкість, припинити його, змінити крок інтегрування за часом та відновити рішення.

Розроблено уточнену методику розрахунку розподілу температури у перерізах залізобетонних елементів внаслідок одностороннього чи багатостороннього нагріву перерізу при пожежі, що описано системою рівнянь (13)... (15). В зв'язку з істотною нелінійністю теплофізичних характеристик для рішення диференціального рівняння теплопровідності (13) застосована консервативна скінченно-різницева схема, що підвищує точність рішення.

Рішення проведено способом прямих шляхом дискретизації правої частини рівняння (17), з перетворенням диференціального рівняння у систему звичайних диференціальних рівнянь для вузлових значень, з наступним її рішенням дво-кроковим способом у варіанті предиктор-коректор. Розроблено програму розрахунку температурних полів "Pogar". Розроблено методику розрахунку поля надлишкових тисків способом циклічної редукції, що є одним з швидкісних способів рішення еліптичних рівнянь типу (18).

Створено методику скінченно-різницевої апроксимації нелінійного диференційного рівняння теплопровідності (17) за тепловими потоками, що дозволяє значно зменшити кількість арифметичних операцій порівнянно до традиційної методики. Розроблено програму розрахунку температурних полів "Fire" у табличному процесорі Excel For Windows.

Програма функціонує під управлінням інтерактивної оболонки та дозволяє проводити розрахунки температурних полів у перерізах складної геометричної конфігурації.

Проведено числовий аналіз результатів розрахунку за розробленою методикою, який виявив суттєві уточнення розрахункових полів температури.

Розроблено способи оцінки напружено-деформованого стану залізобетонних елементів з використанням розробленого методу.

Створено алгоритм та програму розрахунку температурно-вологісних напружень при лінійному зв'язку між пружно-миттєвими напруженнями та деформаціями з урахуванням змінності модуля пружності, коефіцієнтів лінійного поширення, усадки та повзучості від температури та вологості на IBM PC/AT у середовищі Turbo Pascal.

Розроблено методику розрахунку напружень при вимушених деформаціях з урахуванням повної діаграми " σ - ϵ " бетону та арматури.

Запропоновано алгоритм та складено програму розрахунку на IBM PC/AT у середовищі Turbo Pascal.

Розроблено методику розрахунку втрат попереднього напруження арматури залежно від температурно-вологісних умов кліматичного середовища. Методика дозволяє визначити втрати напружень для будь-якого кліматичного поясу світу. Результати числового аналізу показують, що температура та вологість середовища впливають на величину втрат у широкому діапазоні. Зі збільшенням температури, рухливості бетонної суміші та міцності бетону втрати збільшуються. Облік сонячної радіації провадиться шляхом збільшення температури бетону за теплотехнічним розрахунком.

Розроблена методика дозволила також аналітично описати виявлений в натурному експерименті факт збільшення усадки (втрат) у зимово-осінній період на відміну від традиційного погляду на максимальну її величину у найбільш жаркий час.

Запропоновано методику розрахунку напружено-деформованого стану масивних монолітних залізобетонних елементів прямокутного перерізу при вимушених температурно-вологісних деформаціях з урахуванням реологічних властивостей бетону.

Проведено оцінку напружено-деформованого стану в системі залізобетонний елемент-підвалина при температурно-усадочних деформаціях. Виявлено особливості розподілу напружень та зусиль у залізобетонних та мурованих кам'яних будовах різноманітної конфігурації при наявності прорізів та температурно-усадочних швів.

Запропоновано новий спосіб зниження температурно-усадочних зусиль у будівельних конструкціях, зокрема у промислових та цивільних громадських будівлях і спорудах, надземних та підземних конструкціях великої довжини без ускладнення конструктивного рішення (заявка № 94031437).

Спосіб полягає в улаштуванні температурно-усадочного шва у ґрунті підвалини у вигляді траншеї, яка розміщена між окремими фундаментами або під суцільними, наприклад, під стрічковими, заповненої пружноподатливим матеріалом.

Можливість застосування цього способу підтверджена результатами числового моделювання та експериментальними дослідженнями.

Розроблено спосіб забезпечення надійності роботи залізобетонних конструкцій при нагріванні ґрунту підвалини. Він дозволяє оцінити величини можливих осадок ґрунтів підвалини, розрахувати напружено-деформований стан та розробити ефективні конструктивні рішення як при новому будівництві, так і при реконструкції.

Запропонована методика розрахунку напружено-деформованого стану криволінійних бетонних і залізобетонних балок, що дозволяє уточнити інженерні способи розрахунку круглих фундаментів доменних печей, димових труб , газоходів, конструкції біологічного захисту атомних реакторів та ін. Показано, що нелінійний характер розподілу напружень за висотою радіальних перерізів цих конструкцій впливає на жорсткість, тріщиностійкість і несучу здатність, призводить до появи власних напружень при лінійному розподілі температури, переміщення нейтральної осі вбік центру вигину. Складено алгоритм та програма розрахунку на ПК.

Запропонована методика розрахунку залізобетонних балок з урахуванням утворення температурних тріщин.

Розроблено способи розрахунку вогнестійкості та залишкової міцності залізобетонних елементів на основі запропонованого методу.

На основі проведених досліджень виявлено механізм переходу стиснутих залізобетонних конструкцій в граничний стан та запропонована методика розрахунку, що враховує зусилля від стримування температурних деформацій елементу у процесі нагрівання додатковими зв'язками N_i (сусідніми конструкціями), які накладаються на зусилля від нормативного навантаження N_{ser} , в зв'язку з чим межа вогнестійкості знижується у порівнянні з розрахунком за існуючою методикою.

Розроблена методика розрахунку вогнестійкості стиснутих залізобетонних конструкцій за нормальними перерізами, яка ґрунтується на обліку реальних законів деформування при нагріванні та власних температурних напружень у бетоні й арматурі. Виявлено, що в стадії, близькій до руйнування, максимально напружена центральна частина перерізу, на відміну від існуючих уявлень, периферійні волокна не досягають межі міцності і не виключаються з роботи тому, що при нагріванні суттєво збільшується деформативність бетону (рис. 7, 8).

Встановлено, що, виникаючи у процесі пожежі власні температурні напруження підвищують несучу здатність за рахунок зниження величини напружень, що стискають центральну частину перерізу елементу. Зазначене збільшення міцності носить тимчасовий характер і зникає при охолодженні, що може призвести до руйнування центрально стиснутих елементів після їх охолодження.

Розроблено методику оцінки залишкової міцності, що проводиться за фізико-механічними характеристиками бетону та арматури при максимальних рівнях температури щодо попереднього нагрівання. Виявлені закономірності зміни залишкової міцності залізобетонних елементів залежно від температури пожежі, попереднього нагрівання та від його тривалості.

Складено програму розрахунку вогнестійкості та залишкової міцності "Kolonna" на IBM PC/AT у табличному процесорі Excel For Windows, що реалізує запропонований ітераційний спосіб визначення несучої здатності при нагріванні та після охолодження.

Результати числового моделювання напружено-деформованого стану нерозрізних залізобетонних балок за допомогою ПК "Міраж" виявили особливості роботи статично невизначених конструкцій та дозволили намітити основні передумови для розробки інженерної методики розрахунку їх вогнестійкості.

Розроблено методику розрахунку нерозрізних статично невизначених залізобетонних конструкцій на основі виявленого механізму трьохстадійного її переходу у граничний стан.

Запропонована методика розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій за нормальними перерізами, яка основана на обліку реальних законів деформування при нагріванні і включає ітераційний процес визначення міцності при нелінійному розподілі температури за перерізом. Розроблено методику розрахунку залишкової міцності залізобетонних перерізів.

Розроблено програму розрахунку вогнестійкості та залишкової міцності "Iter" на IBM PC/AT у табличному процесорі Excel For Windows.

Виявлено, що вогнестійкість статично невизначених нерозрізних залізобетонних конструкцій значно вище статично визначених розрізних еквівалентного перерізу, який обумовлюється виникненням в них температурного моменту, що при нагріві знизу розвантажує прольотні перерізи та довантажує опорні.

Встановлено, що при певних визначених умовах можливе руйнування нерозрізних залізобетонних балок після охолодження в зв'язку з тим, що зникнення температурного моменту призводить до підвищення прольотного моменту, а зменшена міцність прольотного перерізу після нагрівання нижча цього значення.

Визначено, що пластичний шарнір у опорному перерізі перетворюється у

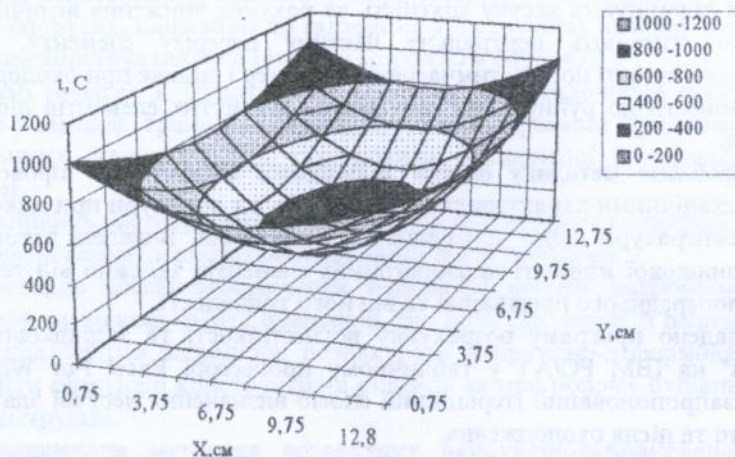


Рис. 7 Розподіл температури за перерізом колони для часу нагріву 1 г и $\epsilon_{\text{tot}} = 0,0014$

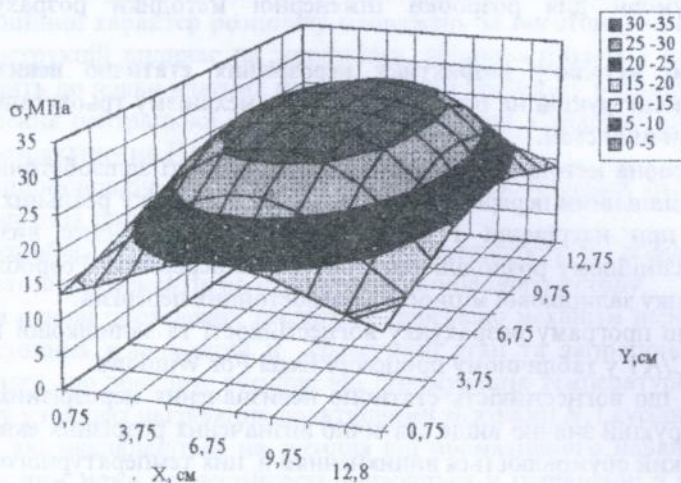


Рис. 8 Розподіл напружень за перерізом колони для часу нагріву 1 г и $\epsilon_{\text{tot}} = 0,0014$

звичайний шарнір внаслідок зменшення опорного моменту в зв'язку з втратою міцності стиснутої зони та підвищеною деформативністю бетону при нагріванні. При цьому відбувається зростання прольотних моментів до значень, що перевищують проектну міцність перерізу.

Проведено експериментальну перевірку розробленого методу.

Експериментально виявлені закономірності розподілу температури в залізобетонних елементах при всесторонньому інтенсивному нагріві, напружено-деформованого стану у залізобетонних елементах при сумісних впливах температури та центрального стиску.

Показано, що при нагріванні істотно виявляється нелінійність зв'язку між напруженнями і деформаціями. Одержано суттєві закономірності залишкової міцності залізобетонних елементів у залежності від температури попереднього нагрівання, міцності у залежності від тривалості пожежі та при одночасному впливі навантаження й температури.

Експериментально підтверджено, що виникаючі у процесі нагрівання власні температурні напруження підвищують несучу здатність стиснутого елемента в гарячому стані через те, що зменшуються напруження у центральній частині перерізу.

Визначено характер тріщиноутворення центрально стиснутих елементів у процесі нагрівання і навантаження.

Результати досліджень досить задовільнено співпадають з розрахунком за розробленою методикою.

Експериментально підтверджено підвищення вогнестійкості статично невизначених нерозрізних залізобетонних конструкцій в порівнянні зі статично визначеними. Вигини нагрітих прольотів, а також вигини прольотів у холодному стані після нагрівання більш, ніж ненагрітих, при інших однакових умовах.

Високотемпературне інтенсивне нагрівання без навантаження призводить до тріщиноутворення температурного характеру, отже, до зниження жорсткості нагрітого залізобетонного елемента нерозрізної балки.

Трьохстороннє нагрівання перерізу балок істотно знижує вогнестійкість та залишкову міцність перерізу як у прольоті, так і на опорі.

Розроблено ефективні рішення залізобетонних конструкцій, працюючих при температурно-вологісних впливах, на основі запропонованого методу, які впроваджені в проєктування та будівництво об'єктів, що зазнають температурно-вологісного впливу середовища.

ВИСНОВКИ

1. Недостатня вивченість роботи залізобетонних конструкцій, особливо вплив пожежі, необхідність опрацювання норм для України на точній основі,

утворення нових типів споруд з забезпеченою межею вогнестійкості, підвищення залишкової міцності будов і споруд як тих, що будуються, так і тих, що реконструюються, висуваять проблему створення методу розрахунку залізобетонних елементів, працюючих в умовах впливу кліматичного, технологічного і пожежного середовища, опрацювання і впровадження на його основі ефективних конструкцій будов і споруд.

2. Проведено комплекс лабораторних і натурних досліджень, внаслідок яких розроблені експериментальні основи методу розрахунку.

Встановлено, що внаслідок істотної змінності характеристик вологопереносу будівельних матеріалів у залежності від температури і вологості, оцінку вологопереносу в них доцільно проводити, спираючись на теорію потенціалу вологості. Підвищена вірогідність шкали потенціалу вологості, розроблено спосіб електричного виміру потенціалу вологості і методику визначення потенціалу вологості повітря навколишнього середовища.

Експериментально виявлено залежності вологості, вологопровідності та вологообміну з навколишнім середовищем важкого бетону від температури та потенціалу вологості.

Запропоновано імпульсний спосіб визначення теплопровідності, теплоємності та температуропровідності будівельних матеріалів та виробів без порушення цілісності, методику ідентифікації тепло-вологофізичних характеристик шляхом рішення інверсного завдання в інтерактивному режимі на IBM PC/AT; одержані експериментальні залежності теплопровідності та теплоємності бетону від температури та вологості.

Розроблено методику визначення температурно-вологісних деформацій бетону; запропоновано емпіричні формули для підрахунку деформацій усадки та набухання важкого бетону, температурних деформацій, деформацій повзучості, а також усадки глинистих ґрунтів підвалини залежно від температури та вологості (Сума квадратичних відхилень не більш $\Sigma=0,01$).

Розроблено методику експериментальних досліджень та нову установку для визначення повної діаграми "σ-ε" бетону та арматури при високих температурах; одержані експериментальні дані про вплив температури на повні діаграми важкого бетону.

3. Розроблено спосіб розрахунку залізобетонних елементів, що включає нові теоретичні положення щодо оцінки вологопровідності бетону, запропоновано модифіковану систему диференціальних рівнянь тепловологопереносу в бетоні; положення розрахунку вільних температурно-усадочних деформацій важкого бетону та глинистого ґрунту; основні гіпотези та передумови для визначення напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій, нові підходи до розрахунку їх вогнестійкості та залишкової міцності після пожежі.

4. Запропонований метод реалізований при розробці числових способів визначення температурних та вологісних полів в перерізах залізобетонних елементів.

Розроблено: методики визначення температурних полів при одномірному та осесиметричному стаціонарних потоках тепла з урахуванням змінності коефіцієнта теплопровідності від температури, методику визначення температурних полів у вологому бетоні з урахуванням фазового переходу, поля вологості при одномірному стаціонарному потоку вологи в ізотермічних умовах з урахуванням змінності коефіцієнту вологопровідності від вологості, нестационарного поля вологості в залізобетонних елементах з прямокутним перерізом в ізотермічних умовах.

Запропоновані способи рішення задач тепловологопровідності з урахуванням змінності характеристик переносу на аналогових пристроях. Розроблена нова конструкція електроінтегратора для моделювання нестационарних та стаціонарних фізичних полів.

Розроблено програму розрахунку температурних полів "Pogar", методику розрахунку поля надлишкових тисків способом циклічної редукції та програму розрахунку "Puasson".

Розроблено програму розрахунку температурних полів в перерізах складної геометричної конфігурації "Fire" на IBM PC/AT табличному процесорі Excel For Windows.

Проведений числовий аналіз результатів розрахунку за розробленою методикою виявив істотні уточнення розрахункових полів температури в порівнянні з традиційними рішеннями.

5. Розроблено способи оцінки напружено-деформованого стану залізобетонних елементів з використанням запропонованого методу. Створені алгоритм та програма розрахунку температурно-вологісних напружень при лінійному зв'язку між пружно-миттєвими напруженнями та деформаціями з урахуванням змінності модуля пружності, коефіцієнтів лінійного розширення, усадки та повзучості від температури та вологості на IBM PC/AT в середовищі Turbo Pascal, а також з урахуванням повних діаграм σ - ϵ бетону та арматури.

Запропоновано методику розрахунку втрат попереднього напруження арматури залежно від температурно-вологісних умов кліматичного середовища, що дозволяє визначати їх для будь-якого кліматичного поясу всесвіту.

Запропоновано методику розрахунку напружено-деформованого стану масивних монолітних залізобетонних елементів прямокутного перерізу при вимушених температурно-вологісних деформаціях з урахуванням реологічних властивостей бетону.

Проведено оцінку напружено-деформованого стану в системі залізобетонний елемент-підвалина при температурно-усадочних деформаціях та запро-

поновано новий спосіб зниження температурно-усадочних зусиль в будівельних конструкціях.

Розроблено спосіб розрахунку залізобетонних конструкцій при нагріванні ґрунта підвалини, що дозволяє оцінити величини можливих осадок ґрунтів підвалини, напружено-деформований стан та розробити ефективні конструктивні рішення як для нового будівництва, так і для реконструкції.

Запропоновано методику розрахунку напружено-деформованого стану криволінійних бетонних та залізобетонних брусків, що дозволяє уточнити інженерні способи розрахунку круглих фундаментів доменних печей, димових труб, газоходів, конструкцій біологічного захисту атомних реакторів та ін. Складено алгоритм та програму розрахунку на ПК.

Розроблено методику розрахунку залізобетонних балок з урахуванням утворення температурних тріщин.

6. Розроблені способи розрахунку вогнестійкості та залишкової міцності залізобетонних елементів після пожежі на основі запропонованого методу.

Виявлено механізм переходу стиснутих залізобетонних конструкцій в граничний стан та запропоновано методику розрахунку, що враховує зусилля від стримування температурних деформацій елемента у процесі нагріву додатковими зв'язками N_i (сусідніми конструкціями), які накладаються на зусилля від нормативного навантаження N_{ser} , в зв'язку з чим, межа вогнестійкості знижується у порівнянні з розрахунком за існуючою методикою.

Розроблена методика розрахунку вогнестійкості стиснутих залізобетонних конструкцій за нормальними перерізами, яка ґрунтується на обліку реальних законів деформування при нагріванні та власних температурних напруженнях у бетоні й арматурі.

Встановлено, що виникаючі у процесі нагрівання, власні температурні напруження підвищують несучу здатність за рахунок зниження величини напружень, що стискають центральну частину перерізу елемента. Зазначене збільшення міцності носить тимчасовий характер і зникає при охолодженні, що може привести до руйнування центрально стиснутих елементів після їх охолодження.

Розроблена методика оцінки залишкової міцності залізобетонних елементів, виявлені закономірності її зміни в залежності від температури пожежі та від тривалості.

Складена програма розрахунку вогнестійкості та залишкової міцності "Kolonna" на IBM PC/AT у табличному процесорі Excel For Windows, що реалізує запропонований ітераційний спосіб визначення несучої здатності конструкції при нагріванні та після охолодження.

На основі числового моделювання напружено-деформованого стану нерозрізних залізобетонних конструкцій виявлено механізм тристадійного їх переходу в граничний стан та розроблена методика розрахунку їх вогнестійкості,

програму розрахунку "Iter" на IBM PC/AT у табличному процесорі Excel For Windows.

7. Розроблено методи і засоби іспитів залізобетонних елементів на вогнестійкість. Проведено експериментальну перевірку розробленого методу, яка підтвердила його прийнятність.

8. На основі запропонованого методу розроблені ефективні рішення залізобетонних конструкцій, що експлуатуються в умовах температурно-вологісних впливів. Створені оптимальні засоби протипожежного захисту залізобетонних конструкцій, рекомендації з тактики гасіння пожеж.

9. Результати роботи широко впроваджені у вітчизняній та зарубіжній будівельній практиці, у нормативних та інструктивних документах.

Основний зміст дисертації відображено в наступних публікаціях :

1. А. с. 381009 СССР, М. Кл. G 01 n 25/00. Способ определения теплофизических характеристик материала / Фомин С. Л., Петров О. А. (СССР).-№ 1620733/29-33; Заявлено 10.II.71; Оpubл. 15.V.73. Бюл.№ 21.-4 с.

2. А. с. 389452 СССР, М. Кл. G 01 n 25 / 56. Способ определения влажности пористых материалов/ Фомин С. Л., Петров О. А., Скопин К. Н., Грешнов Ю. П. (СССР). -№ 1622657/26-25; Заявлено 11.II.71; Оpubл. 05.VII.73. Бюл. № 29.-4 с.

3. Фомин С. Л. Расчет распределения влажности в элементах бетонных конструкций.// Реферативная информация. Отечественный и зарубежный опыт. Серия VIII. Выпуск 10, М.: 1976. с. 12-14.

4. Фомин С. Л., Ахмедов А. А., Кондратенко В. А. Экспериментальное исследование коэффициента линейного расширения тяжелого бетона // Сборник трудов МИСИ и БТИСМ, вып. 18, том 3, М.: 1976, с. 7-13.

5. Фомин С. Л., Лобасенко Е. Г. К расчету трещинообразования бетонных и железобетонных конструкций при неравномерном нагреве. Расчет конструкций подземных сооружений. Издательство "Будівельник", Киев.: 1976, с. 60-66.

6. Фомин С. Л., Петров О. А., Вирозуб А. И. Импульсный метод определения теплофизических характеристик материалов без нарушения их сплошности. Расчет конструкций подземных сооружений. Издательство "Будівельник", Киев.: 1976, с. 66-71.

7. Фомин С. Л., Ахмедов А. А. Экспериментальное исследование коэффициента влагообмена бетона // Сборник материалов по итогам НИР Ферганского политехнического института, вып. 146, г. Фергана, 1976. с. 95-101.

8. Фомин С. Л., Ахмедов А. А. Прогнозирование распределения влажности в строительных конструкциях из тяжелого бетона //Сборник трудов Ленинградского Промстройпроекта "Долговечность строительных конструкций объектов металлургической и угольной промышленности". Л., 1977, с. 58-65.

9. Фомин С. Л., Ахмедов А. А. Усадка тяжелого бетона при повышенных температурах // Бетон и железобетон, N4, 1977. с. 30-31.

10. А. с. 560030 СССР, М. Кл.² E 02D 27/42, E 02D 29/16. Фундамент под высокотемпературные агрегаты / Фомин С. Л. (СССР). - № 2155999/33; Заявлено 11.07.75; Оpubл. 30.05.77, Бюл. № 20. - 4 с. ил.

11. А. с. 688558 СССР, М. Кл.² E 02D 27/42. Фундамент под блок воздухо-нагревателей / Фомин С. Л., Петров О. А., Бунин В. А., Кандаков Г. П. (СССР). - № 2611269/29-33; Заявлено 03.05.78; Оpubл. 30.09.79, Бюл. № 36. - 4 с. ил.

12. А. с. 727797 СССР, М. Кл.² E 04 C 5/08. Арматура для предварительно напряженных железобетонных конструкций / Фомин С. Л. (СССР). № 2664960/29-33; Заявлено 18.09.78; Оpubл. 15.04.80, Бюл. № 14. - 4 с.

13. А. с. 740919 СССР, М. Кл.² E 04 B 1/74. Теплозащитный экран / Фомин С. Л. (СССР). - № 2682007/29-33; Заявлено 30.10.78; Оpubл. 15.06.80, Бюл. № 22. - 4 с.

14. А. с. 994660 СССР, М. Кл.³ E 04 H 7/00. Способ возведения шлаковой траншеи / Фомин С. Л. (СССР). - № 3296094/29-33; Заявлено 27.05.81; Оpubл. 07.02.83, Бюл. № 5. - 4 с. ил.

15. А. с. 1052630 СССР, МКИ E 02 D 27/44. Фундамент под тепловой агрегат/ Фомин С. Л., Черкасова И. А. (СССР). - № 3471594/29-33; Заявлено 16.07.82; Оpubл. 07.11.83, Бюл. № 41. - 2 с.

16. А. с. 1114753 СССР, МКИ E 04 B 1/74. Устройство для тепловой защиты подземного сооружения / Фомин С. Л. (СССР). - № 3255524/29-33; Заявлено 10.12.80; Оpubл. 23.09.84, Бюл. № 35. - 2 с. ил.

17. А. с. 1158688 СССР, МКИ E 02 D 5/80. Фундамент коксовой батареи / Фомин С. Л., Иванов В. В., Баранов А. А., Музи В. Г., Самойленко В. Н. (СССР). - № 3629069/29-33; Заявлено 03.06.83; Оpubл. 30.05.85, Бюл. № 20. - 2 с. ил.

18. Фомин С. Л. Температурно-влажностные деформации железобетонных рамных фундаментов, работающих в субтропическом климате //Тезисы докладов Всесоюзного координационного совещания "Влияние климатических условий и режимов нагружения на деформации и прочность конструкционных бетонов и элементов железобетонных конструкций" ГрузНИИстрой, Тбилиси, 1985. с. 72-73.

19. А. с. 1404622 СССР, МКИ E 02 D 5/80. Способ реконструкции доменной печи/ Фомин С. Л., Лобасенко Е. Г., Петров О. А., Пеняков С. И., Молодцова В. А., Сотников О. А. (СССР). - № 4163584/29-33; Заявлено 18.12.86, Оpubл. 22.02.88, Бюл. № N 23. - 2 с. ил.

20. А. с. 1411418 СССР, МКИ E 04 G 23/02. Способ усиления колонны рамного фундамента/ Фомин С. Л., Лобасенко Е. Г., Плахотникова И. А., Иванов В. В., Музи В. Г., Швеи Е. А. (СССР). - № 4166240/29-33; Заявлено 25.12.86; Оpubл. 23.07.88, Бюл. № 27. - 2 с. ил.

21. Фомин С. Л. Расчет железобетонных конструкций при температурно-влажностных воздействиях окружающей среды. УДК 624.12; 624.074. ГАСНГИ 27.09. // Труды 43 научной конференции "Эффективные конструкции из железобетона и стеклопластика" Харьковского инженерно-строительного института. Харьков. 1988. с. 55. Рус.-Деп. во ВНИИС.

22. Фомин С. Л. Влияние температуры и влажности среды на напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций. Бетон и железобетон, ресурсо- и энергосберегающие конструкции и технологии // Материалы к X Всесоюзной конференции по бетону и железобетону. Казань. Октябрь 1988. НТО Стройиндустрии Киев.: 1988. с. 241-246.

23. Фомин С. Л. Расчет деформаций усадки железобетонных элементов. // Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении" Белгород, 1989. с. 87-88.

24. Фомин С. Л. Расчет и проектирование железобетонных конструкций при температурно-влажностных воздействиях на базе новых исследований // Тезисы докладов. "Совершенствование железобетонных конструкций, работающих на сложные виды деформаций, и их внедрение в строительную практику". Полтава. 1989. с. 203.

25. Фомин С. Л. Воздействия внешней среды на работу предварительно напряженных железобетонных конструкций // Тезисы докладов "Эксплуатационная надежность инженерных сооружений при сложных нагружениях и воздействиях внешней среды", Ташкентский институт железнодорожного транспорта. Ташкент, 1990. с. 56-57.

26. А. с. 1678983 СССР, МКИ Е 02 D 27/44. Фундамент под тепловой агрегат / Фомин С. Л., Плахотникова И. А., Иванов В. В. (СССР). - № 4692782; Заявлено 16.05.89; Оpubл. 23.09.91, Бюл. № 35. - 4. ил.

27. Фомин С. Л. Расчет железобетонных конструкций на температурно-влажностные воздействия технологической и климатической среды. К.: УМК ВО, 1992.-164 с.

28. А. с. 1746273 СССР, МКИ G 01 N 25/00. Способ определения равновесного влагосодержания капиллярно-пористых материалов / Гапич А. И., Фомин С. Л. (СССР). - № 4825242/ 25; Заявлено 14.05.90; Оpubл. 07.07.92, Бюл. № 25. - 4 с.

29. Фомин С. Л. Розрахунок залізобетонних конструкцій на температурно-вологісні дії технологічного та кліматичного середовища. К.: НМК ВО, 1992.-168 с.

30. Фомин С. Л., Кулешов Н. Н. Поведение железобетонных ребристых и пустотных плит в процессе длительного воздействия пожара. // Проблемы пожарной безопасности. -Харьков.: Мин. обр. Украины, МВД Украины, 1993. с. 235-236.

31. Фомин С. Л., Магди Шариф Салих. Идентификация характеристик влагопереноса бетона путем решения инверсной задачи неизотермической влагопроводности. // Материалы международной научно - практической конференции "Совершенствование строительных материалов, технологий и методов расчета конструкций в новых экономических условиях". Сумы, 1994, с. 79-80.

32. Фомин С. Л., Кулешов Н. Н., Стельмах О. А. Исследование теплофизических характеристик бетона и неметаллической арматуры при высокотемпературном нагреве. // Материалы международной научно - практической конференции "Совершенствование строительных материалов, технологий и методов расчета конструкций в новых экономических условиях". Сумы, 1994, с. 81.

33. Фомин С. Л., Кулешов Н. Н. Влияние стандартного пожара и охлаждения водяными струями на полную диаграмму напряжения-деформации бетона. // Материалы международной научно - практической конференции "Совершенствование строительных материалов, технологий и методов расчета конструкций в новых экономических условиях". Сумы, 1994, с. 252.

34. Фомин С. Л. Огнестойкость и остаточная прочность железобетонных конструкций. Материалы первой всеукраинской научно - технической конференции "Научно - практические проблемы современного железобетона". Киев, 1996, с 183-185.

35. Фомин С. Л. Полная диаграмма " σ - ϵ " бетона и арматуры при нагреве. // Республиканский межведомственный научно-технический сборник "Коммунальное хозяйство городов", Выпуск 8, Киев.: Из-во "Техніка", 1997, с. 27-29.

36. Фомин С. Л. Методика расчета огнестойкости и остаточной прочности статически неопределимых железобетонных конструкций с учетом полной диаграммы " σ - ϵ ". // Республиканский межведомственный научно-технический сборник "Коммунальное хозяйство городов", Выпуск 8, Киев.: Из-во "Техніка", 1997, с. 16-19.

37. Фомин С. Л. Прочность центрально сжатых железобетонных элементов при нагреве и после остывания. // Республиканский межведомственный научно-технический сборник "Коммунальное хозяйство городов", Выпуск 9, Киев.: Из-во "Техніка", 1997, с. 41-42.

38. Фомин С. Л. Методика численного определения температурных полей в железобетонных конструкциях при пожаре // Республиканский межведомственный научно-технический сборник "Коммунальное хозяйство городов", Выпуск 9, Киев.: Из-во "Техніка", 1997, с. 57-58.

Фомін С. Л. Робота залізобетонних конструкцій при впливі кліматичного, технологічного і пожежного середовища. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05. 23. 01 - будівельні конструкції, будівлі та споруди і 05. 26. 03

- Пожежна безпека, Харківська державна академія залізничного транспорту, Харків, 1997.

Запропоновано метод розрахунку залізобетонних елементів, працюючих в умовах впливу кліматичного, технологічного та пожежного середовища, який побудований на експериментально виявлених закономірностях впливу на вологопровідність, вологосмкість, теплопровідність, деформації усадки та набухання, повзучості, а також на повні діаграми " σ - ϵ " важкого бетону температури і вологості.

На основі запропонованого методу розроблені способи числового виявлення температурних і вологісних полів у перерізах залізобетонних елементів, оцінки їх напружено-деформованого стану, нові принципи розрахунку вогнестійкості і залишкової міцності залізобетонних конструкцій будівель та споруд, працюючих при температурно-вологісних впливах.

Результати роботи впроваджені у нормативні документи, в проєктування та будівництво нових об'єктів і таких, що підлягають реконструкції, в проєкти підсилення будівель, постраждалих від пожеж, в рекомендації з тактики гасіння пожеж в будівлях і спорудах з несучими залізобетонними конструкціями.

Ключові слова: теплопровідність, вологопровідність, потенціал вологості, високоінтенсивний нагрів, повні діаграми " σ - ϵ " бетону й арматури при нагріванні, вогнестійкість, залишкова міцність.

Фомин С. Л. Работа железобетонных конструкций при воздействии климатической, технологической и пожарной среды. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения и 05.26.03 - пожарная безопасность, Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 1997.

Предложен метод расчета железобетонных элементов, работающих в условиях воздействия климатической, технологической и пожарной среды, построенный на экспериментально выявленных закономерностях влияния на влагопроводность, влагосмкость, теплопроводность, теплоемкость, деформации усадки и набухания, ползучести, а также на полные диаграммы " σ - ϵ " тяжелого бетона температуры и влажности.

На основе предложенного метода разработаны способы численного определения температурных и влажностных полей в сечениях железобетонных элементов, оценки их напряженно-деформированного состояния, новые принципы расчета огнестойкости и остаточной прочности железобетонных элементов после воздействия пожара. Предложены эффективные решения различного типа железобетонных конструкций зданий и сооружений, работающих при температурно-влажностных воздействиях.

435697

Результаты исследования внедрения в нормативные документы, проектирование и строительство новых и восстановление зданий, пострадавших от пожаров, рекомендации по тактике тушения пожаров в зданиях и сооружениях с несущими железобетонными конструкциями.

Ключевые слова: теплопроводность, влажопроводность, потенциал влажности, высокоинтенсивный нагрев, полные диаграммы "σ-ε" бетона и арматуры при нагреве, огнестойкость, остаточная прочность.

Fomin S. L. Work of ferro-concrete designs at influence of climatic, technological and fire environment. - Manuscript.

A thesis in manuscript form to search for academic degree of doctor of engineering science on profession 05.23.01 - Building Structures, Buildings and Edifices and 05.26.03 - Fire Safety, Kharkov State Academy of Railway Transport, Kharkov, 1997.

Method of account of ferro-concrete elements, working in conditions of influence of climatic, technological and fire environment, constructed on experimentally revealed laws of influence on conductivity of moisture, moisture capacity, heat resistance, heat capacity, temperature deformations, shrinkage, swelling, creeping, and also on the complete diagrams "σ-ε" of heavy concrete of temperature and humidity is offered.

On the basis of an offered method ways of numerical definition(determination) temperature and humid of fields in sections ferro-concrete of elements, estimation of a stressed-deformed condition ferro-concrete of elements, new principles of account of fire-resistance and residual ferro-concrete durability of elements after influence of a fireresistance are developed, experimental check is spent. The effective decisions of a various type of ferro-concrete designs of buildings and structures, working at temperature-humid influence are offered.

The results of research are introduced into the normative documents, designing, constructing and reconstructing of objects, in the projects of restoration of buildings recommendation for tactics of extinguishing desfordted with fire of fires in buildings and structures with (carrying) ferro-concrete by designs.

Kei words: heat resistance, conductivity of moisture, potential humidity, highintensive heating, complete diagrams "σ-ε" of heavy concrete of temperature and humidity is offered, of fire-resistance, residual.