

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР



Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

МИЛОВИДОВ Виктор Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ АНКЕРОВКИ АРМАТУРНЫХ
КАНАТОВ $\varnothing 20 \times 3 \times 7 (3)$ В СПОРНЫХ УЗЛАХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФЕРМ

Специальность 05.23.01 - "Строительные конструкции"

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Челябинск, 1975

Работа выполнена на кафедре железобетонных конструкций Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
А.А.Оатул.

Научный консультант - кандидат технических наук
Ю.В.Максимов.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
С.М.Скоробогатов;
кандидат технических наук, доцент
Г.И.Пирожков.

Ведущая организация - ордена Ленина трест "Челябметаллург-
строй".

Автореферат разослан " ____ " _____ 1975 г.

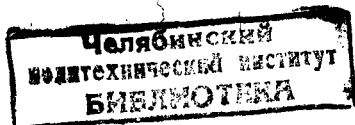
Защита диссертации состоится 23 апреля 1975 года, в 15 ча -
сов, в ауд. _____ на заседании Совета по присуждению ученых сте-
пеней инженерно-строительного факультета Челябинского политех-
нического института имени Ленинского комсомола (454044, г.Челя-
бинск-44, проспект им. В.И.Ленина, 76, тел. 39-39-64).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся
темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета
или прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверен-
ных печатью.

/УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
доцент, кандидат технических
наук

В.В.Капанов В.В.КАПАНОВ



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Эффективным путем совершенствования предварительно напряженных железобетонных конструкций, повышения их экономичности является внедрение в их производство рациональных видов самонакеривающихся арматурных канатов, сочетающих, как известно, высокую прочность с отличной анкерующей способностью. Применение такой арматуры позволяет максимально механизировать и упростить процесс производства предварительно напряженных железобетонных конструкций, снизить трудовые затраты на их изготовление, сократить себестоимость изделий и улучшить их качество.

Наиболее эффективным видом витой проволочной арматуры считаются в настоящее время многопрядные канаты двойной свивки. Они, являясь более укрупненными элементами, чем простые пряди типа П7 или П19, позволяют в наибольшей степени проявить достоинства витой проволочной арматуры.

К такому виду относятся и арматурные канаты конструкции К3х7, разработанные кафедрой железобетонных конструкций Челябинского политехнического института (Э.В.Максимов) и сталепроволочно-канатным производством Белорецкого металлургического комбината СМКП БМК (Н.В.Соколов и Л.А.Красильников).

Первые этапы внедрения арматурных канатов К3х7 в производство предварительно напряженных железобетонных конструкций балок и ферм на предприятиях Главжуралстроя Минтяжстроя СССР показали, что наиболее эффективным типом для балок и ферм покрытий одноэтажных производственных зданий является канат $\varnothing 20\text{К}3\text{х}7(3)$ (рис.1). Однако недостаточная изученность напряженного состояния каната $\varnothing 20\text{К}3\text{х}7(3)$ и механизма его анкеровки в опорных узлах ферм и балок, напряженного состояния косвенной арматуры при отпуске натяжения, отсутствие опытных данных о работе косвенной арматуры в опорном узле под нагрузкой (что относится к другим видам многопрядных канатов), отсутствие четких принципов назначения расчетного сопротивления каната на участке заделки, расчетного сопротивления и объемного процента косвенного армирования, длины участка установки косвенной арматуры в сильной степени затруднили проектирование стропильных и подстропильных ферм ар-

мированных канатами $\varnothing 20\text{К}3\text{x}7(3)$ и сдерживали широкое внедрение этих канатов в производство конструкций.

Цель работы. Исследовать напряженно деформированное состояние участка заделки каната и косвенной арматуры в опорных узлах ферм при отпуске натяжения и при работе под эксплуатационной нагрузкой. На основании результатов исследования разработать предложения по расчету анкеровки каната $\varnothing 20\text{К}3\text{x}7(3)$ и косвенной арматуры в опорных узлах железобетонных ферм.

Методы выполнения исследования. Выполненное исследование базируется на экспериментальных данных, полученных в результате сопоставительного испытания лабораторных образцов, имитирующих работу опорных узлов ферм, и образцов натуральных конструкций стропильных и подстропильных ферм. Сопоставляемые образцы отличались друг от друга прочностью бетона и конструкцией косвенной арматуры.

В теоретической части работы использована современная теория расчета сцепления арматуры с бетоном, основанная на применении дифференцированного закона сцепления.

Научная новизна. В работе впервые детально изучен и вскрыт механизм нарушения анкеровки каната $\varnothing 20\text{К}3\text{x}7(3)$ в опорном узле фермы при воздействии внешней нагрузки.

Выявлен характер работы косвенной арматуры и установлены научно обоснованные критерии назначения длины участка установки косвенной арматуры, объемного процента косвенного армирования, величины расчетного сопротивления косвенной арматуры, величины расчетного сопротивления каната $\varnothing 20\text{К}3\text{x}7(3)$ на участке заделки, а также расчетной длины зоны передачи усилия с каната на бетон.

Установлен вид дифференцированного закона сцепления каната $\varnothing 20\text{К}3\text{x}7(3)$ с бетоном и на его основе разработана теория расчета анкеровки каната в опорном узле фермы.

Практическая ценность. В результате работы получены необходимые данные для уверенного расчета и проектирования анкеровки канатов $\varnothing 20\text{К}3\text{x}7(3)$ в опорном узле фермы, в том числе и косвенной арматуры.

Реализация результатов работы. Результаты научных исследований внедрены в практику проектирования и производства предварительно напряженных железобетонных конструкций стропильных и подстропильных ферм на предприятиях Главмужуралстроя Минтяжстроя СССР

Отдельные результаты исследования переданы для использования в НИИЖБ Госстроя СССР.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

1. Всесоюзном совещании по сцеплению арматуры с бетоном в Челябинске в июне 1968 г.

2. XIX, XX, XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI, XXVII научно-технических конференциях Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола, проходивших в 1966-1974 гг.

3. XXVIII научно-технической конференции Ленинградского ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительного института (г. Ленинград, февраль, 1970 г.).

4. Юбилейной научно-технической конференции по бетону и железобетону, посвященной 100-летию со дня рождения В.И. Ленина, организованной ЧПИ, УралНИИСТРОМПРОЕКТОМ, Челябинским областным НТО Стройиндустрии (г. Челябинск, апрель, 1970 г.).

5. Межобластной семинаре по обмену опытом применения трехрядных арматурных канатов в производстве длинномерных предварительно напряженных железобетонных конструкций (Челябинск, декабрь, 1964 г.).

Публикации. По результатам выполненного исследования опубликовано 12 работ.

Объем работы. Работа состоит из шести глав, введения и заключения, изложена на 147 страницах машинописного текста и содержит 92 рисунка, 36 таблиц и список литературы из 133 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Обзор и анализ работ по сцеплению канатов с бетоном

В начале работы дан обзор и анализ экспериментальных и теоретических исследований советских и зарубежных ученых, посвященных механизму сцепления канатов с бетоном, методике исследования напряженно-деформированного состояния канатов, заделанных в бетон, анализу методик экспериментального определения длины участка передачи, расчетам анкеровки арматуры, принципам проектирования косвенной арматуры, расчету косвенной арматуры и трещиностойкости защитного слоя бетона, исследованию зависимостей между характерными напряжениями и деформациями, используемыми в феноменологических теориях сцепления арматуры с бетоном.

На основе проведенного анализа исследований по сцеплению

арматурных канатов с бетоном сделаны следующие выводы:

1. Несмотря на имеющиеся многочисленные исследования недостаточно изучены напряженно-деформированное состояние заделки каната (в том числе и косвенной арматуры), механизм анкеровки каната в опорном блоке конструкции при воздействии внешней нагрузки.

2. В настоящее время отсутствует четкая методика расчета анкеровки арматуры и косвенного армирования в опорном узле конструкции с учетом действительной стадии работы конструкции (при отпуске натяжения или при испытании нагрузкой) в зависимости от вида предельного состояния анкеровки.

Исходя из анализа состояния исследования анкеровки канатов в бетоне, в том числе и канатов $\varnothing 20\text{К}3\text{x}7(3)$, а также руководствуясь рекомендациями Совещания по проблеме сцепления арматуры с бетоном (г. Челябинск, 1968г.) и УП Всесоюзной конференции по бетону и железобетону (г. Ленинград, 1972 г.), в диссертации поставлены следующие задачи:

1. Осуществить экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния каната $\varnothing 20\text{К}3\text{x}7(3)$, бетона и косвенной арматуры в опорном узле фермы в процессе отпуска натяжения и при воздействии внешней нагрузки в зависимости от прочности бетона и конструкции косвенной арматуры.

2. Проверить экспериментально соображения, высказанные О.В. Дмитриевым относительно механизма нарушения сцепления каната с бетоном.

3. Определить и изучить предельные состояния анкеровки каната $\varnothing 20\text{К}3\text{x}7(3)$, очередность их наступления и их характеристики.

4. Выявить вид дифференцированного закона сцепления каната $\varnothing 20\text{К}3\text{x}7(3)$ с бетоном в форме $\tau = F_d(q, x)$ для случая отпуска натяжения.

5. Разработать методику экспериментальных исследований для решения задач, поставленных в п.п. 1, 2, 3 и 4.

6. Разработать теоретическое решение задачи напряженно-деформированного состояния каната $\varnothing 20\text{К}3\text{x}7(3)$ и бетона в опорном узле фермы при отпуске натяжения с применением опытного дифференцированного закона сцепления.

7. Разработать методику назначения расчетных характеристик анкеровки каната $\varnothing 20\text{К}3\text{x}7(3)$ в бетоне и расчетных сопротивлений косвенной арматуры.

8. Составить практические рекомендации по расчету анкеровки каната в бетоне и косвенной арматуры в опорных узлах ферм.

9. Внедрить результаты исследований в практику проектирования и производство предварительно напряженных стропильных и подстропильных ферм, армированных канатами $\varnothing 20\text{K}3\text{x}7(3)$.

Методика проведения экспериментальных исследований

Исследования проводили на 16-ти образцах (AI+AI6), армированных одним канатом $\varnothing 20\text{K}3\text{x}7(3)$ (рис.1 и табл.1).

Канат $\varnothing 20\text{K}3\text{x}7(3)$, изготовленный по ВТУ 2-350-65, имеет крестовую свивку. Спиральные проволоки прядей каната свиты в правом направлении с шагом 127 мм, а семипроволочные пряди свиты в канат в левом направлении с шагом 325 мм. Площадь сечения каната $152,7 \text{ мм}^2$, $\sigma_{0,02} = 149,6 \text{ кгс/мм}^2$, $\sigma_{0,2} = 176,2 \text{ кгс/мм}^2$, $\sigma_b = 189,9 \text{ кгс/мм}^2$, $E_d = 19100 \text{ кгс/мм}^2$. Канат в свитом состоянии был подвергнут низкотемпературному отпуску.

Продольную и поперечную арматуру опорных узлов выполняли из стержней $\varnothing 6$ мм класса АШ. В образцах варьировали марку бетона и косвенное армирование (рис.2), которое выполняли также из стали класса АШ диаметром 6, 8 и 10 мм.

Отпуск натяжения осуществляли за 8+9 этапов. Испытание нагрузкой проводили 12+15 этапами до разрушения образца.

При отпуске натяжения и испытании нагрузкой измеряли смещение каната относительно бетона q на дне колодцев, устроенных в защитном слое в различных сечениях вдоль опорного узла; тензодатчиками измеряли деформации проволок каната, деформации стержней сеток косвенной арматуры, деформации продольной и поперечной ненапрягаемой арматуры, а также деформации бетона на боковой поверхности узла. Деформации бетона на нижней и боковой поверхности опорного узла вдоль оси каната измеряли тензодатчиками А.Н.Аистова. На торце опорного узла фиксировали смещение каната относительно бетона q_0 (втягивание), его поворот β (звинчивание) и меру деформаций (искривления) торца узла Δc .

Таблица I

Конструкция опытных образцов

Номер серии	Шифр образца	Прочность бетона, кгс/см ²		Усилие на разрыв каната №ш, тс	Косвенное армирование			
		при отпуске	натяжения		Марка сетки	Диаметр стержня, мм	l _к или l _{к1} /l _{к2} , см	M _к или M _{к1} /M _{к2} , %
I	AI	249	256	19,55	CI/5	6	18,48	4,4/I, I
					CI/5	6		
					CI/1			
II	A2	463	470	19,30	CI/3	6	10	4,4
	A3	409	414	19,26	CI/6	6	22	
	A4	437	443	19,72	CI/9	6	34	
III	A5	431	455	18,65	CI/3	8	18,32	3,9/I, I
					CI/4			
					CI/5	8		
IV	A6	466	488	19,37	G2/2	6	34,16	3,9/I, I
	A7	430	441	19,53	CI/7	6	50	3,9
	A8	557	560	19,13				
V	A9	439	450	19,33	CI/7	6	50	2,2
	A10	293	298	19,29				
	A11	328	334	19,77		10		6,1
VI	A12	305	311	19,73	CI/7	8	50	3,9
	A13	339	345	19,33		6		2,2
	A14	330	370	19,85		10		6,1
VII	A16	366	389	20,09	CI/7	6	50	2,2

Примечание: M_к, M_{к1}, M_{к2} - объемные проценты косвенного армирования на длине l_к, l_{к1}, l_{к2}.

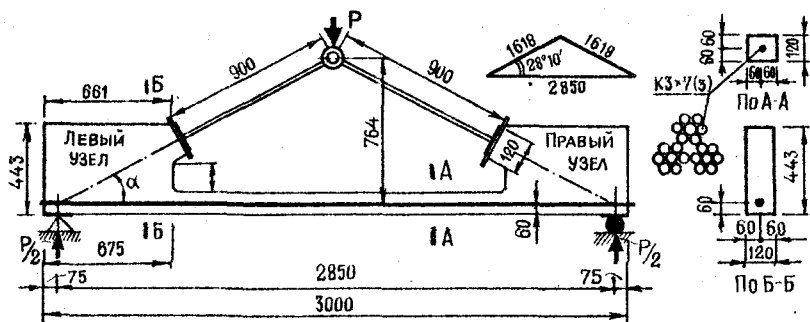


Рис.1. Конструкция образца и схема нагружения

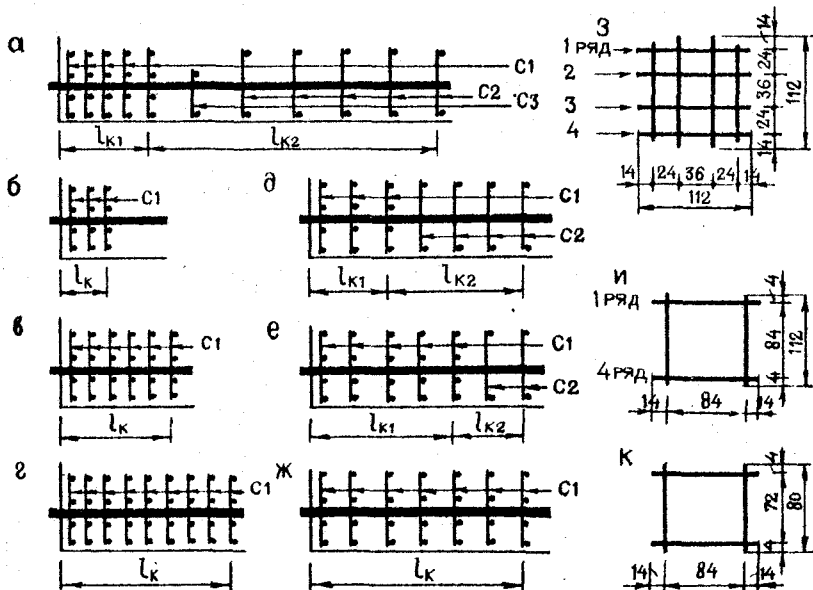


Рис.2. Схема расположения сеток в опорных узлах образцов:
 а - А1; б - А2; в - А3; г - А4; д - А5;
 е - А6; ж - А7+А16; з - сетка типа С1;
 и - типа С2; к - типа С3

Экспериментальные исследования анкеровки канатов
Ø20К3х7(3) в опорных узлах опытных образцов

При вытягивании каната из участка l_{03} в опорном узле фермы происходит его вывинчивание (l_{03} - рабочая или образовавшаяся длина заделки, равная расстоянию от торца узла до первой наклонной трещины) в результате преодоления сопротивления смятию или срезу выступов бетона между проволоками прядей, сил трения, а также сопротивления кручению каната на некоторой части длины $l_{k3} - l_{03}$. На этом участке кручение сдерживается защитным слоем бетона и косвенной арматурой. Когда это сопротивление преодолевается, канат на части участка $l_{k3} - l_{03}$ расплетается, что создает возможность его вывинчивания из участка l_{03} .

Из этого наблюдения вытекает важнейший вывод о том, что для усиления анкеровки каната в опорном узле фермы необходимо сдерживать кручение (расплетание) каната на части участка $l_{k3} - l_{03}$ постановкой здесь достаточно мощной косвенной арматуры.

Напряженно-деформированное состояние заделки каната при отпуске натяжения и при воздействии нагрузки оценивалось следующими предельными состояниями анкеровки: ПС1 - выход на поверхность бетона поперечной трещины (нормальной или наклонной к оси каната); ПС2 - появление продольного смещения q_0 незагруженного конца каната; ПС3 - ширина раскрытия поперечной трещины на участке l_{k3} достигла 0,15 мм. Величина $\alpha_T = 0,15$ мм принята согласно проекту СНиП П-ВІ-72; ПС4 - продольное смещение незагруженного конца каната достигло величины $q_0 = 0,1$ мм; ПС5 - выход продольной трещины раскола на нижнюю поверхность опорного узла; ПС6 - появление поворота незагруженного конца каната (на торце узла); ПС7 - полное проскальзывание (продергивание) каната; ПС8 - разрыв каната за пределами участка заделки.

За длину зоны передачи усилия натяжения с каната на бетон $l_{пу}$ принимали расстояние от торца узла до сечения, где смещения каната относительно бетона были равны нулю, или расстояние от торца до сечения, в котором было передано на бетон 95% усилия обжатия. Длина зоны передачи $l_{пу}$ возрастала с увеличением усилия натяжения каната N_0 , с уменьшением длины участка косвенного армирования l_k и с уменьшением объемного процента косвенного армирования μ_k . Выяснено, что при $R_0 \leq 200$ кгс/см² и $\sigma_0 \leq 12000$ кгс/см² изменение μ_k с 2,2% до 4,4% не влияет на величину $l_{пу}$.

Для вычисления расчетной длины $l_{пу}$ принята зависимость (I)

$$l_{пу} = b + k(\sigma_0 - 7000) \text{ см} \quad (I)$$

где b и k - опытные коэффициенты;
 σ_0 - начальное (исходное) напряжение в канате, кгс/см².

Для получения коэффициентов b и k вначале строили корреляционное поле опытных значений $l_{пу}$ в зависимости от σ_0 при равных прочностях бетона. и находили степень тесноты связи. Коэффициенты корреляции для полей опытных точек равны соответственно 0,792 и 0,711 (рис.3). В обоих случаях коэффициенты корреляции являлись значимыми, с надежностью, превышающей 0,999.

Методом наименьших квадратов проводили линию регрессии $l_{пу}$ на σ_0 (рис.3, прямая I). Вид уравнения линии регрессии такой же, как и у формулы (I). Затем определяли доверительные интервалы изменения параметров прямой регрессии b и k с надежностью 0,977. Используя значения параметров b и k на границах доверительных интервалов, строили прямые 2 и 3. Соединяя точки А и Б, лежащие на прямых 3 и 2, а также находящиеся на границах интервала значений σ_0 в данном опыте, получали прямую 4, которая описывала зависимость $l_{пу}$ от σ_0 с учетом изменчивости длины зоны передачи.

Возможное снижение прочности бетона в производственных условиях учитывали отнесением прямой 4 к прочности бетона, полученной делением R_0 (прочность опытная) на выражение

$$\frac{1 - \alpha C_v}{K_b} \quad (2)$$

где α - для бетона принимается равным 2;
 K_b - коэффициент безопасности, равный 1,2;
 C_v - коэффициент изменчивости, равный 0,135.

Численное значение выражения (2) составляет 0,61. Значения коэффициентов b и k , полученные по предложенной методике (т.е. параметры линии АВ на рис.3), сведены в табл.2.

Расчетная длина $l_{пу}$, назначенная по предложенной методике, учитывает изменчивость свойств сцепления каната $\varnothing 20 \times 3 \times 7(3)$ с бетоном с доверительной вероятностью 0,977, а также возможное снижение прочности бетона в производственных условиях согласно указаниям проекта СНиП П-В.1-72.

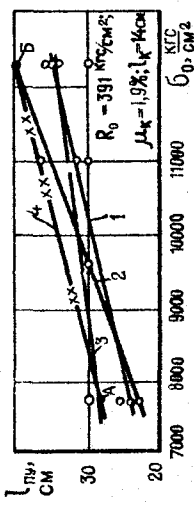


Рис.3. К обоснованию методики расчета $\beta_{пу}$

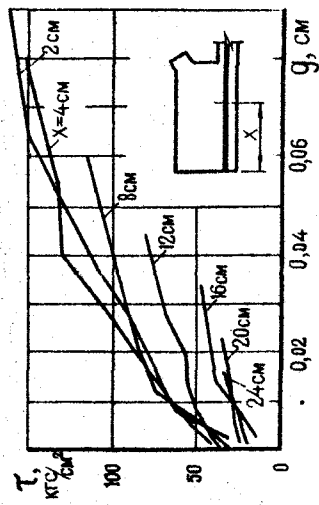


Рис.4. Семейство полигонов опытного дифференцированного закона сплеления $\tau = f_1(q, x)$ для случая передачи усилия предвзимательного напряжения с каната $\varnothing 20 \times 3 \times 7$ (3) на бетон (образец А12)

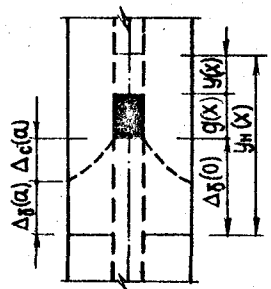


Рис.5. Схема деформированного состояния каната и бетона в произвольном сечении на длине заделки каната

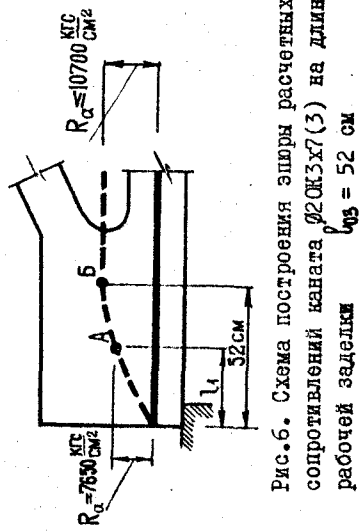


Рис.6. Схема построения эпюры расчетных сопротивлений каната $\varnothing 20 \times 3 \times 7$ (3) на длине рабочей заделки $l_{05} = 52$ см

Таблица 2

Величины коэффициентов β и κ ,
рекомендуемые при проектировании

Коэффициенты	$\mu_{\kappa}, \%$	Прочность бетона при отпуске натяжения R_0 , кгс/см ²		
		300	400	500
$\beta, \text{см}$	2,20 3,91-4,40	42 42	40 38	38 33
$\kappa, \text{см}^3/\text{кгс}$	2,20-4,40	0,0038	0,0034	0,0031

Величину $\beta_{\text{пу}}$, найденную по формуле (1), следует применять при расчете трещиностойкости поперечных сечений опорного узла.

Построение опытного дифференцированного закона сцепления каната $\varnothing 20\text{К}3 \times 7(3)$ с бетоном в форме $\tau = F_1(q, x)$ выполнялось на основе замеров смещений каната относительно бетона и деформаций ненапрягаемой арматуры по длине опорного узла.

Деформации каната вычисляли по формуле

$$\varepsilon_0 - \varepsilon_{a,i+1} = \frac{q_{i,i+1} - q_{i+1,i+2}}{x_{i+1,i+2} - x_{i,i+1}} + \bar{\varepsilon}_{a,ср,i+1}, \quad (3)$$

где $q_{i,i+1}$ - продольное смещение каната относительно бетона в точке, находящейся в середине между реперам P_i и P_{i+1} ;

$x_{i,i+1}$ - координата той же точки, отсчитываемая от торца опорного узла;

$\varepsilon_{a,ср,i+1}$ - относительная средняя деформация стержней продольной ненапрягаемой арматуры в сечении, совпадающем с расположением репера P_{i+1} .

Деформации каната $\varepsilon_0 - \varepsilon_a$ умножали на постоянную величину модуля деформаций E_a и получали напряжения $\sigma_0 - \sigma_a$. Величина модуля деформаций вычислена по замерам деформаций и усилий на свободном участке каната при отпуске натяжения.

Методика подсчета деформаций каната по формуле (3) дает практически одинаковые результаты с методикой непосредственного замера деформаций каната при помощи тензодатчиков, наклеенных на проволоки каната.

Дифференцируя зависимость $\sigma_0 - \sigma_a = f(x)$, получали $\tau = f(x)$.

На основе графиков $\tau = f(x)$ и $q = f(x)$ путем исключения параметра нагрузки определили законы сцепления $\tau = F_1(q, x)$ для отдельных сечений по длине образца (рис.4).

Анализ кривых дифференцированного закона сцепления показал, что в сечениях, расположенных на участке длиной 24-28 см от торца узла вид кривых $\tau = f(q)$ существенно различен. Для сечений более удаленных от торца узла кривые $\tau = f(q)$ различаются незначительно. Поэтому для практических расчетов зависимость $\tau = f(q)$ для сечений, удаленных от торца более чем на 24-28 см, можно принять постоянной для разных сечений (т.е. принять единый закон сцепления).

Для испытанных образцов зависимости $\tau = f(q)$ представляли однозначные возрастающие функции, не проходящие через начало координат (рис.4): при смещении $q = 0$ величина $\tau = \tau_c$ находилась в пределах 12-45 кгс/см². деформативность сцепления характеризуется модулем смещений $A(q, x)$, который равен отношению τ/q .

Величина модуля смещений $A(q, x)$ для сечений, расположенных на участке 24-28 см от торца узла, уменьшалась с удалением сечения от торца узла, уменьшением прочности бетона R_0 , величины μ_k и увеличением напряжения τ .

Кривые $\tau = f(q)$, полученные указанным выше способом, выражены формулой

$$q = a (\tau - \tau_c)^2, \quad (4)$$

Величина коэффициентов a и τ_c зависит от положения сечения. Для сечений, удаленных более чем на 24-28 см, величины этих коэффициентов приняты постоянными.

Расчетные сопротивления каната в предельном состоянии ПС4 назначались по эпюрам напряжений в канате $\sigma_d = f(x)$. Эти эпюры строили на основе экспериментальных замеров смещений каната относительно бетона и деформаций ненапрягаемой арматуры (см. формулу (3)).

На опытных кривых $\sigma_d = f(x)$ находили характерные точки А и Б (рис.6), соединяя которые получали аппроксимирующие полигоны.

Точка А соответствовала величине напряжения в канате, равного расчетному сопротивлению каната, $R_a = 10700$ кгс/см. Точка Б удалена от торца узла на 52 см.

Для оценки параметра точки А (абсциссы l_1) и параметра точки Б (ординаты $\sigma_{d, \max}$) проводили линии регрессии l_1 на R , l_1 на μ_k , $\sigma_{d, \max}$ на R и $\sigma_{d, \max}$ на μ_k .

Параметры линий регрессий обрабатывали по методике, которая применялась для назначения расчетных величин $\ell_{пу}$.

Для учета возможного снижения прочности бетона в производственных условиях обработанные по названной методике величины ℓ_1 и $\sigma_{a, макс}$ были отнесены к прочности бетона, полученной делением опытной прочности на выражение $1 - \alpha C_v$, численное значение которого составляло 0,73. После деления на $C = 1,4$ получили эпюру расчетных сопротивлений каната (рис.6 и табл.3).

Таблица 3

Значения параметров эпюры расчетных сопротивлений каната $\varnothing 20К3х7(3)$ на длине рабочей заделки $\ell_{05} = 52$ см в опорном узле фермы (рекомендации для проектирования)

Параметры точек А и Б на рис. 6	Прочность бетона R , кгс/см ²				M_k , %
	300	400	500	600	
ℓ_1 в см (абсцисса точки А) при $R_a = 7650$ кгс/см	38	36	34,5	33	2,2
R_d в кгс/см ² (ордината точки Б) при $\ell = 52$ см	37,6	35	32	29,5	3,9
	8950	9350	9780	10180	2,2
	8950	9520	10180	10700	3,9

Примечание: Табл.3 составлена для случая армирования опорного узла фермы поперечными сетками с шагом 8 см на длине $\ell_k = 50$ см.

Исследование работы косвенной арматуры в опорных узлах ферм, армированных канатами $\varnothing 20К3х7(3)$

При отпуске натяжения наиболее нагружены первая или вторая сетки, считая от торца узла. Средние напряжения в стержнях этих сеток находились в пределах $\sigma_{с, ср} = 386 + 1422$ кгс/см², а максимальные напряжения (в стержнях вблизи каната) составили $\sigma_{с, макс} = 635 + 2770$ кгс/см². По мере удаления от торца опорного узла величина N_c (сумма усилий в стержнях одной сетки, параллельных нижней поверхности узла) уменьшалась и на расстоянии, равном $\ell_{пу}$, стабилизировалась. Величина установившегося усилия N_c составляла 5+10% от N_c в наиболее нагруженной сетке.

При испытании нагрузкой напряжения в стержнях сеток на длине l_k возрастали и в некоторых образцах достигали условного предела текучести стали.

К моменту образования наклонной трещины приращение усилия N_c в каждой сетке по длине опорного узла составило 10–30% от усилия N_c в наиболее напряженной сетке при отпуске натяжения. После образования наклонной трещины усилия N_c возрастали во всех сетках. В ряде образцов при нагрузке, вызывавшей выдергивание каната из опорного узла, усилия N_c выравнивались на длине l_k .

При воздействии внешней нагрузки в предельных состояниях ПС4 и ПС5 наиболее нагруженной оказывается одна из сеток, имеющих номера 1+5.

Величины усилий $N_{c, \text{макс}}$ в предельных состояниях ПС4 и ПС5 при воздействии внешней нагрузки превышают величину усилия $N_{c, \text{макс}}$ после окончания обжатия бетона соответственно в 1,3+3,7 раза и 1,4+2,8 раза.

При отпуске натяжения и в предельных состояниях ПС1, ПС4 и ПС5 пределы изменения коэффициента $K_1 = \frac{N_{c, \text{сп}}}{N_{c, \text{макс}}}$ составляли 0,18–0,59, а коэффициента $K_2 = \frac{N_{c, \text{сп}}}{N_{c, \text{макс}}}$ составляли 0,35–0,93.

Увеличение μ_k приводило к увеличению $\sum N_c$ и уменьшению деформативности заделки.

Уменьшение прочности бетона приводило к увеличению усилия $\sum N_c$ и деформативности заделки.

При росте зоны косвенного армирования l_k увеличивалась величина $\sum N_c$ и уменьшалась деформативность заделки.

Косвенная арматура должна назначаться так, чтобы в предельном состоянии анкеровки ПС4 было обеспечено требуемое значение выдерживающего усилия каната, определяющего прочность заделки l_{03} (расстояние от торца узла до наклонной трещины).

Длина участка установки косвенной арматуры l_k равна $l_{03} + l_{кр}$, где $l_{кр}$ длина участка, на котором имеются продольные трещины раскола (внутренние и вышедшие на поверхность бетона в предельном состоянии ПС4).

При прочности бетона $R \leq 500$ кгс/см² и величине μ_k , изменяющейся в пределах 2+4%, величину $l_{кр}$ следует принимать постоянной и равной 30 см при условиях, близких к опытным.

В работе найдена опытная зависимость $\bar{A} = f(N_b, \alpha)$, где N_b – усилие в канате в предельном состоянии анкеровки ПС4 в сечении X ; α – координата сечения, расположенного между сетками;

\bar{A} равно отношению $\frac{\sum N_c}{N_b}$ в предельном состоянии анкеровки ПС4.

Опытная зависимость $\bar{A} = f(N_b, x)$ аппроксимируется функцией $\bar{A} = a_3 + b_3 \cdot N_b$; величины коэффициентов a_3 и b_3 даны в табл. 4 в зависимости от прочности бетона R и объемного процента косвенного армирования μ_k .

Используя значения функции \bar{A} , можно построить эпюру $N_c = f(x)$ в предельном состоянии ПС4.

Таблица 4

Опытные величины параметров a_3 и b_3

Коэффици- енты	Прочность бетона R , кгс/см ²					μ_k , %
	300	350	400	450	500	
a_3	0,220	0,185	0,150	0,110	0,075	2,2-39
$b_3 \cdot 10^3$	0,58	0,63	0,69	0,75	0,81	2,2
τ_c	0,18	0,26	0,37	0,48	0,58	3,9

Согласно проведенным исследованиям величину среднего расчетного сопротивления $R_{a,k,cr}$ на длине $l_k = 50$ см следует принимать равной 500 кгс/см².

Если величина расчетного сопротивления каната $\varnothing 20КЗ-7(3)$ на длине рабочей заделки $l_{03} \leq 52$ см принимается с учетом табл. 3 и защитный слой бетона заделки составляет не менее 5 см, то расчет косвенной арматуры можно не производить, а величину μ_k назначать по табл. 3 в зависимости от прочности бетона и требуемой величины выдерживающего усилия каната, заделанного на длине l_{03} . Шаг сеток следует принять равным 8 см.

При этом трещиностойкость продольных сечений заделки каната на длине l_k при отпуске натяжения и при воздействии нагрузки будет удовлетворять требованиям, предъявляемым проектом СНиП П-В.1-72 и конструкциям I категории трещиностойкости.

При $l_k = 50$ см, $\mu_k = 2+4\%$ и прочности бетона $R \leq 500$ кгс/см² применение для сеток косвенного армирования класса арматурной стали большего, чем А-П, не рационально.

Расчет напряженно-деформированного состояния арматурного каната Ø20К3х7(3) и бетона в опорном узле фермы при отпуске натяжения

Теоретическое решение задачи предусматривает использование дифференцированного закона сцепления.

Расчетная схема каната принята на основе допущений:

1. Связь между канатом и бетоном осуществляется дискретно в отдельных сечениях i , удаленных друг от друга на расстояние l . Реакция связи (условное касательное усилие) χ_i приложена в сечении i вдоль оси каната.

Условное касательное напряжение τ в точке i

$$\tau_i = \frac{\chi_i}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (5)$$

2. Длина участка, на котором имеются напряжения τ , равна длине опорного узла L .

3. Дифференцированный закон сцепления записывается в форме

$$\tau_i = A_i \cdot g_i \quad (6)$$

4. Арматурный канат работает упруго.

5. Напряжения в бетоне опорного узла от воздействия касательных усилий χ_i и реактивного давления нижнего пояса вычисляются по приближенной схеме, изложенной в работах Г.Маньеля, А.Пахолька, М.Е.Гибшмана.

В любом сечении элемента, нормальном к линии действия силы, работает только та часть сечения, которая ограничена плоскостями распределения давления, проходящими под углом 45° к линии действия силы. Напряжения в этой части сечения вычисляются по формулам вневентрального сжатия.

6. Мера деформации $\Delta_{c,i}(a)$ вычисляется по формуле (опытная зависимость)

$$\Delta_{c,i}(a) = A_i \cdot \tau_i \quad (7)$$

где A_i - опытный коэффициент, определяющий связь между $\Delta_{c,i}$ и τ_i .

7. Деформация бетона вдоль арматуры вычисляются по формуле

$$\varepsilon_B(x) = \frac{\sigma_B(x)}{E_B} \quad (8)$$

- 18 -

При составлении уравнения совместности деформаций в сечении i (рис.5) отсчет деформаций каната и бетона производим от сечения n , расположенного в месте примыкания нижнего пояса к узлу до сечения i . Уравнение совместности деформаций в сечении i имеет вид

$$y_{ni} - y_i = \Delta b_{i,i}(0) + g_i, \quad (9)$$

где $y_{ni} = \frac{(n-i) \cdot l \cdot \sigma_0}{E_a}$ - предварительное начальное удлинение каната в сечении i ;

$y_i = \frac{l}{E_a} \sum_{j=i}^{n-1} \sigma_j$ - остаточное удлинение каната в сечении i (σ_j - напряжение в канате между сечениями j и $j+1$);

g_i - смещение каната относительно бетона на их контакте в сечении i ;

$\Delta b_{i,i}(0) = \Delta b_{i,i}(a) + \Delta c_{i,i}(a)$ - укорочение бетона на контакте его с канатом в сечении i , равное сумме укорочения бетона на боковой поверхности опорного узла вдоль оси каната $\Delta b_{i,i}(a)$ и меры деформации по ширине сечения опорного узла $\Delta c_{i,i}(a)$.

Система уравнений совместности деформаций после раскрытия величин y_{ni} , y_i , $\Delta c_{i,i}(a)$ и последующего преобразования на основе изложенных выше допущений принимает вид

$$\frac{\tau_i}{A_i} + \Delta_i \cdot \tau_i + \frac{\pi \cdot d \cdot l^2}{E_b} \sum_{j=i}^{n-1} \sum_{k=1}^j \tau_k \cdot \bar{\sigma}_{b,j,k}(a) + \frac{\pi d l^2}{E_a f_a} \sum_{j=i}^{n-1} \sum_{k=1}^j \tau_k = \frac{(n-i) \cdot l \cdot m \cdot \Delta \sigma_0}{E_a}. \quad (10)$$

Решение уравнений осуществляется методом итераций.

На первом цикле решения ($s=1$) любого этапа отпуска натяжения m задаются величинами A_i и Δ_i . После решения системы уравнений и нахождения τ_i величины A_i и Δ_i корректируются на основе опытных зависимостей $\tau_i = A_i g_i$ и $\Delta c_{i,i}(a) = \Delta_i \tau_i$. Циклический процесс решения продолжается до тех пор, пока не будет удовлетворяться условие

$$|\tau_{i,m}^{(s)} - \tau_{i,m}^{(s-1)}| \leq |\omega_0 \cdot \tau_{i,m}^{(s)}|, \quad (11)$$

где ω_0 - малое наперед заданное число, например, 0,05 или 0,005.

Применение зависимостей $\tau = f(q)$, не проходящих через начало координат (т.е. при $\tau = \tau_c$ $q = 0$), дает возможность учесть, что длина зоны смещений l_c меньше длины зоны $l_{пу}$.

Расчет, выполненный на основе исходных данных образца А12, показал, что предложенный расчетный аппарат позволяет получать результаты, хорошо согласующиеся с опытными данными.

Внедрение результатов исследований в проектирование и производство предварительно напряженных железобетонных стропильных и подстропильных ферм, армированных канатами Ø20К3х7(3)

Промышленное внедрение канатов Ø20К3х7(3) в производство ферм осуществлено на предприятиях Главжуралстроя Минтяжстроя СССР (трест №42 в г. Челябинске, трест Челябинметаллургстрой, Курганский завод ЖБИ №1).

Опытные образцы сегментных ферм^{*)} с канатной арматурой, имеющие шифр ФС1, ФС2 и ФС3 (пролет 24 м), запроектированы на основе типовой серии ПК-О1-129. Нижние пояса образцов ФС1 и ФС2 армированы восемью канатами, а образцы ФС3-девятью канатами.

Образцы ФС4 (пролет 24 м) и ФС5 (пролет 18 м) запроектированы на основе типовой серии ПК-О1-129/68. Нижний пояс образца ФС4 имел 11 канатов, а образец ФС5-7 канатов.

Контролируемое напряжение в канате образцов ФС1+ФС5 находилось в пределах $\sigma_0 = 127,5 + 142,5$ кгс/мм².

При пресектировании ферм просчитывались нижние пояса и опорные узлы; верхние пояса и решетка оставлены без изменения.

Характеристики косвенной арматуры были назначены согласно проведенным экспериментальным исследованиям и составляли: для образцов ФС1 и ФС2 - $l_{к1} = l_{к2} = 30$ см, $\mu_{к1} = 4,6\%$ и $\mu_{к2} = 3,0\%$; для образца ФС3 - $l_{к1} = 30$ см, $l_{к2} = 20$ см, $\mu_{к1} = 4,9\%$ и $\mu_{к2} = 3,3\%$, для образцов ФС4 и ФС5 - $l_{к1} = l_{к2} = 30$ см, $\mu_{к1} = 3,3\%$ и $\mu_{к2} = 2,9\%$.

Прочность бетона при отпуске натяжения находилась в пределах $315 \div 390$ кгс/см², при испытании нагрузкой-416 ÷ 525 кгс/см².

Опытные образцы испытывали при отпуске натяжения и при испытаниями нагрузкой. Средние величины смещений канатов на торце узла

*) Проектирование выполнялось на кафедре ЖБИ ЧПИ с участием автора диссертации при научной консультации НИИЖБ (Г.И. Бердичевский, В.А. Клевцов, Л.В. Руф).

q_0 после окончания обжатия для образцов ФС1+ФС5 находились в пределах $0,52 \pm 0,99$ мм и соответствовали смещениям q_0 , полученным при испытании опытных образцов, имитирующих опорные узлы.

Образцы ФС1+ФС5 разрушились от раздавливания пояса при нагрузках, превышающих коэффициент прочности $C = 1,6$. В момент разрушения наблюдали смещение лишь одного углового каната в образце ФС2 на величину $0,08$ мм, при этом продольные трещины раскола на поверхности узлов отсутствовали.

Для сравнения испытали образец типовой фермы ФС-24-5П (образец ФС6), армированный прядями П7, конструкция которого аналогична образцу ФС1. Образец ФС6 разрушился от проскальзывания прядей при нагрузке, соответствующей $C > 1,6$.

Испытано четыре опытных образца натуральных подстропильных ферм, армированных канатами $\Phi 20 \times 3 \times 7(3)$. Образец ФП7, запроектированный на основе серии ПЖ-01-110, имел в сечении нижнего пояса 10 канатов. Образцы ФП8*) и ФП9*), изготовленные по альбому серии "Объект 2021-86", имели в нижнем поясе 11 и 14 канатов. Образец ФП10*) выполнен по альбому серии "Объект 2021-87" и был армирован 6 канатами, расположенными несимметрично в сечении нижнего пояса.

Косвенная арматура у всех образцов была одинаковой, и ее характеристики составляли: $l_{k1} = 22$ см, $l_{k2} = 48$ см, $\mu_{k1} = 3,1\%$ и $\mu_{k2} = 1,3\%$. Характеристики косвенной арматуры были назначены согласно проведенным исследованиям.

Контролируемое напряжение в канате образцов ФП7-ФП10 составляло $\sigma_0 = 127,5$ кгс/мм².

Прочность бетона образцов ФП7-ФП10 при отпуске натяжения находилась в пределах $360 \div 406$ кгс/см²; при испытании нагрузкой находилась в пределах $415 \div 435$ кгс/см².

Средние смещения каната на торцах образцов после окончания обжатия находились в пределах $0,48 \div 0,75$ мм.

При максимальной нагрузке на образцы ФП7, ФП8 и ФП9, соответствующей коэффициенту C , равному $1,68 \div 1,76$, разрушение ферм не произошло. В образце ФП10 при нагрузке, соответствующей коэффициенту $C = 1,92$, разрушился верхний пояс. В образцах ФП7-ФП10 не наблюдались смещения канатов на торцах опорных узлов. При этом максимальные напряжения в канатах нижнего пояса превышали норматив-

*) Проект выполнен Московским Промстройпроектом и НИИЖБом при участии автора диссертации.

ное сопротивление каната $R_a^H = 15\ 000\ \text{кгс/см}^2$ на 8+22%.

Образец ФПІІ, армированный прядями, изготовлен по серии "Объект 1968-3" для сравнения с фермой ФПІО, разрушился от выдергивания прядей из опорных узлов при нагрузке, соответствующей коэффициенту $C = 1,75+1,83$.

Основные итоги работы

1. В представленной работе впервые детально выяснен механизм нарушения анкеровки каната в опорных узлах ферм при работе их под внешней нагрузкой и установлена решающая роль косвенной арматуры как средства предотвращения раскола защитного слоя и вывинчивания каната.

2. Выяснен характер работы косвенной арматуры и установлены научно обоснованные критерии назначения длины участка косвенной арматуры, объемного процента косвенного армирования и величины расчетного сопротивления косвенной арматуры.

3. Разработаны принципы назначения расчетного сопротивления каната $\varnothing 20\text{К}3\times 7(3)$ на участке заделки каната, а также расчетной величины длины зоны передачи $l_{пз}$.

4. Установлен вид дифференцированного закона сцепления каната $\varnothing 20\text{К}3\times 7(3)$ с бетоном в форме $\tau = F_1(q, x)$ при отпуске натяжения и предложено его аналитическое выражение.

5. Создан расчетный аппарат с применением дифференцированного закона сцепления $\tau = F_1(q, x)$ для расчета напряженно-деформированного состояния каната и бетона при отпуске натяжения, позволяющий получить результаты, хорошо согласующиеся с опытными данными.

6. Сформулированы восемь характерных предельных состояний участка анкеровки каната в бетоне (ПСІ+ПСВ).

7. Разработаны следующие методики исследования и расчета анкеровки каната $\varnothing 20\text{К}3\times 7(3)$ в опорном узле фермы:

а) методика экспериментального изучения напряженно-деформированного состояния каната $\varnothing 20\text{К}3\times 7(3)$ и бетона (с замером смещений q между ними), а также продольной ненапрягаемой и косвенной арматуры при отпуске натяжения и при воздействии внешней нагрузки;

б) методика исследования напряженно-деформированного состояния участка заделки каната $\varnothing 20\text{К}3\times 7(3)$ с помощью предельных состояний анкеровки;

в) методика построения опытного дифференцированного закона сцепления в форме $\tau = F_1(q, x)$;

- г) методика назначения расчетной длины зоны передачи;
- д) методика назначения величины расчетных сопротивлений каната на участке каната $\varnothing 20 \times 3 \times 7(3)$;
- е) методика вычисления величин усилий и напряжений в стержнях сеток косвенной арматуры при работе опорного узла под внешней нагрузкой в стадии, когда смещение каната относительно бетона на торце узла равно $q_0 = 0,1$ мм;
- ж) методика назначения длины участка косвенной арматуры и величины расчетного сопротивления косвенной арматуры.

8. Результаты научных исследований внедрены в практику проектирования и производство предварительно напряженных железобетонных конструкций стропильных и подстропильных ферм на предприятиях Главжуралстроя Минтяжстроя СССР.

По материалам диссертации
опубликованы следующие работы:

1. Исследование анкеровки трехрядных канатов $K3 \times 7(3)$ в опорных узлах ферм. Сборник научных трудов ЧПИ "Исследования по бетону и железобетону", №149, Челябинск, 1974. (Соавтор - Малахов О.П.).
2. О методике расчета длины зоны передачи усилия натяжения с каната $K3 \times 7(3)$ на бетон. Сборник научных трудов ЧПИ "Исследования по бетону и железобетону", №149, Челябинск, 1974. (Соавтор - Максимов Ю.В.).
3. Испытание предварительно напряженных железобетонных подстропильных ферм, армированных канатами или прядями. Сборник научных трудов ЧПИ "Исследования по бетону и железобетону", №149, Челябинск, 1974. (Соавторы: Максимов Ю.В., Малахов О.П., Матвеев К.М., Чистов А.Ф., Шпак В.Т.).
4. Сцепление трехрядных канатов $K3 \times 7$ с бетоном. "Сцепление арматуры с бетоном", сборник по материалам Всесоюзного научно-технического совещания в Челябинске, Москва, 1971. (Соавторы: Максимов Ю.В., Соловьев Б.В., Оатул А.А.).
5. Дифференцированный закон сцепления с бетоном арматурных канатов $K3 \times 7(3)$. Сборник научных трудов ЧПИ "Исследования по бетону и железобетону", №73, Челябинск, 1969.
6. Испытание предварительно напряженных железобетонных ферм, балок и плиты размером 3×12 м, армированных канатами $K3 \times 7(3)$. Сборник научн. трудов ЧПИ "Исследования по бетону и железобето-

ну", №73. Челябинск, 1969. (Соавторы: Максимов Ю.В., Рудяков Д.И., Стоякин В.Ф., Соловьев Б.В.).

7. Предварительно напряженные фермы и балки, армированные трехрядными канатами типа КЗх7. — "Бетон и железобетон", №1, 1968. (Соавторы: Голубков В.М., Капзульник М.Л., Максимов Ю.В., Оатул А.А., Рудяков Д.И., Соловьев Б.В., Черный А.С.).

8. Сцепление трехрядных канатов КЗх7 с бетоном. Сборник научных трудов ЧПИ "Вопросы сцепления арматуры с бетоном", №56, Челябинск, 1968. (Соавторы: Максимов Ю.В., Оатул А.А., Соловьев Б.В.).

9. Сцепление трехрядных канатов КЗх7 с бетоном. "Сцепление арматуры с бетоном". Краткое изложение сообщений на конференции по проблеме сцепления арматуры с бетоном (25-27 июня 1968 г.). Челябинск, 1968. (Соавторы: Максимов Ю.В., Оатул А.А., Соловьев Б.В.).

10. Предварительно напряженные железобетонные конструкции, армированные трехрядными канатами типа КЗх7. Техническая информация, издание треста "Оргтехстрой", Главжуралстрой, Минтяжстрой СССР, Челябинск, 1967. (Соавторы: Максимов Ю.В., Оатул А.А., Рудяков Д.И., Стоякин В.Ф., Соловьев Б.В.).

11. Эффективные предварительно напряженные железобетонные конструкции в промышленном и жилищном строительстве. "Советская наука за 50 лет Советской власти". Тезисы докладов на конференции ученых Челябинской области, Челябинск, 1967. (Соавторы: Голубков В.М., Капзульник М.Л., Максимов Ю.В., Оатул А.А., Рудяков Д.И., Чирков В.П.).

12. Арматурные канаты для железобетонных конструкций. "Экономия металла, материалов, электроэнергии и топлива". Областная научно-техническая конференция 10-14 мая 1966. Секция строительства. Доклады и сообщения. Челябинск, 1966. (Соавторы: Максимов Ю.В., Оатул А.А., Соловьев Б.В.).