

621.01.001
10
551.00.

АКАДЕМИИ НАУК ГРУЗИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

Инженер Н.С. БУРДУЛИ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯ-
НИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СКВОЗНЫХ СЕЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ РАМ-
НО-РЕШЕТЧАТОГО ТИПА.

(05.23.01-строительные конструкции)

0-4031

ДИ С С Е Р Т А Ц И Я

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

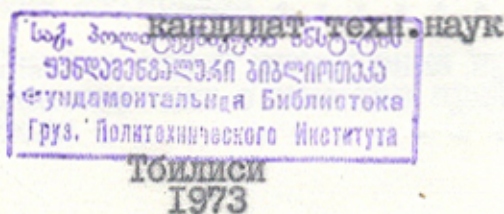
НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ:

академик АН Груз. ССР

К.С. ЗАВРИЕВ

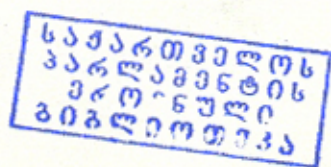
кандидат техн. наук

Г.В. КИЗИРИЯ



О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр
ВВЕДЕНИЕ	I
ГЛАВА I. Состояние вопроса по исследованию пространственных селеуловителей рамно-решётчатого типа	3
§ 1. Селевые потоки и их регулирование	3
§ 2. Состояние вопроса по исследованию пространственных селеуловителей рамно-решётчатого типа	9
ГЛАВА II. Теоретическое исследование напряжённо-деформированного состояния пространственных селеуловителей рамно-решётчатого типа при симметричном и несимметричном нагружении в упругой стадии работы материала	15
§ 1. Методы расчёта и исследования пространственной конструкции селеуловителя	15
§ 2. Приближённый метод расчёта рамно-решётчатой пространственной системы	43
§ 3. Исследование различных пространственных конструкций при помощи приближённого метода расчёта	48
ГЛАВА III. Исследование конструкции селеуловителя рамно-решётчатого типа с учётом пластических деформаций материала	68
§ 1. Необходимость в расчёте конструкции селеуловителя, учитывающем пластические свойства материала	68
§ 2. Анализ схемы разрушения пространственной конструкции с помощью приближённого метода	76



§ 3. Нахождение действительной схемы разрушения для пространственной системы . . .	82
ГЛАВА IV. Экспериментальное исследование напряжённо-деформированного состояния пространственных селуловителей рамно-решётчатого типа . . .	
§ 1. Цель экспериментальных исследований . . .	86
§ 2. Описание опытного селуловителя	88
§ 3. Силовое оборудование	94
§ 4. Размещение и назначение измерительной аппаратуры	97
§ 5. Проведение эксперимента	101
§ 6. Общий характер работы конструкции под экспериментальной нагрузкой	102
§ 7. Анализ результатов экспериментальных исследований	105
§ 8. Сравнение теоретических данных с экспериментальными	115
ГЛАВА V. Примеры расчёта и внедрения сборных железобетонных пространственных селуловителей рамно-решётчатого типа.	
ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ	129
ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА	133

2 13366

В В Е Д Е Н И Е

Ежегодно наша страна несёт колоссальный ущерб от ветровой и водной эрозии и селевых потоков, исчисляемый миллиардами рублей в год. Значительная доля этого ущерба вызывается селевыми потоками, представляющими крайнее и зачастую катастрофическое проявление водной эрозии в горах. В соответствии с постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 20 марта 1967г. "О неотложных мерах по защите почв от ветровой и водной эрозии" и постановлениями, принятыми в союзных республиках, в СССР начато широкое осуществление противоэрозионных мероприятий, в том числе строительство гидротехнических, противоэрозионных и противоселевых сооружений, а перед партийными, государственными и хозяйственными советскими органами поставлен ряд больших и серьёзных задач, осуществление которых считается делом государственной важности.

В этих условиях большое значение приобретают вопросы создания рациональных, надёжных и экономичных конструкций противоселевых сооружений, допускающих производство и возведение их современными индустриальными методами.

Одной из таких конструкций является сквозной железобетонный селеуловитель рамно-решётчатого типа. Для внедрения его в практику строительства необходимо исследовать его конструкцию и выработать методику расчёта. Эта задача решается в приведённой работе.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов. Общий объём страниц машинописного текста с рисунками и фотографиями, с 2 таблицами. В списке использованной литературы 67 наименований.

В главе I приведены случаи прохождения селевых потоков и дан краткий обзор способов борьбы с их разрушительным действием. Дано описание сборных железобетонных пространственных конструкций селеу-

ловителей рамно-решётчатого типа и приведён обзор по результатам их исследования, проведённого другими исследователями. В главе намечены цели и задачи диссертации.

Глава II посвящена теоретическому исследованию напряжённо-деформированного состояния селеуловителей рамно-решётчатого типа под различными типами нагрузок в упругой стадии работы материала. В главе предложены методы точного расчёта пространственных систем. Выведены предпосылки для приближённого метода расчёта конструкций. Проведён анализ различных рам для нахождения оптимальных соотношений величин геометрических характеристик и наиболее выгоднейшей структуры селеуловителя.

В главе III рассмотрена необходимость расчёта конструкций селеуловителя с учётом пластических свойств материала и разработаны методы точного и приближённого расчётов на основе метода предельного равновесия.

Глава IV посвящена экспериментальному исследованию напряжённо-деформированного состояния селеуловителей рамно-решётчатого типа и сравнению полученных результатов с результатами теоретического исследования.

В главе V приведён пример расчёта и внедрения селеуловителя рамно-решётчатого типа.

ГЛАВА I

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СЕЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ РАМНО-РЕШЁТЧАТОГО ТИПА.

§ I. Селевные потоки и их регулирование.

Горные районы СССР и других стран подвержены разрушительному действию селевых потоков. Сели или грязекаменные потоки, возникающие в горных ущельях и выносящие моренный и грунтовый материал в предгорья, являясь частым и грозным стихийным бедствием, таит в себе большую опасность. Они наносят значительный ущерб не только сельскому хозяйству, лесонасаждениям, но и различным сооружениям на автомобильных и железных дорогах, промышленным и гражданским сооружениям, населённым пунктам.

Селевные потоки образуются там, где сочетаются интенсивное разрушение горных пород, выпадение интенсивных осадков и наличие значительных по протяжённости крутых ущелий. Сели могут возникнуть при прорыве ледниковых и моренных озёр, в этом случае они часто вызываются не обильными дождями, а высокими температурами и интенсивной солнечной радиацией в районе ледников. Прохождение селевых потоков часто сопровождается человеческими жертвами. В СССР, по данным каталогов, составленных Гидрометслужбой на январь 1966 года, зарегистрировано более 5000 случаев прохождения селей, но они далеко не охватывают всего возможного количества селевых потоков и селеносных бассейнов, в которых по тем или иным причинам сели пока не зарегистрированы, но которые являются потенциально селеопасными.

История знает немало селевых катастроф. В ночь с 17 на 18 августа 1891 г. в Тироле волна селевого потока из ущелья австрийских Альп достигала высоты 18 м, цветущая долина за короткое время была занесена толстым слоем грязи и камней. Разрушительное действие селей особенно часто имело место в Лос-Анжелесе (1914 г., 1934 г., 1938г.). Сель

1938 г. вынес из гор грязекаменную массу объёмом более 11 млн.м³ при среднем расходе 2000 м³/сек и причинил колоссальные убытки (погибло более 200 человек).

В 1963 году в горах Заилийского Алатау сель погубил живописное озеро Иссык, причём при этом было снесено много домов, пекарня, винный завод, разрушена асфальтированная дорога, сорваны мосты.

В 1946 г. сель, прошедший по р.Гетар, разрушил в г.Ереване 800 домов, а 610 сильно повредил. В 1953 г. на р.Чхери (Груз.ССР) сель завалил русло р.Терек и разрушил участок Военно-Грузинской дороги. В 1959 г. селевой поток на р.Прут разрушил 235 мостов, 365 км дорог.

Селевые потоки в бассейне р.Малая Алмаатинка дважды в 1921 и 1947 годах нанесли ущерб г.Алма-Ате, опустошили сельскохозяйственные угодья, погубили много скота. 8 июля 1921 года после сильного ливня над горами Заилийского Алатау на г.Алма-Ату обрушился грязекаменный вал, перемещавшийся волнами с интервалом в 30-60 сек. Он нанёс большие разрушения городу и вызвал человеческие жертвы. Пройдя в створе Медео с объёмом 1-1,5 млн.м³, он принёс в город более 3,5 млн.м³ твёрдого материала; средний расход селя был равен 200 м³/сек. В последние годы в районе Алма-Аты не было значительных селей, однако в ущелье р.Малая Алмаатинка продолжало угрожать городу. Селеопасность его определялась не только возможностью образования селевого потока при сильных ливнях и смыве грунта со склонов, как это было в 1921 г., но и возможностью прорыва ледниковых и моренных озёр, расположенных на высоте 3200-3300 м на ледниках Туюк-Су.

В 40 млн.рублей оцениваются убытки, которые может причинить этому городу один мощный селевой поток. Вопросу селезащиты г. Алма-Аты, особенно в послевоенные годы, уделялось большое внимание. С привлечением широкого круга специалистов были рассмотрены различные варианты

Ущерб народному хозяйству, наносимый селевыми потоками исчисляется миллионами рублей. Кроме этого исключаются для эффективного использования большие площади в селеопасных бассейнах. Например, Кварельский район (Груз. ССР), по подсчётам Грузгипроводхоза, теряет ежегодно до 2 млн. руб. чистой прибыли из-за неиспользования сельскохозяйственных угодий, подверженных селевой угрозе.

Необходимо отметить, что стихийно-разрушительные процессы возникают не только в горных районах, но и на слабопересечённых территориях в виде интенсивного оврагообразования, а по насыщенности твёрдым материалом весенние и дождевые паводки не отличаются от селевых потоков в типичных горных бассейнах.

Важное значение, которое придаётся борьбе с селевыми потоками в нашей стране отражено в постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 20 марта 1967 года, а на проведение противэрозионных мероприятий и на строительство противоселевых сооружений предусмотрены значительные капиталовложения — сотни миллионов рублей. Это ставит перед учёными большие и ответственные задачи для изыскания и обоснования эффективных методов борьбы и предотвращения разрушительного действия селевых потоков и возможности скорейшего внедрения предложенных методов в массовых масштабах. Задачи селезащиты тем более требуют скорейшего разрешения, т.к. эрозионные и селевые процессы являются прогрессирующими и с каждым годом требуют всё больших капиталовложений проведения соответствующих мероприятий, направленных на их затухание.

Борьба с селевыми потоками, как и все мероприятия, связанные с локализацией или предотвращением катастрофических последствий явлений природы, требуют больших материальных затрат. Например, на осуществление одного из основных разделов комплекса селезащиты — стабилизацию

селевых русел системами поперечных запруд для 2200 селевых бассейнов, выявленных на территории СССР по состоянию на 1964 год, потребуются затратить не один миллиард рублей. Фактически же количество потенциально опасных в селевом отношении горных и предгорных бассейнов в СССР значительно больше.

Почти вековой опыт противоэрозионных и противоселевых работ, осуществляемых в различных странах мира, показал, что практикуемая индивидуальная защита различных объектов и населённых пунктов от непосредственной угрозы сформировавшегося селевого потока часто малоэффективна или недолговечна. Необходимость проведения комплексной противоселевой, противоэрозионной борьбы вплоть до очагов селеобразования осознана и учитывается на практике в ряде стран Европы (Франции, Австрии, Югославии, Чехословакии и др.), в Японии, в США.

Селевая деятельность почти во всех горных районах страны, пока что прогрессирует, т.к. полноценной комплексной борьбы с развитием селевой деятельности у нас ещё не ведётся. Современное понятие о селезащите представляет собой сложный комплекс различных административных, лесомелиоративных и гидротехнических мероприятий по борьбе за прекращение или снижение селевой и эрозионной деятельности в бассейнах рек.

Одним из основных мероприятий является стабилизация селевых русел системами перегораживающих сооружений. Основной целью регулирования селевого русла с помощью каскада поперечных сооружений является создание русла с выположенными ступенями. Наличие пологих ступеней взамен русла с большим уклоном способствует разгрузке потока от наносов. Фиксируя базис эрозии, поперечные сооружения предотвращают наиболее опасную линейную эрозию, лишают поток возможности насыщаться наносами за счёт рыхлых отложений русла.

Стабилизирующие русла поперечные сооружения в настоящее время часто выполняются массивными, из каменной, бетонной и изредка железобетонной кладки, высотой обычно 5-20 м. В гребне барража устраивается водосливной вырез, в теле предусматриваются сточные отверстия, прикрываемые с верховой стороны решёткой и дренирующей призмой из крупного камня. С низовой стороны устраиваются водобойные колодцы, водобойные стенки или гибкие защитные туюфы и мощные рисбермы из крупного камня.

Относительным недостатком массивных барражей малой высоты является необходимость частого расположения их вдоль крутого русла, но быстрое их занесение и массовое строительство, в результате быстрее приводит к конечной цели — стабилизации русла.

Стремление к удешевлению строительства барражей и удлинению срока их службы вызвало появление различных конструкций сквозных барражей. Сквозное сооружение гасит основную часть накопленной селевым потоком кинетической энергии, задерживает часть твёрдой фазы селя, благодаря чему прошедший сквозь это сооружение селевой поток уже не представляет опасности для подзащитного объекта. Проходящая при этом в нижний бьеф мелкодисперсная часть твёрдой фазы селей может явиться полезным удобрением для сельскохозяйственных угодий. Кроме того сквозные сооружения имеют более длительный срок службы по сравнению с массивными.

Были предложены несколько типов наклонных решётчатых селеуловителей, которые не нашли практического применения из-за сложности их осуществления, большого количества типоразмеров, наличия сложных сварных стыков и др. Дальнейшие усложнённые их модификации оказались экономически недостаточно эффективными. Например, конструкция Казахского отделения Водоканалпроекта из металлических стоек, забитых поперёк с натянутыми на них поперечными тросами, применённая для защиты в. Теке-

ли на р. Черкассай, после непродолжительной успешной работы была размыта со стороны нижнего бьефа.

Казахским отделением Гидропроекта было разработано и построено наклонное металлическое селезащитное сооружение на р. Алмаатинка.

Оригинальные сквозные барражи применяются в Австрии, Италии (рис. 1а), во Франции (рис. 1б), в Японии, в США, в СССР (рис. 1в), в Югославии и в других странах.

Ввиду необходимости развёртывания широкого фронта борьбы с разрушительными селевыми потоками, представляется чрезвычайно актуальной, перспективной и эффективной работа по созданию наиболее рациональных противоселевых конструкций индустриального типа, позволяющих вести их строительство механизированными методами. Современные противоселевые сооружения должны отличаться полной надёжностью в работе при прохождении селевых потоков любой мощности в селевых руслах любой ширины. Они должны быть не сложными и удобными для изготовления их индустриальными методами и быть достаточно экономичными в затрате материальных трудовых ресурсов и денежных средств. Они должны быть легко применимы для русел и ущелий с любым очертанием каньона, и устройство их не должно быть трудоёмко.

Один из типов сквозных селеуловителей рамно-решётчатого типа предложен И. И. Херхеулидзе в Закавказском научно-исследовательском гидрометеорологическом институте в 1962 году.

Селеуловитель рамно-решётчатого типа представляет собой сборную железобетонную конструкцию любой высоты и заданной в профиле и плане формах, состоящую из однотипных железобетонных элементов — балок с проушинами по концам, располагаемые в соответствии с заданной схемой сборки в различных горизонтальных и вертикальных плоскостях так, чтобы отверстия всех смежных элементов совпадали, и объединённые при по-

моци арматурного каркаса, пропускаемого через отверстия в проушинах. Между балками устанавливаются железобетонные шайбы. Каркасы заделаны в железобетонные башмаки. Возможен вариант и без последних. Тогда создают и развивают нижнюю плоскость, составленную из нанизанных у основания стоек дополнительных балок. Каналы, образованные отверстиями в проушинах ригелей и шайбах, заливаются цементным раствором или бетоном. Омоноличивание связывает всю конструкцию в единое жёсткое целое. Нижняя часть селеуловителя и образованные плоскости засыпают наброской из камней, высота которой определяется из условия устойчивости сооружения. Различные комбинации этих элементов, укладываемых по схеме примыкающих треугольников, образуют сквозную плотину (рис. 2). Её решётчатая конструкция гасит энергию селевого потока, задерживая крупные включения и одновременно свободно пропуская воду и мелкие частицы. Это исключает необходимость устройства специальных сооружений для отвода воды, которая возникает при использовании сплошных барражей, повышает коэффициент полезного объёма, образующегося за селеуловителем. Занос нижней части конструкции увеличивает собственный вес и, следовательно, устойчивость сооружения. Наличие большого количества однотипных элементов делает возможным и выгодным их изготовление на заводах железобетонных конструкций. Конструкция удовлетворяет современным требованиям механизации и уменьшения трудоёмкости возведения. Монтаж её легко осуществляется самоходными кранами небольшой грузоподъёмности.

Селеуловители предложенной системы, по нашему мнению, соответствуют основным требованиям, предъявляемым к таким сооружениям.

Высокую оценку селеуловителям рамно-решётчатого типа дали чехословацкие, венгерские и югославские специалисты. В журнале "Изградња" № 8 1967 г., например, указывается, что "сборно-решётчатые перегородки ЗакНИГМИ открывают новую перспективу для проведения противоселевых

работ на больших территориях".

Надо отметить, что одиночные барражи и даже высокие плотины отнюдь не решают задачу стабилизации селевых русел, которая достигается лишь строительством каскада относительно невысоких поперечных сооружений. К этому выводу пришёл европейский, японский и американский опыт. Поэтому одиночно построенные барражи не могут решить самостоятельно задачи защиты объектов от прохождения мощных селевых потоков. Таким образом, для достижения надёжности селезащиты с помощью селеуловителей рамно-решётчатого типа, необходимо провести стабилизацию русла системой таких конструкций.

§2. Состояние вопроса по исследованию пространственных селеуловителей рамно-решётчатого типа.

Принимая во внимание важность борьбы с селевыми потоками и целесообразность использования в этих целях селеуловителей рамно-решётчатого типа в связи с присущими им положительными качествами: их надёжностью, удовлетворительной заносимостью, изготовлением и монтажом современными индустриальными методами, применением их для перегораживания русел и ущелий с любым очертанием каньона и др. — необходимо перейти от экспериментального строительства к типовому массовому.

Чтобы выполнить эту важную для народного хозяйства задачу, надо всесторонне изучить конструкцию этого селеуловителя, выявить особенности его работы, связанные со способом возведения, для максимального использования его несущей способности и предложить достаточно точные и приемлемые методы расчёта.

Основной расчётной нагрузкой, на которую рассчитывается конструкция селеуловителя, является давление проходящего грязекаменного пото-

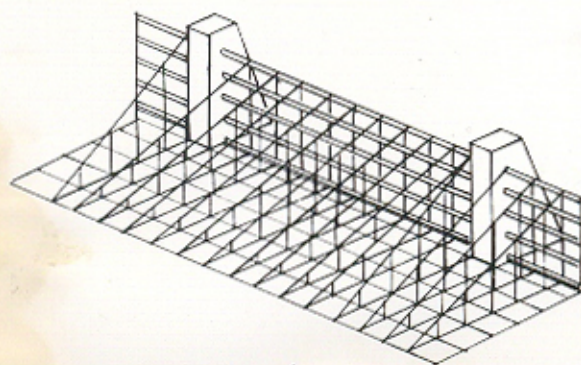
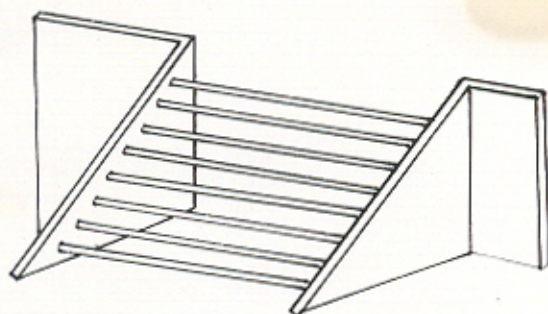
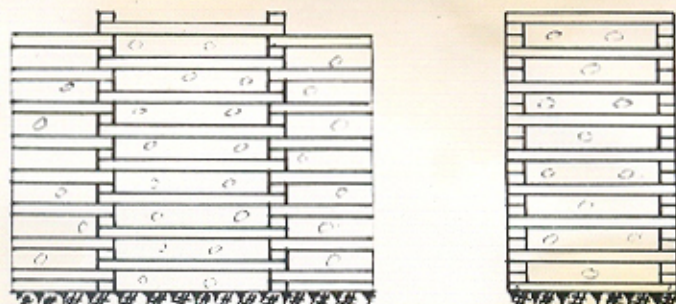


рис 1

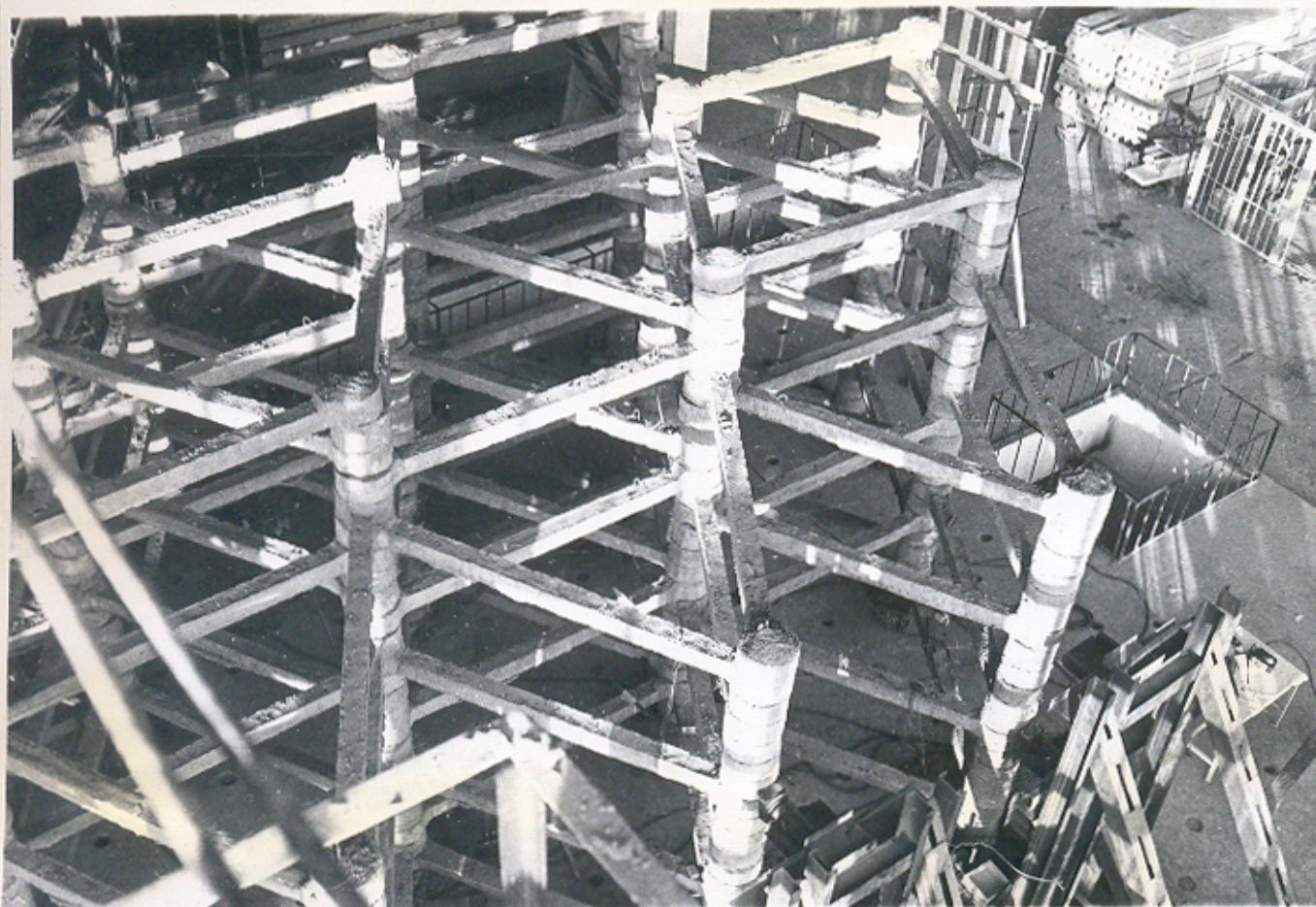


рис. 2

ка. Для того, чтобы сооружение могло выполнять своё назначение, оно должно удовлетворять следующим условиям:

1. Устойчивость конструкции должна быть достаточной.

2. Конструкция в целом должна иметь достаточную несущую способность.

3. Отдельные элементы конструкции должны иметь достаточную прочность.

4. Для конструкции допускаются любые по величине деформации, не разрушавшие её.

В соответствии с этим необходимо произвести следующие расчёты.

а) Проверку на скольжение и опрокидывание, рассматривая сооружение как жёсткую систему.

б) Проверку несущей способности отдельных систем, которые могут быть выделены в конструкции или проверку несущей способности в целом, учитывая её пространственность. Эти системы должны иметь геометрически неизменяемую схему и опорные крепления, рассчитанные на передачу усилий на основание.

в) Проверку отдельных элементов на местные нагрузки — удар отдельных крупных камней.

Общее исследование сквозных селеуловителей рамно-решётчатого типа и условий их работы выполнено в 1965 году кафедрой мостов и железобетонных конструкций ГПИ им. В. И. Ленина /II, 30, 33/.

Сооружение было мысленно расчленено на отдельные элементы — балки, имеющими своими опорами стойки. За расчётную нагрузку, действующую в горизонтальной плоскости балки, принимается удар отдельного крупного камня диаметром, равным одному метру. Рассматриваемый элемент может однажды подвергаться ударному воздействию, причём при этом в нём допускаются локальные повреждения, не вызывающие его разрушения или потери общей устойчивости, т.е. в отдельных элементах сквозной кон-

струкции допускается развитие значительных пластических деформаций. Разрушающий момент принимается в середине элемента в его горизонтальной плоскости. Поэтому перемещения балки, в основном, характеризуются поворотом её обеих частей, как абсолютно жёстких тел относительно образующегося шарнира. В основу расчёта положена схема жёстко-пластического тела. Кроме того, при принятой расчётной нагрузке исследовалась форма и армирование проушин.

Расчёты сквозных селеуловителей на устойчивость (опрокидывание и скольжение) проводились в 1966 - 1967 годах в ЗаНИГМИ инж. Т.Хачапуридзе.

Таким образом, необходимые расчёты, изложенные в пунктах а) и в), были выполнены ранее и в работе в дальнейшем не рассматриваются.

Поэтому основным вопросом и целью данной работы является изучение конструкции селеуловителя нового рамно-решётчатого типа, исследование её несущей способности как пространственной системы; на основе анализа её напряжённо-деформированного состояния - выделение отдельных основных несущих систем в ней, отображающих сущность её поведения под нагрузкой; разработка приемлемых точных и приближённых методов расчёта. Кроме того, проведение экспериментального исследования для выяснения ряда особенностей в работе конструкции, связанных со способом её возведения, и проверка состоятельности принятой схемы расчёта и сделанных при этом допущений.

Пространственная конструкция селеуловителя рамно-решётчатого типа является довольно сложной и многостержневой. Поэтому в ней может быть выделено несколько основных несущих систем. Наиболее близки к реализации две самостоятельные системы, которые передают силы воздействия селевого потока на основание.

Первая несущая система, которая может быть выделена из сооружения, это горизонтальные фермы с решёткой из треугольников, распо-

ложенных в несколько ярусов. Здесь следует иметь в виду, что отдельные элементы таких ферм не лежат в одной плоскости, однако с учётом моментов от эксцентричного приложения усилий такая схема может быть положена в основу расчёта сооружения.

Вторая несущая система, которая тоже может быть выделена из сооружения, — это вертикальные многоярусные рамы, расположенные вдоль направления течения селевого потока или под углом к нему.

Возможно рассматривать также комбинацию этих двух систем, считая сооружение перекрёстной системой, состоящей из горизонтальных ферм и вертикальных рам или стоек, и распределять нагрузку между ними пропорционально их жёсткости или несущей способности.

Комбинированная расчётная схема в виде горизонтальных ферм и проходящих через узлы ферм вертикальных стоек и распределение действующих нагрузок, исходя из условия работы упругой конструкции, была рассмотрена К.М.Хуберяном /67/ для сооружений, имеющих закреплённые торцы (заделанные в борта ущелья).

К сожалению, в связи с техническими трудностями, ЗахНИГМИ не представилось возможным до настоящего времени реализовать детальные расчёты по методу Хуберяна для конкретных конструкций.

В работах /7, 35, 36/ для приближённого инженерного расчёта была выбрана вторая несущая система, т.е. вертикальные регулярные многоярусные рамы с действующей на них горизонтальной нагрузкой. Этот выбор был обусловлен тем, что такая схема более соответствует характеру работы конструкции, чем первая, в виде горизонтальных ферм. По первой схеме действующие силы передаются в плоскости ферм на разных уровнях по высоте. Соответственные опорные реакции ферм будут передаваться также на разных уровнях. При этом необходимо учитывать, что реакции, передаваемые фермами, будут иметь значительную

величину, так как они собирают усилия со всего пролёта ферм. Для восприятия этих реакций стало бы необходимым сооружение мощных береговых устоев. При этом не используется то обстоятельство, что каждая стойка сооружения имеет свой фундамент, который может принимать участие в восприятии действующих сил.

Расчётная схема в виде горизонтальных несущих ферм и соответствующее конструктивное оформление может быть целесообразным при относительно небольшой ширине русла и скальных крутых берегах, когда реакции ферм могут непосредственно или через подушку передаваться бортам ущелья. Однако, принимать такую схему затруднительно, когда в сквозном barrage устраиваются вырезы для фиксации межженного русла.

При второй схеме, когда выделяется несущая система в виде вертикальных многоярусных рам, используется характерная особенность рассматриваемой конструкции: передача давлений на грунт основания происходит не большими сосредоточенными силами через мощные опоры, а через многочисленные опорные закрепления относительно небольшими величинами.

Как показали подсчёты, нецелесообразно также и комбинированная схема расчёта, когда учитывается работа как вертикальных элементов, так и горизонтальных ферм. Жёсткость и несущая способность вертикальных элементов — стоек настолько мала, что практически вся нагрузка передаётся через горизонтальные фермы.

Г Л А В А П

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
СЕЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ РАМНО-РЕШЁТЧАТОГО ТИПА ПРИ СИММЕТ-
РИЧНОМ И НЕСИММЕТРИЧНОМ ЗАГРУЖЕНИИ В УПРУГОЙ СТАДИИ
РАБОТЫ МАТЕРИАЛА.

§ I. Методы расчёта и исследования прост-
ранственной конструкции селеуловителя.

Конструкция селеуловителя рамно-решётчатого типа представля-
ет собой сложную пространственную систему, состоящую из значитель-
ного числа узлов и горизонтальных элементов, находящихся в разных
уровнях и потому высокой степени статической неопределимости. Она
является весьма сложной как для точного, так и для приближённого
расчёта. Например, небольшой фрагмент конструкции, изображённый на
рис. 3, имеет 216 лишних неизвестных в случае расчёта её методом
сил и 180 неизвестных — методом перемещений. Фрагмент селеуловите-
ля, который был испытан на горизонтальную нагрузку (рис. 4), являет-
ся 768 раз статически неопределимой конструкцией при расчёте её
методом сил и 640 раз при расчёте её методом перемещений.

Для исследования конструкции необходимо установить особеннос-
ти действующей нагрузки и этапы её работы.

Селевая нагрузка является единственной, на которую должен рас-
считываться селеуловитель, и представляет собой движущуюся с боль-
шими скоростями селевую массу. Величины интенсивности потока дают-
ся для различных бассейнов гидрологическими расчётами.

При прохождении потока интенсивность его давления меняется от нуля к максимуму и затем опять к нулю. Постепенное нарастание интенсивности улучшает условия работы конструкции.

После каждого прохождения селевого потока нижняя часть конструкции заносится на определённую высоту до тех пор, пока она не превратится в железобетонный каркас земляной плотины, для которого вопросы всех трёх предельных состояний теряют смысл.

Частичное занесение сооружения приводит к тому, что каждый последующий селевой поток проходит по более высокому уровню, чем предыдущий. Вследствие частичного занесения сооружения и верхнего бьефа несколько уменьшается уклон лога за сооружением, что приводит к снижению скоростей селевого потока и нагрузки от него.

Поскольку величина селевой нагрузки, действующей на систему, пропорциональна площади соприкосновения потока с элементами конструкции и, при прочих равных условиях, с постепенным занесением её при прохождении каждого нового потока, система находится в более выгодных условиях работы, необходимо обеспечить прочность конструкции при самом первом прохождении селевого потока.

Срок службы сквозного селеуловителя должен исчисляться с момента его возведения до превращения его в каркас земляной плотины. Как показали специальные подсчёты, основанные на темпах заполнения проектируемых селехранилищ, подсчитанный таким образом срок службы даже для самых высоких сооружений (порядка 30-40 м) не превышает 25-30 лет, а для сооружений средней высоты (10-15 м) - 8-12 лет, то-есть значительно меньше эксплуатационных сроков службы обычных железобетонных конструкций.

Приведённые особенности, обусловленные спецификой работы селеуловителей, должны учитываться при разработке методики их рас-

чёта.

Расчёт пространственной системы должен проводиться в упругой стадии работы материала. С его помощью отчётливо прослеживается напряжённо-деформированное состояние системы, устанавливается статически допустимое и безопасное распределение изгибающих моментов.

Селеуловитель, как уже отмечалось выше, возводится из сборных железобетонных элементов — балок, шайб и фундаментных блоков. В зависимости от типа грунтов или условий на местности при фундировании сооружения можно обойтись без фундаментных блоков. С этой целью на самый низ каждой из стоек нанизываются железобетонные балки, образующие перед и за сооружением плоскую решётку, лежащую на грунте, которая вместе с селеуловителем засыпается камнем. Высота наброски каменного балласта и ширина передней и задней решётки обуславливаются расчётами сооружения на устойчивость. При действии горизонтальной нагрузки от проходящего селя в работу включается та часть элементов, которая возвышается над каменной наброской. При этом стойки можно считать жёстко защемлёнными в основании.

Стойки по всей высоте составлены из отдельных элементов, объединённых арматурой и бетоном сердечника. Особенности их работы, приведённые и подробно рассмотренные в главе IV, заключаются в том, на разных этапах работы стойка имеет различное рабочее сечение.

Ригели конструкции в горизонтальной плоскости образуют треугольники, поэтому перемещение их концов в этой плоскости затруднительно. Перемещение концов ригелей и изменение их углов поворота в вертикальной плоскости тоже ограничено. Правда, в первый момент приложения нагрузки (см. гл. IV) происходит некоторый поворот концов ригелей в вертикальной плоскости, что приводит к изменению рабочего сечения стойки и окончательному защемлению ригелей в стойках. Поэтому

для определённого этапа упругой работы сооружения примыкание ригелей к стойкам можно принять жёстким.

Конструкция по своей структуре: стойки, имеющие жёсткое защемление в пяте, ригели с жёсткостью, соизмеримой с жёсткостью стоек, жёсткое защемление концов ригелей и, в результате, жёсткие узлы — может быть принята за пространственную раму.

Расчёт пространственных рам селуловителя производится теми же способами, что и расчёт плоских рам, при помощи одного из известных методов: методом сил или перемещений с составлением системы канонических уравнений.

$$\begin{cases} x_1 \delta_{11} + x_2 \delta_{12} + \dots + x_n \delta_{1n} = \Delta_{1p} \\ \dots \\ x_1 \delta_{n1} + x_2 \delta_{n2} + \dots + x_n \delta_{nn} = \Delta_{np} \end{cases} \quad (I)$$

$$\begin{cases} z_1 z_{11} + z_2 z_{12} + \dots + z_n z_{1n} = R_{1p} \\ \dots \\ z_1 z_{n1} + z_2 z_{n2} + \dots + z_n z_{nn} = R_{np} \end{cases} \quad (I')$$

Однако решение таких систем уравнений наталкивается на большие трудности, обусловленные значительным количеством неизвестных и пространственным характером нагрузок, усилий и деформаций. Количество коэффициентов N , которое надо определить для системы уравнений порядка n составит $N = n(n+1)$, т.е. для конструкции, имеющей в основании три треугольника и 216 лишних неизвестных

$$N = 216 \times 217 = 46872.$$

В /17/ теория расчёта пространственных рам разработана проф. Горбуновым в общем виде при помощи "моторного анализа". "Мотором" называется пространственный векториальный образ, определяемый 6 коорд.

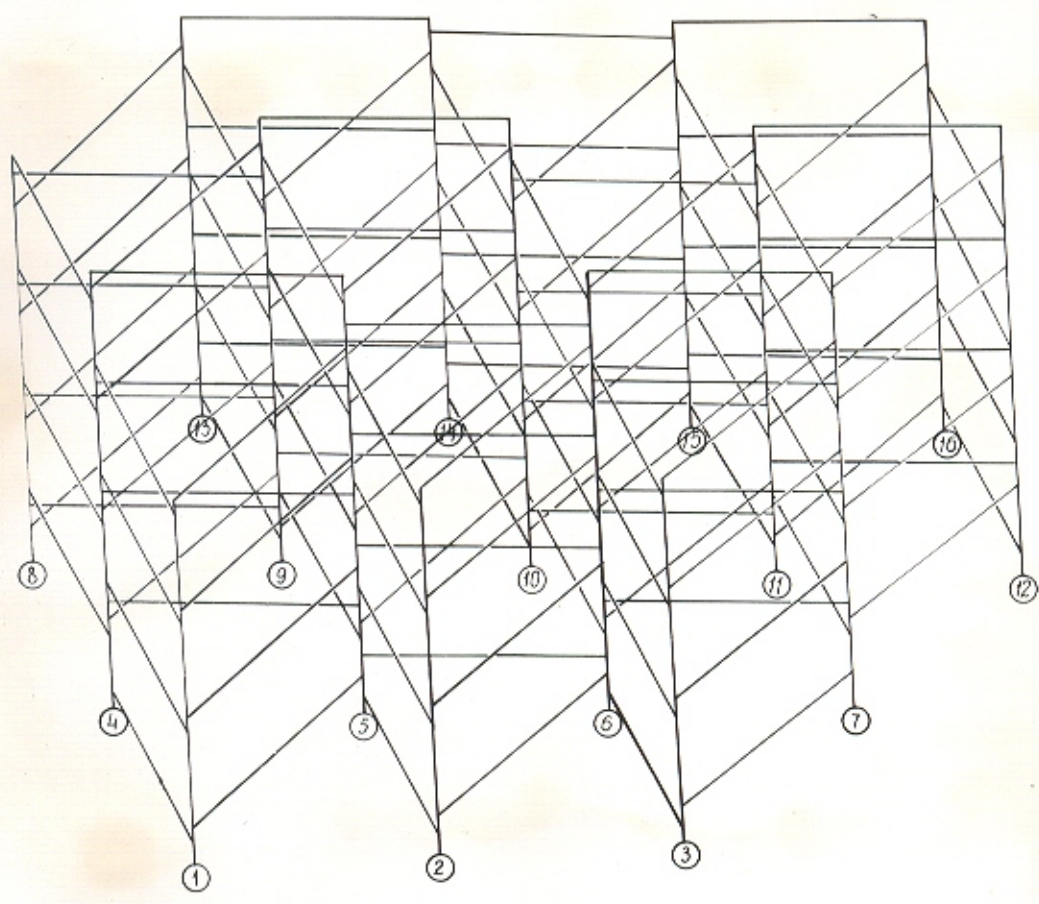


рис. 4

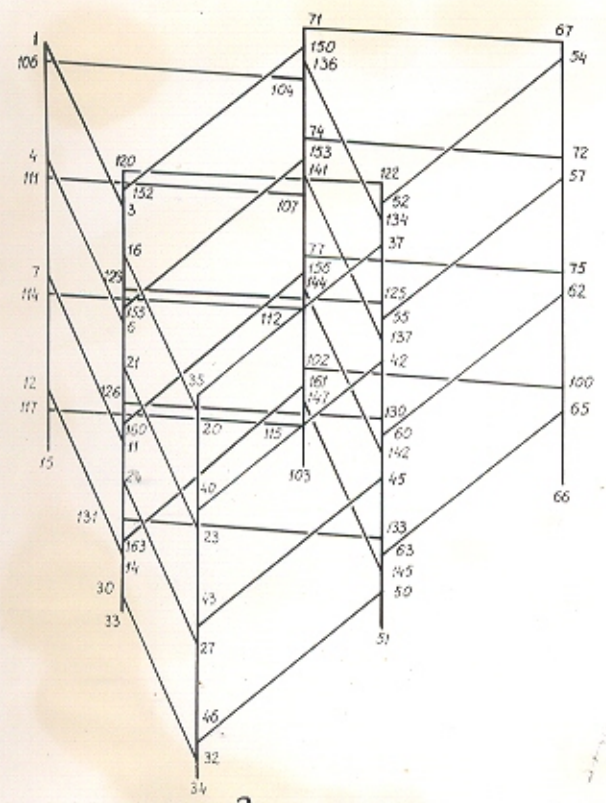


рис. 3

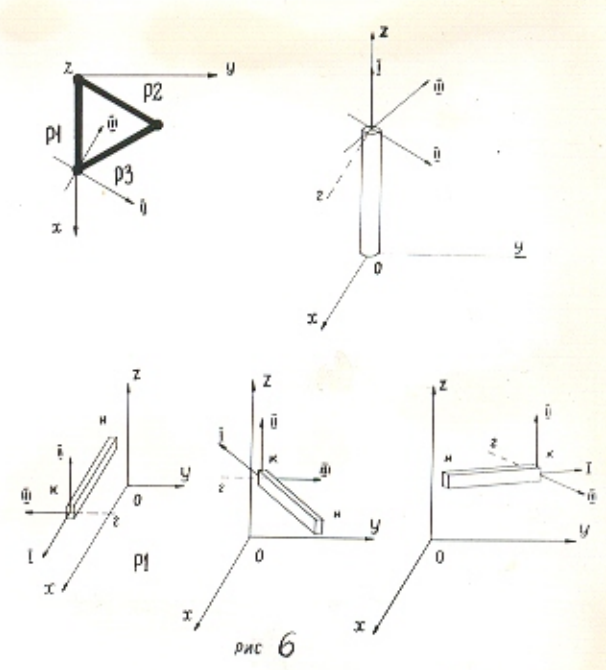


рис. 6

В отличие от плоских стержневых систем, в которых на каждое сечение действуют три компонента внутренних сил: M , Q и N , — в пространственных системах на сечение любого стержня действуют шесть величин $M_x, M_y, M_z, N_x, Q_y, Q_z$.

Ось x является продольной осью, z направлена по главной нормали к этой кривой, в то же время оси y и z являются главными осями поперечного сечения. Момент M_x является крутящим, а моменты M_y, M_z — изгибающими.

Общая формула перемещений для пространственной системы может быть записана по аналогии с формулой перемещений, относящейся к плоским системам.

$$\begin{aligned} \Delta_{ip} = & \sum \int \frac{M_i^y M_p^y dS}{E J_y} + \sum \int \frac{M_i^z M_p^z dS}{E J_z} + \\ & + \sum \int \frac{M_i^x M_p^x dx}{G T_x} + \sum \int \frac{N_i N_p dS}{E F} \\ & + \sum \int \frac{M_i Q_i^y Q_p^y dS}{G F} + \sum \int \frac{M_i Q_i^z Q_p^z dS}{G F} \end{aligned} \quad (2)$$

где M_1 и M_2 — коэффициенты, зависящие от формы сечения.
 M_i^y, M_p^y — моменты относительно оси y , вызываемые соответственно виртуальной силой $X = 1$ и внешней нагрузкой и т. д.

Решение системы уравнений по стандартным программам на ЭЦВМ представляет некоторые трудности.

Несколько проще определение расчётных усилий в пространственной системе методом сил в матричной форме, предложенной Дж. Аргиросом /59/. При определении усилий матричным методом основная система получается из заданной статически неопределимой отбрасыванием

лишних связей, превращающим её в статически определимую.

Существенным в расчёте является не вид основной системы, не вид групп сил, действующих по направлению отброшенных связей, принимаемых в качестве неизвестных, а вид эпюр, усилий им соответствующих. Фактически эти эпюры являются той системой функций, по которой раскладывается в конечный ряд искомая функция, роль же неизвестных в расчёте играют коэффициенты при указанных функциях.

Основным понятием является система функций (в старой терминологии это эпюры усилий в единичных состояниях), по которой производится разложение искомой функции (действительная эпюра распределения усилий) и которую следует рассматривать как конечную систему координатных функций (базис). К базису предъявляются следующие требования.

1. Каждая из функций должна быть статически возможной.
2. Число функций в базисе должно быть равно степени статической неопределимости.
3. Функции должны быть линейно независимыми.

От того, как удачно выбран базис, зависит трудоёмкость и точность выполнения расчёта. Базис, выбранный нами, показан на рис. 5.

Матрица усилий во всех расчётных сечениях рассматриваемой статически неопределимой системы получается по формуле:

$$S = B_p^* + B_1^* X \quad (3)$$

Первое слагаемое в правой части представляет собой усилия в основной системе от внешних нагрузок, а второе — от лишних неизвестных.

В развёрнутом виде формула (3) после подстановки в неё вместо B_p^* и X выражений выглядит так:

$$S = [\bar{B}_p^* - B_1^* (B_1' F B_1)^{-1} (B_1' F \bar{B}_p)] P \quad (4)$$

где F - матрица податливости всех элементов системы, рассматриваемых самостоятельно.

$$F = \begin{vmatrix} F_1 & \dots & 0 \\ 0 & F_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & F_n \end{vmatrix} \quad (5)$$

B_1 - матрица усилий во всех расчётных сечениях от всех единичных линейных неизвестных (размеры матрицы $ph \times n$, где p - число усилий в одном расчётном сечении, участвующих в раскрытии статической неопределённости.

\bar{B}_p - матрица усилий во всех расчётных сечениях от всех единичных внешних нагрузок (размеры матрицы $ph \times t$).

B_1^* - матрица полного числа усилий во всех расчётных сечениях от единичных линейных неизвестных ($p_1 h \times n$), где p_1 - полное число усилий в расчётном сечении.

\bar{B}_p^* - матрица полного числа усилий во всех расчётных сечениях от всех единичных внешних нагрузок, её размеры ($p_1 h \times t$).

B_1' - транспонированная матрица B_1 .

P - матрица внешних нагрузок

$$P = \begin{vmatrix} P_1 & \dots & 0 \\ 0 & P_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & P_n \end{vmatrix} \quad (6)$$

Матрица P имеет вид, показанный выше, если линейные неизвестные

и усилия необходимо найти при самостоятельном действии каждой из t нагрузок.

Если же в расчёте нас интересуют величины лишних неизвестных и усилий, возникающие при самостоятельном действии всех нагрузок, то вместо матрицы P имеем матрицу $P = \{P_1 P_2 \dots P_n\}$ (7)

Таким образом, для того чтобы найти усилия и перемещения, соответствующие внешним нагрузкам, действующим на конструкцию, необходимо составить четыре исходные матрицы:

$$B_1^* [B_1]; \bar{B}_p^* [\bar{B}_p]; F \text{ и } P$$

$$(p_1 h \times n) [p h \times n]; (p_1 h \times t) [p h \times t]$$

$$(p h \times p h) \text{ и } (t \times 1) \text{ или } (t \times t),$$

где p - число усилий в одном расчётном сечении, учитываемых при раскрытии статической неопределённости,

P_1 - полное усилие в одном расчётном сечении,

n - степень статической неопределённости,

h - число расчётных сечений (число элементов),

t - число независимых нагрузок.

Поскольку вертикальные размеры рам находятся в прямо пропорциональной зависимости от высоты элемента и шайбы, обозначенными через "а", то все матрицы возможно составить в общем виде, чтобы иметь возможность в решениях варьировать геометрическими размерами конструкций.

Для определения усилий в элементах селеуловителя наиболее рациональным является расчёт пространственной конструкции по программе для расчёта плоских и пространственных стержневых систем

МАРСС - 103 /52/, разработанный Гипротисом для ЭЦВМ "Минск 22", с помощью которой в один расчёт можно ввести до 15 разных загрузок.

Однако, число элементов, составляющих рассчитываемую систему, имеет ограничения, приведённые ниже, вызванные конечной величиной памяти машины, объём которой, надо полагать, будет со временем увеличен. Время машинного счёта, в зависимости от сложности введённой информации, колеблется в пределах 3-5 часов.

Чтобы рассчитать стержневую конструкцию на ЭЦВМ, необходимо описать её расчётную схему на языке, доступной для использования машиной.

Расчётная схема сооружения представляет собой условное изображение действительного сооружения, оно фигурирует в процессе расчёта вместо сооружения. Каждый стержень системы на расчётной схеме изображается его геометрической осью; стержни, образующие узел, считаются сходящимися своими концами строго в одной точке, в центре узла.

Для составления исходных данных машинного расчёта должны быть известны следующие сведения о расчётной схеме стержневой системы:

- 1) характер соединения стержней между собой и закрепления в опорных точках;
- 2) координаты всех узлов в произвольно выбранной правой системе координат;
- 3) жёсткости всех стержней при деформациях в тех направлениях, которые должны быть учтены в расчёте (растяжение-сжатие, сдвиг, кручение, изгиб);
- 4) положение в пространстве главных центральных осей инерции

поперечного сечения каждого стержня;

5) типы внешних нагрузок, места их приложения, направления и величины.

Для расчёта плоских стержневых систем информация пункта 4 является излишней и при составлении исходных данных опускается.

Чтобы рассчитать систему по программе, не надо накладывать никаких качественных ограничений ни на геометрическую схему, ни на характеристики соединений и жёсткости её стержней, ни на силовые воздействия, приложенные к ней. Но существует ряд количественных ограничений, связанных с возможностями и параметрами ЭЦВМ Минск-22.

По программе MARSS-103 можно рассчитывать стержневые системы, расчётные схемы которых состоят из прямых стержней постоянного сечения. Этому условию удовлетворяет конструкция селеуловителя.

Для расчётной системы должны выполняться условия:

$$2 n_{\text{стерж}} + U_K + U_{жс} (p+14) n + 7 n_{\text{сил}} \leq 6600 \quad (8)$$

где

$$U_K = \begin{cases} U_{\text{коорд.}} & \text{— для пространственной системы} \\ 4/3 U_{\text{коорд.}} & \text{— для плоской системы} \end{cases}$$

$$U_{жс} = 6 n_{жс} + n_{ор} \quad (9)$$

p — число загружений, на которое рассчитывается система в настоящий момент

$n_{жс}$ — число групп жёсткостей

$n_{ор}$ — число групп ориентации

Для плоской системы $\Pi_{op} = I$.

Расчётная схема конструкции не должна содержать абсолютно жёстких замкнутых контуров, а также стержней нулевой длины ($l_{min} = 0,001 \text{ м}$).

Всем этим ограничениям рамы селеуловителя удовлетворяют.

Результатом расчёта пространственной стержневой системы являются шесть внутренних усилий (нормальная и две поперечные силы, крутящий и два изгибающих момента), возникающих в концевых поперечных сечениях каждого стержня при статическом приложении внешних нагрузок.

Результаты расчёта плоской стержневой системы – три внутренних усилия на концах каждого стержня (нормальная и поперечная силы и изгибающий момент).

Для задания координат узлов и нагрузок пространственной стержневой системы выбирается произвольная, но обязательно правая прямоугольная система координат. На рис. 6 приведены выбранные для рассчитываемых фрагментов селеуловителя системы координат.

Координаты узлов плоской системы задаются также в правой прямоугольной системе координат 47. Узлы нумеруются в восьмеричной системе счисления, начиная с номера 001, наибольший номер узла – 777.

Один из концов каждого стержня условно называется началом стержня, другой – концом стержня. При составлении исходных данных выбор начала и конца произволен для всех стержней, кроме тех, которые примыкают к опорным узлам. Опорный узел всегда принимается за начало.

Для каждого из стержней выбираются три оси I, II и III, образующие правую прямоугольную систему координат, в которой задаются

жёсткости стержня, характер соединения стержней между собой и закрепления в опорных точках. В этих же осях координат даются результаты расчётов.

Для рассчитываемых фрагментов на рис. 6 показаны оси I, II и III для ригелей каждого направления и для стоек. Начало и конец стержней обозначены соответственно буквами Н и К.

Ориентация в пространстве осей I, II и III стержня характеризуется параметром δ - косинусом угла, образованного положительными ветвями горизонтали и оси II.

Все стержни системы, одинаково ориентированные в пространстве, т.е. стержни с одинаковым параметром δ , объединяются в одну группу ориентации. Группы ориентации нумеруются восьмеричными числами, начиная с номера 001. Для ригелей рассчитываемого селеуловителя, объединённых в первую группу ориентации, $\delta = 0$, для стоек, отнесённых ко второй группе ориентации, $\delta = 0,5$.

Признаком опирания обозначается характер соединения стержней между собой в узлах и закрепления в опорах, т.е. признак опирания содержит информацию о способе опирания концов стержня.

На каждый конец стержня может быть наложено не более шести связей, препятствующих взаимному перемещению концов стержней. Из них три связи препятствуют линейным перемещениям концов стержней и три связи - поворотам. В соответствии с этим признак опирания выражается шестизначным двоичным числом. Каждый разряд двоичного числа может принимать только два значения 0 или 1, причём 1 означает наличие связи, препятствующей перемещению, а 0 - отсутствие связи, т.е. возможность перемещения. В первом, втором и третьем разрядах двоичного числа, выражающего признак опирания, отмечается наличие связей, препятствующих линейным перемещениям соответственно в направлении осей I, II, III. В четвёртом, пятом

и шестом разрядах отмечается наличие связей, препятствующих поворотам конца стержня соответственно относительно осей I, II и III.

Например, жёсткий узел имеет признак опирания III III или 77 для пространственной системы и IOI OIO или 52 для плоской системы. Жёсткость каждого стержня пространственной системы характеризуется шестью величинами.

EF (т) — жёсткость элемента салеувителя при действии предельной силы, направленной вдоль оси I.

$\frac{1}{K_2} GF$ (т) — жёсткость того же элемента при действии поперечной силы, направленной вдоль оси II.

$\frac{1}{K_3} GF$ (т) — жёсткость того же элемента при действии поперечной силы, направленной вдоль оси III.

$GJ_{кр}$ (тм²) — жёсткость того же элемента при действии крутящего момента, вектор которого направлен вдоль оси I.

EJ_2 (тм²) — жёсткость того же элемента при действии изгибающего момента, вектор которого направлен вдоль оси II.

EJ_3 (тм²) — жёсткость того же элемента при действии изгибающего момента, вектор которого направлен вдоль оси III.

Где

E (т/м²) — модуль упругости,

G (т/м²) — модуль сдвига,

F (м²) — площадь поперечного сечения.

$J_{кр}, J_2, J_3$ (м⁴) — моменты инерции поперечного сечения при кручении и изгибе относительно осей I, II и III.

$\frac{1}{K_2}$ и $\frac{1}{K_3}$ — коэффициенты, выражающие влияние формы сечения на величину деформации сдвига.

Жёсткость стержня плоской системы характеризуется тремя величинами: EJ_2 , EF и $\frac{GF}{K}$.

Все стержни с одинаковыми жесткостями объединяются в одну группу жесткости. Группы жесткостей нумеруются восьмеричными числами, начиная с номера 001. В конструкцию селеуволителя входят элементы двух групп жесткостей: стойки и ригели.

Тип нагрузки обозначается признаком нагрузки P . Для сосредоточенной нагрузки $P=0$, для распределенной $P=1$. Сосредоточенная нагрузка прикладывается только в узлах. При записи информации о нагрузках, сосредоточенная нагрузка относится к одному из стержней, примыкающему к нагруженному узлу. Величина нагрузки записывается десятичными числами, обозначающими проекции нагрузок на оси X , Y и Z . В пространственных системах величина нагрузки записывается шестью числами, в плоских — тремя.

В информации о стержнях приводится список стержней системы с обозначения признаков опирания начала и конца каждого стержня. Последовательность записи стержней произвольна.

В информации о координатах узлов записываются координаты узлов стержневой системы в системе координат X , Y , Z . Узлы перечисляются последовательно по порядку их номеров. Номера узлов записываются восьмеричными кодами, информация вводится в оперативную память машины в последовательно расположенные ячейки, начиная с 0050.

Информация о жесткости и ориентации осей состоит из массива восьмеричных кодов и составляется в точном соответствии с информацией о стержнях. Каждой строке информации о стержнях должна соответствовать вводимая в ту же ячейку строка информации о жесткости и ориентации осей. Если нарушено соответствие между строками информации о стержнях и жесткостях, рассчитывается конструкция с иными жесткостными характеристиками, стержни

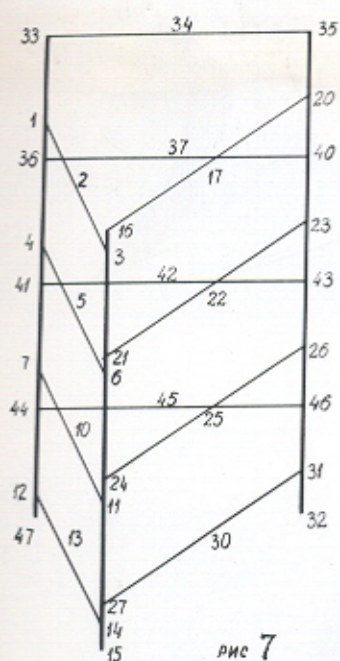


рис 7

-0.27	Мкр	0.25
-0.32	-1.454	0.00
5.78	-8.606	10.25
-6.55		12.66
7.64		8.16
	-6.447	
20.55		22.99
22.67	-11.152	78.36
-21.99		81.77
22.40		86.80
	-13.746	
59.84		105.69
171.44	-6.473	531.39
-48.83		350.26
40.22		263.55
	-31.876	
47.69		415.00
4.00		438.63
-6.53	-31.661	507.03

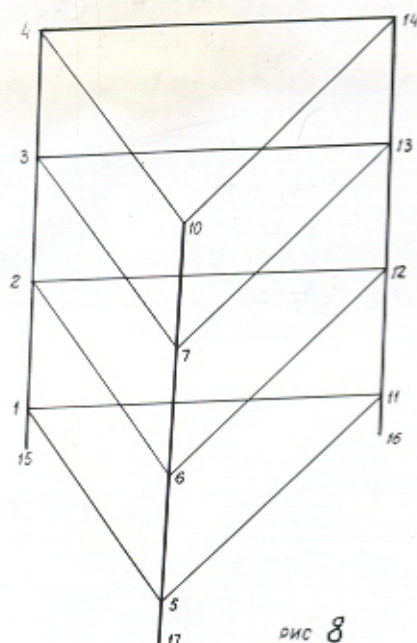


рис 8

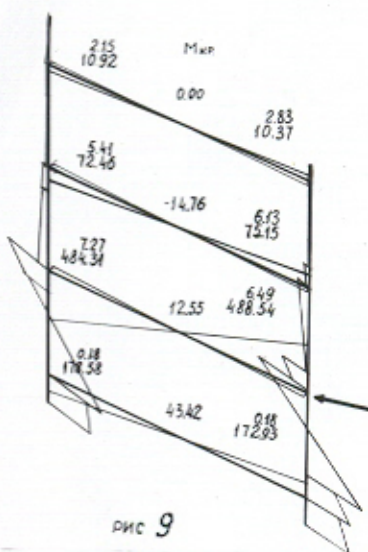


рис 9

2.28	Мкр	11.14
	-0.03	
3.05		14.43
17.66		70.61
	-0.09	
32.40		91.79
43.32		469.24
	0.33	
38.72		482.54
60.02		141.57
25.75	0.23	425.82

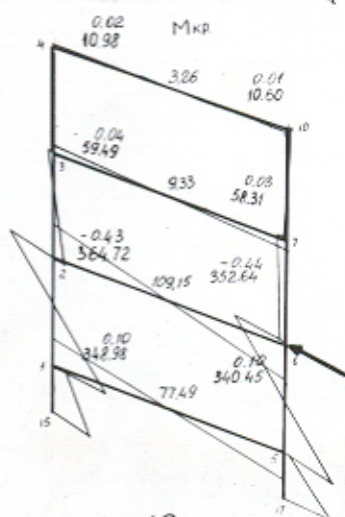


рис 10

5.35	Мкр	-4.73
6.13	-3.479	4.46
15.36		0.17
	-6.325	
8.61		1.07
51.03	-2.163	-32.79
34.05		23.85
106.52		2.97
	-14.290	
19.43		-31.17
306.95	-12.742	-132.21
177.37		222.92
594.19		25.22
	-11.272	
629.11		-62.53
285.14	-9.310	-116.44
481.96		137.04
353.9		-15.01
471.97	-9.614	34.66

15.20	Мкр	0.00
	0.00	
8.60		0.00
100.28		0.00
	1.00	
43.93		0.00
545.58		-0.01
	0.01	
550.76		-0.01
38.56		0.00
470.04	0.01	-0.01

5.04	-1.79
-8.27	
23.44	10.28
-64.31	89.01
-26.53	93.55
27.34	9790
	-1986
72.97	124.23
220.49	628.66
105.63	468.20
100.86	370.71
	-4292
194.72	402.97
173.16	400.45
-110.76	238.69
89.10	132.79
	-48.14
6966	666.05
-1.2	476.32
	-48.12
12.99	549.121

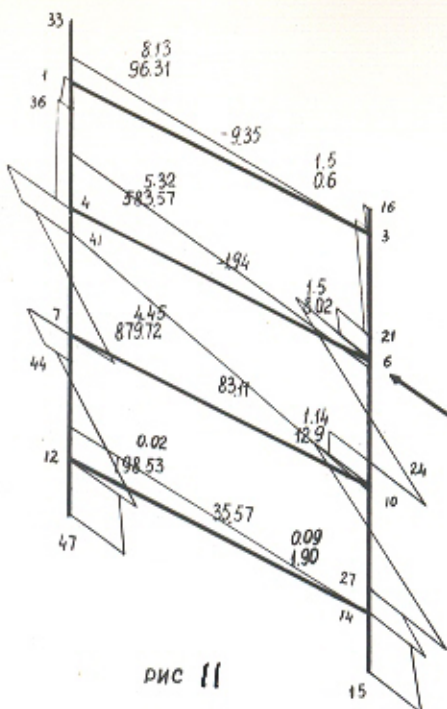


рис 11

21.49	78.22
	0.08
35.87	1177
64.95	541.3
	0.29
79.67	374.48
74.46	366.30
	0.27
54.56	559.44
62.88	178.31
27.13	45968

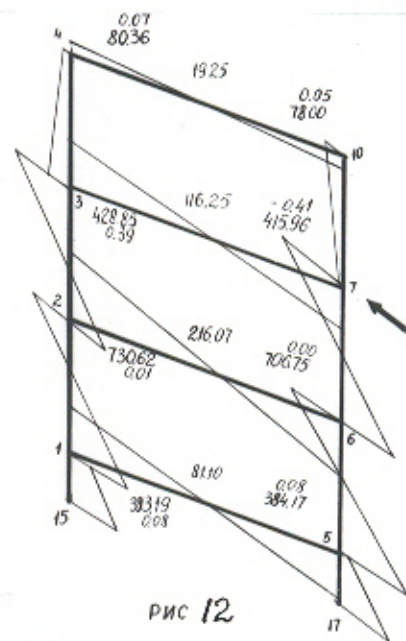


рис 12

0.13	0.07
0.39	0.05
0.20	0.19
-0.07	0.31
0.08	0.27
0.95	0.17
0.95	1.14
-1.88	0.70
1.09	3.14
2.26	2.73
1.39	4.68
-1.94	1.25
6.00	6.90
	976
	16.30
9.08	3.25
-1.74	13.40
	2.35
13.10	7.94
7.84	4.09
4.82	10.18
-3889	18.53
37.11	8.11
-1369	1.79
	43.29
	11.23
-45.53	111.90
126.48	295.68
2.35	51.39
10.78	32.43
-2.08	27.44
-44.65	210.81
95.07	32.01
10.08	136.45
	61.27
	19.70
-16.94	215.26
14.82	153.61
-16.94	19.37
	192.69

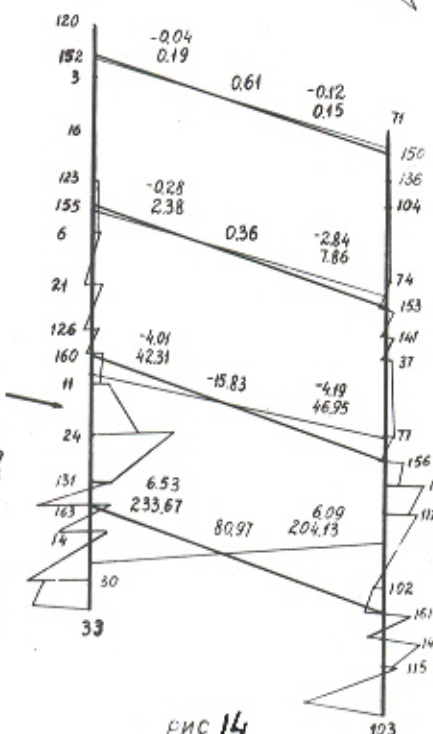
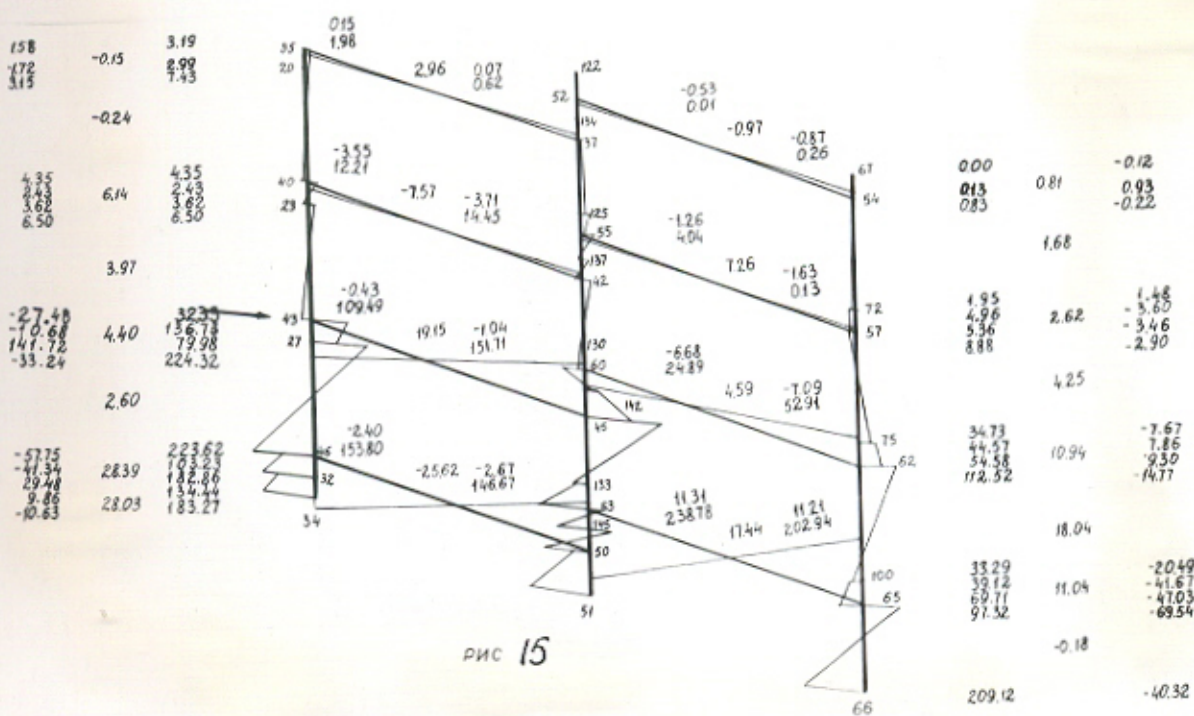
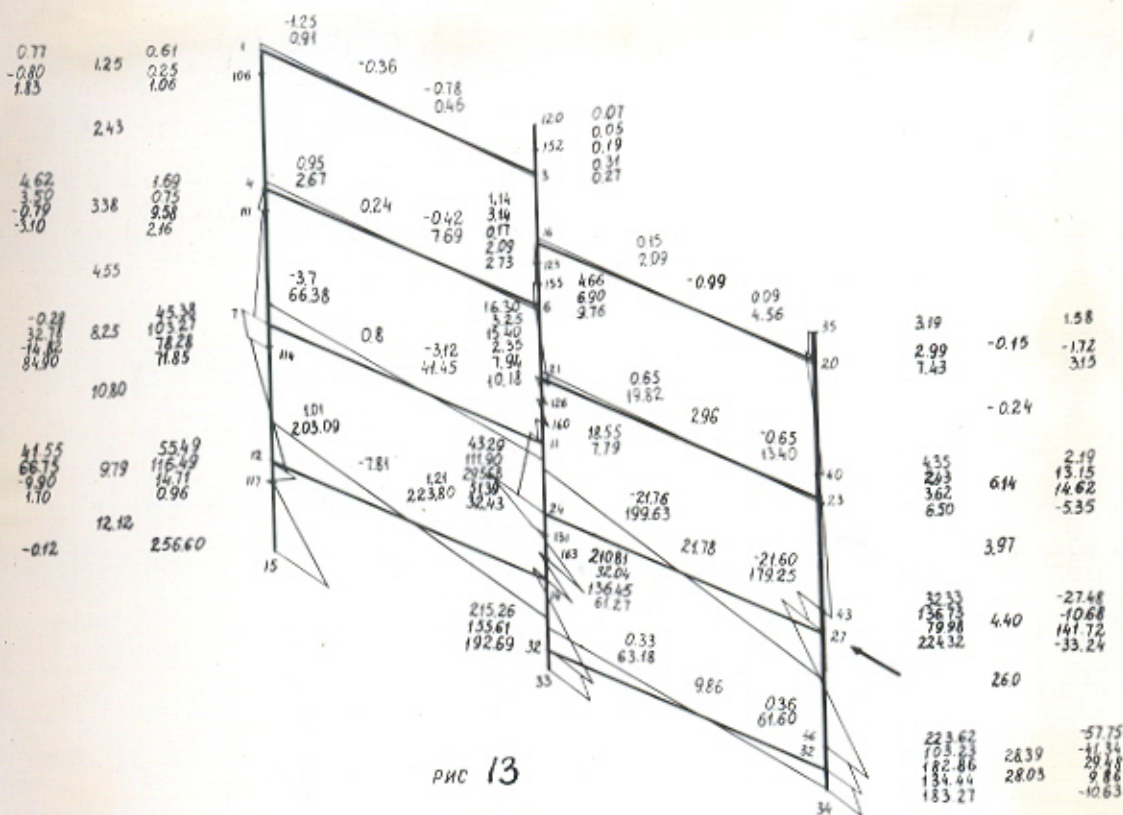


рис 14



которой по-другому ориентированы в пространстве.

Информация о жёсткостях и ориентации осей вводится в оперативную память машины в последовательно расположенные ячейки, начиная с номера 0050. Величины жёсткостей записываются положительными десятичными числами.

Информация о нагрузках состоит из одного или нескольких массивов. В каждом массиве содержится информация не более, чем о пятнадцати загрузках. Номер загрузки, место приложения и признак нагрузки записываются восьмеричным кодом. Сила, действующая в узле системы, условно привязывается к любому из стержней, сходящихся в данном узле. Поэтому при кодировании информации о силе приводятся номера двух узлов, между которых этот стержень расположен. Информация о нагрузках вводится в оперативную память машины в последовательно расположенные ячейки, начиная с 0620.

Вся информация по данной задаче, записанная на специальных бланках, перфорируется в адресно-групповом режиме. Перфолен-та вводится в машину, которая решает задачу по данной программе соответственно введённой информации.

Результатом расчёта является внутренние усилия в концевых поперечных сечениях каждого стержня, с которыми примыкающие узлы действуют на стержень.

При помощи программы MARSS - 103 /58/ были рассчитаны три пространственные конструкции: часть конструкции, имеющая в плане один треугольник (рис.7), такой же фрагмент, подвергшийся упрощению - в нём все узлы сцентрированы (рис.8) и часть экспериментального селеуловителя, имеющая в основании четыре треугольника (рис.3).

Выбор для расчёта вышеперечисленных фрагментов был обусловлен задачами теоретического исследования.

1. Являясь пространственной системой с высокой степенью статической неопределённости, конструкция сложна для точного расчёта, поэтому правомерны попытки уменьшения числа лишних неизвестных. Возникает вопрос, допустимо ли для конструкций данного типа её упрощение путём изменения положения ригелей, центрируя все узлы.

2. Конструкция состоит из ячеек, в основании каждой из которых лежит равносторонний треугольник. Имеет ли каждая элементарная ячейка пространственный характер работы и все те особенности, которые присущи более крупным конструкциям, составленным из этих ячеек.

3. Необходимо было установить общее напряжённо-деформированное состояние пространственной конструкции и по некоторым существенным признакам выделить в ней основные несущие системы.

4. Нагружая пространственные конструкции симметричной и несимметричной нагрузками, надо было провести соответствующий сравнительный анализ, выделить самое невыгодное загрузеие.

При расчёте было принято, что все узлы являются жёсткими при наличии в них всех шести связей, т.к. в реальной конструкции после омоноличивания отдельных стержней узлы обладают достаточной жёсткостью.

Каждая из этих конструкций была посчитана на действие сосредоточенных сил, а последняя ещё и на действие распределённой нагрузки.

Каждый элемент ригеля характеризуется шестью величинами жёсткостей.

Для ригеля

$$EF_1 = 285078,52 \text{ кг}$$

Для стойки

$$EF_2 = 69112,53 \text{ кг}$$

$$\begin{array}{ll}
 \frac{1}{K_{d_1}} G F_1 = 101959,41 \text{ кг} & \frac{1}{K_{d_2}} G F_2 = 25027,342 \text{ кг} \\
 \frac{1}{K_{\beta_1}} G F_1 = 101959,41 \text{ кг} & \frac{1}{K_{\beta_2}} G F_2 = 25027,342 \text{ кг} \\
 G J_{K\beta_1} = 1313,695 \text{ кгм} & G J_{K\beta_2} = 2856,986 \text{ кгм} \\
 E J_{d_1} = 101,864 \text{ кгм} & E J_{d_2} = 83,436 \text{ кгм} \\
 E J_{\beta_1} = 126,327 \text{ кгм} & E J_{\beta_2} = 83,436 \text{ кгм}
 \end{array}$$

Для стойки при подсчёте $G J_{K\beta_2}$ — жёсткости при действии крутящего момента учитывается только момент инерции сердечника.

В основу подсчёта жёсткостных характеристик принималась конструкция, собранная из облегчённых элементов, длина ригеля — 3 м, высота его — 30 см, имеющая шесть стоек и по 4 яруса ригелей.

Упругий расчёт фрагмента селеуловителя как пространственной системы дал возможность установить действительное напряжённое состояние конструкции и роль отдельных усилий: крутящего и изгибающего моментов, продольной и поперечной сил — в её несущей способности.

В приведённых ниже эпюрах, иллюстрирующих данную работу, приняты следующие обозначения:

M_1 — изгибающий момент в плоскости несущей рамы

M_2 — изгибающий момент в из плоскости несущей рамы

Q_1 — поперечная сила в элементах в плоскости несущей рамы

Q_2 — поперечная сила в элементах из плоскости несущей рамы

— продольная сила в элементах конструкции

Значения величин изгибающих и крутящих моментов для каждого из участков стоек приведены в столбцах справа или слева от них напротив концов описываемых участков.

Значения изгибающих моментов в ригелях (в порядке — изгибающие моменты в плоскости несущих рам , затем изгибающие моменты из плоскости этих рам) приведены у их концов, а крутящего момента — в середине каждого ригеля.

Сравнение полученных величин усилий в элементах первой конструкции, имеющей в плане треугольник (рис.7), с величинами усилий в элементах второй конструкции, имеющей упрощенную расчётную схему со всеми сцентрированными узлами, показало, что для одних и тех же элементов при одинаковых нагрузках результаты расчёта имеют значительные расхождения как по величине, так и по знаку. На рис. 9, II дана эпюра изгибающих моментов и значения крутящих моментов для одной из несущих составляющих рам первой конструкции, а на рис. 10, I2 — для такой же несущей рамы второй конструкции. Следовательно, упрощение, связанное с изменением положения узлов по высоте и относительно друг друга и с уменьшением их общего числа, недопустимо и совершенно искажает напряжённое состояние конструкции.

Значения величин изгибающих и крутящих моментов для каждого из участков стоек приведены в столбцах справа или слева от них напротив концов описываемых участков.

Значения изгибающих моментов в ригелях (в порядке — изгибающие моменты в плоскости несущих рам , затем изгибающие моменты из плоскости этих рам) приведены у их концов, а крутящего момента — в середине каждого ригеля.

Сравнение полученных величин усилий в элементах первой конструкции, имеющей в плане треугольник (рис.7), с величинами усилий в элементах второй конструкции, имеющей упрощенную расчётную схему со всеми сцентрированными узлами, показало, что для одних и тех же элементов при одинаковых нагрузках результаты расчёта имеют значительные расхождения как по величине, так и по знаку. На рис. 9, II дана эпюра изгибающих моментов и значения крутящих моментов для одной из несущих составляющих рам первой конструкции, а на рис. 10, I2 — для такой же несущей рамы второй конструкции. Следовательно, упрощение, связанное с изменением положения узлов по высоте и относительно друг друга и с уменьшением их общего числа, недопустимо и совершенно искажает напряжённое состояние конструкции.

Изучение картины напряжённого состояния пространственной рамы, имеющей в плане четыре треугольника, дало возможность отметить некоторую особенность в работе элементов, входящих в раму.

Элементы эти могут быть или ригелями или стойками, причём по положению осей ригелей относительно оси действующего потока, их можно разделить на два типа: ригели с осями, расположенными под углом 30° к оси потока, и ригели с осями, перпендикулярными этой оси.

Вышеупомянутые ригели образуют в конструкции с её стойками соответственно два типа плоских составляющих рам, причём следует отметить, что каждый из элементов, входящий в одну из рам, не входит ни в какую другую.

Степень участия различных рам в основных функциях конструкции селеуловителя различна. Можно принять, что при симметричной нагрузке подавляющую её часть воспринимает на себя рамы, направленные под углом 30° к оси потока, и они названы основными несущими рамами. Ролью же рам, перпендикулярных оси потока, является их селезадерживающая функция, как и у основных рам, и обеспечение пространственности в работе всего сооружения, перераспределение усилий с более нагруженных на менее нагруженные основные несущие рамы и, таким образом, выравнивание усилий во всех элементах. Они участвуют в работе как связи между отдельными несущими конструкциями и названы рамами-связками.

Эпюры основных составляющих рам (рис. 13, 14, 15) обнаруживают в ригелях значительные величины изгибающих моментов, действующих в плоскости рам, продольной и поперечных сил в то время, как крутящие моменты и изгибающие моменты, действующие из плоскости рам весьма невелики.

Для рам-связок в ригелях наблюдаются в целом низкие значения всех усилий, из них наиболее значимыми являются крутящие моменты и продольные силы. (рис. I6).

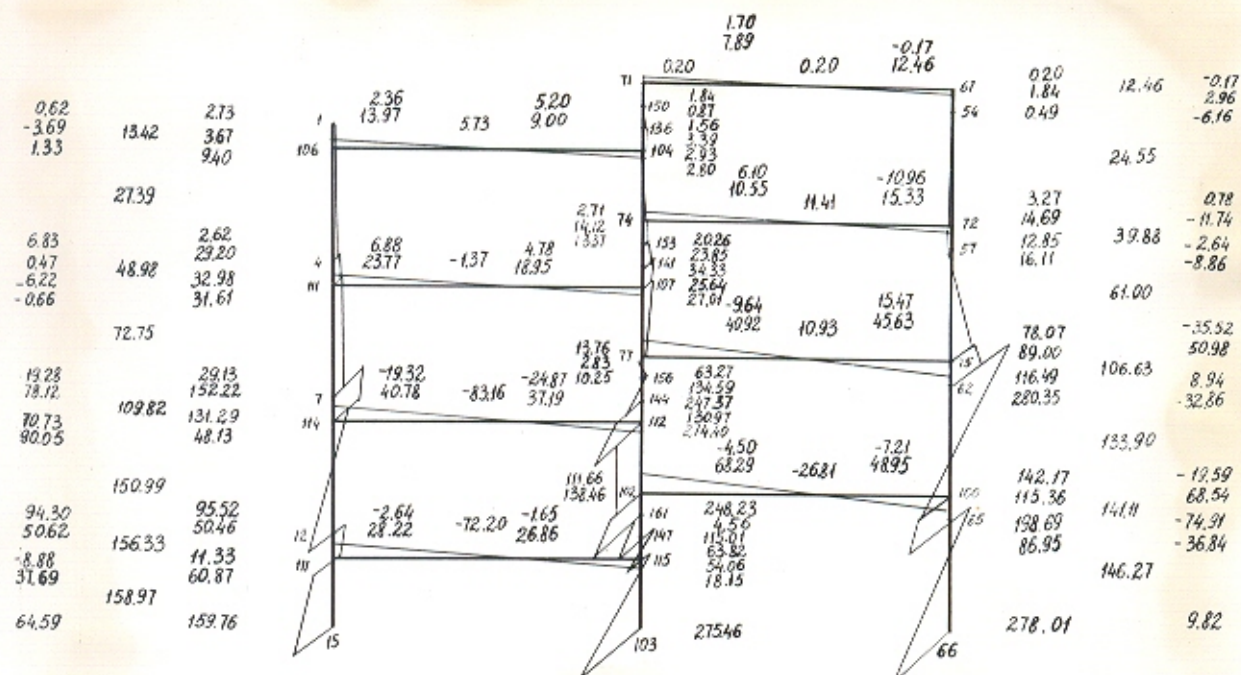
Большие значения изгибающих моментов действуют также в стойках. Поэтому основным расчётным усилием для элементов конструкции будут изгибающие моменты, действующие в сочетании с осевыми силами.

Общая картина напряжённого состояния пространственной рамы, имеющей в плане треугольник, полученная с помощью расчётов, указывает на пространственный эффект в её работе. Уже в этой простейшей элементарной ячейке наблюдаются все те особенности работы, которые были зарегистрированы в более крупной конструкции рамно-решётчатого типа: разделение рабочих функций составляющих рам на основные несущие (рис. 9) и рамы-связки и все другие особенности, которые будут описаны ниже.

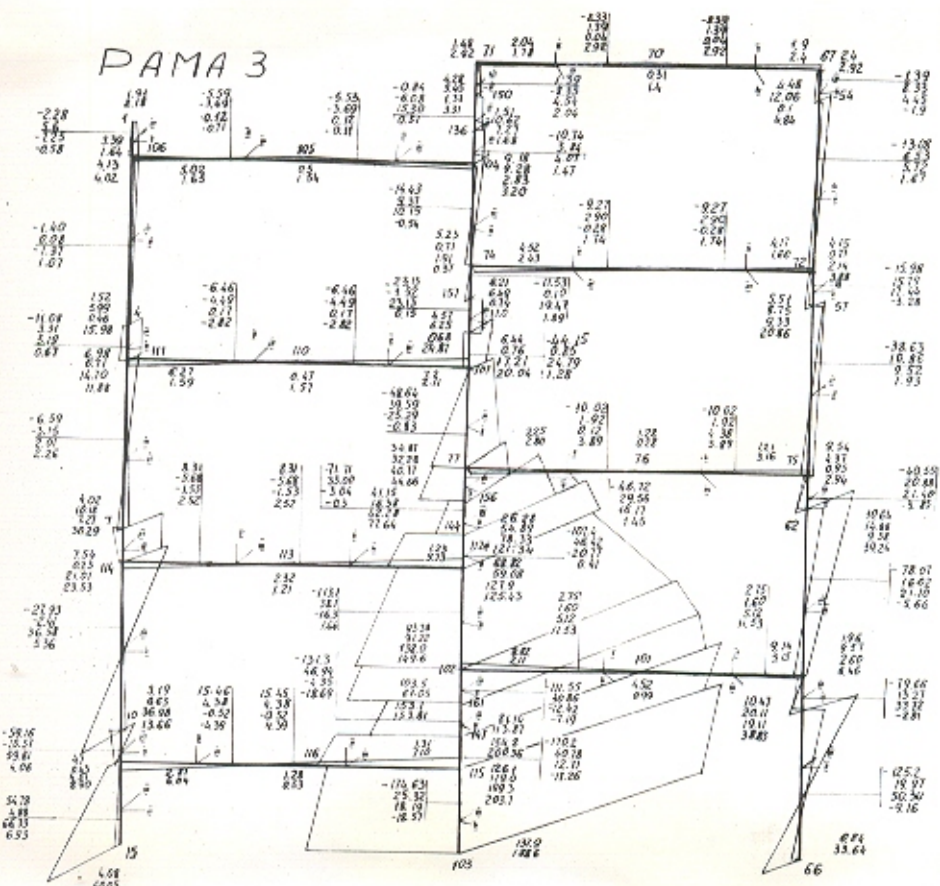
Анализ результатов расчётов первой рассчитываемой пространственной конструкции, имеющей в плане треугольник, и третьей конструкции, имеющей в плане четыре треугольника, дал возможность проследить изменение напряжённого состояния элементов пространственной рамы в зависимости от приложенной нагрузки.

При действии сил в нижней части рамы в элементах этой части развиваются значительные усилия, в то время как выше элементы напряжены незначительно (рис. 9, I3, I4, I5, I6). Из этих расчётов следует и это подтверждается экспериментом, что при действии нагрузки в нижней части сооружения, как это будет происходить в реальных селеуловителях, верхняя часть решётчатой конструкции деформируется незначительно и под нагрузкой перемещается как жёсткое целое.

Это положение в дальнейшем кладётся в основу приближённых методов расчёта.



р.с. 18



р.с. 20

Чем выше поднимается нагрузка, тем более напряжёнными становятся ригели ниже нагружаемого уровня (рис. 9, II). Причём, резко возрастают величины изгибающих моментов в плоскости рам с незначительным увеличением крутящих моментов и изгибающих моментов из плоскости рам.

При действии симметричной нагрузки на сооружение в ригелях, входящих в основные несущие рамы, значительных величин достигают изгибающие моменты, в то время как крутящие моменты составляют лишь один-два процента, а изгибающие моменты из плоскости рам меньше одного процента от изгибающих моментов, действующих в плоскости рам (рис. 13).

Наоборот, для элементов, входящих в рамы, направленные перпендикулярно действию силы, доминирующим усилием является крутящий момент, продольные и поперечные силы, а затем изгибающие моменты в плоскости и из плоскости рамы (рис. 16). И всё-таки усилия в ригелях рам-связок настолько незначительны, что не могут явиться расчётными.

Если при симметричной нагрузке селевой поток действует по всему фронту конструкции или на её центральную часть, то несимметричное загрузку характеризуется действием потока лишь на его части или его прохождением не с фронта, а под каким-то углом к нему. Как было отмечено выше, величина нагрузки на конструкцию прямо пропорциональна площади её поверхности, приходящей в контакт с проходящим селевым потоком. И только прохождение его с фронта конструкции и на всю её ширину обеспечивает наибольшее взаимное соприкосновение и, следовательно, максимальный селезадерживающий эффект. Поэтому перечисленные случаи несимметричного загрузку являются более выгодными для работы конструкции, чем сим-

метричные.

И все же было произведено сравнение результатов на симметричную и несимметричную нагрузки для аналитического подтверждения сделанного вывода.

При действии несимметричной нагрузки на пространственную конструкцию меняется угол расположения всех составляющих рам относительно оси действующих нагрузок и поэтому основные рамы разгружаются от больших величин изгибающих моментов и эту часть воспринимают на себя рамы-связки. Потому величины крутящих моментов и моментов из плоскости рам в ригелях основных рам становятся значительными (рис. I7). В то же время, несмотря на то, что ригели, входящие в рамы-связки, в основном, работают на кручение, при действии несимметричной нагрузки величины изгибающих моментов в плоскости рам могут превышать величины крутящих моментов (рис. I8).

Таким образом, при действии несимметричной нагрузки все составляющие рамы включаются в работу. При этом надо учесть, что рамы-связки имеют большее число пролётов, чем основные несущие, и поэтому являются гораздо жёстче. Чем большую степень несимметричности имеет нагрузка, тем в более выгодном положении находится пространственная конструкция.

Эпюры крутящего и изгибающего моментов и значения продольной и поперечных сил для пространственной системы, имеющей в плане четыре треугольника и нагруженной распределённой нагрузкой, приведены на рис. I9, 20, 21, 22.

PAMA 1

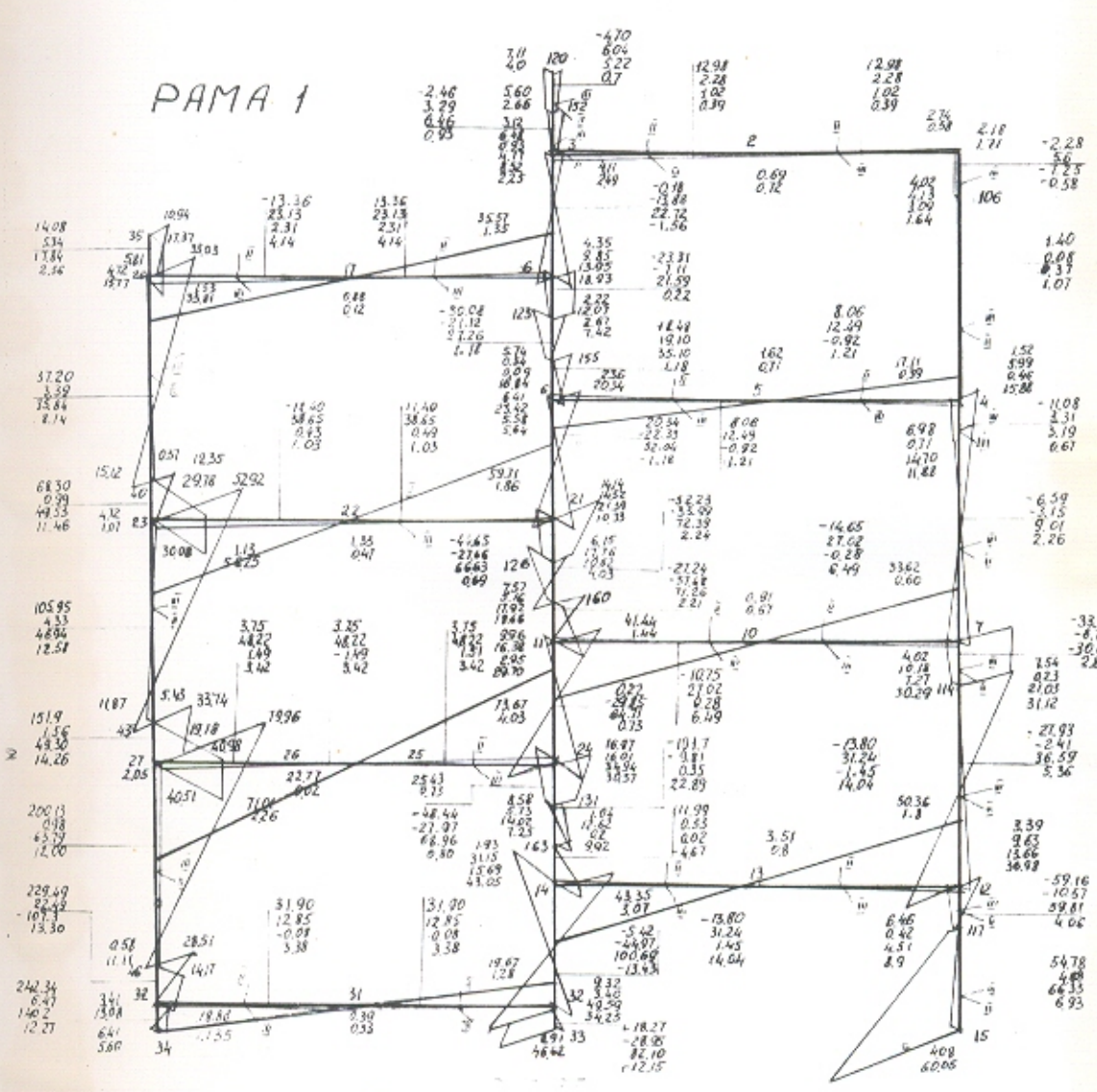
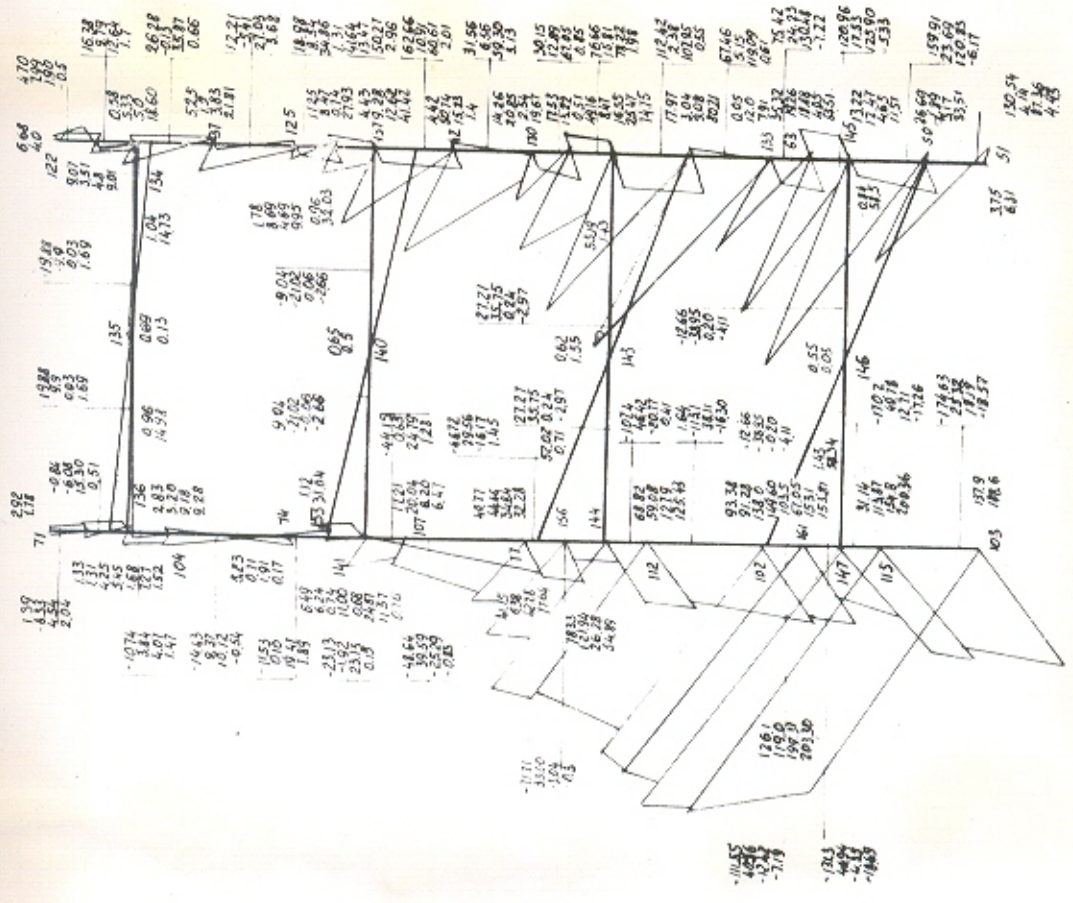
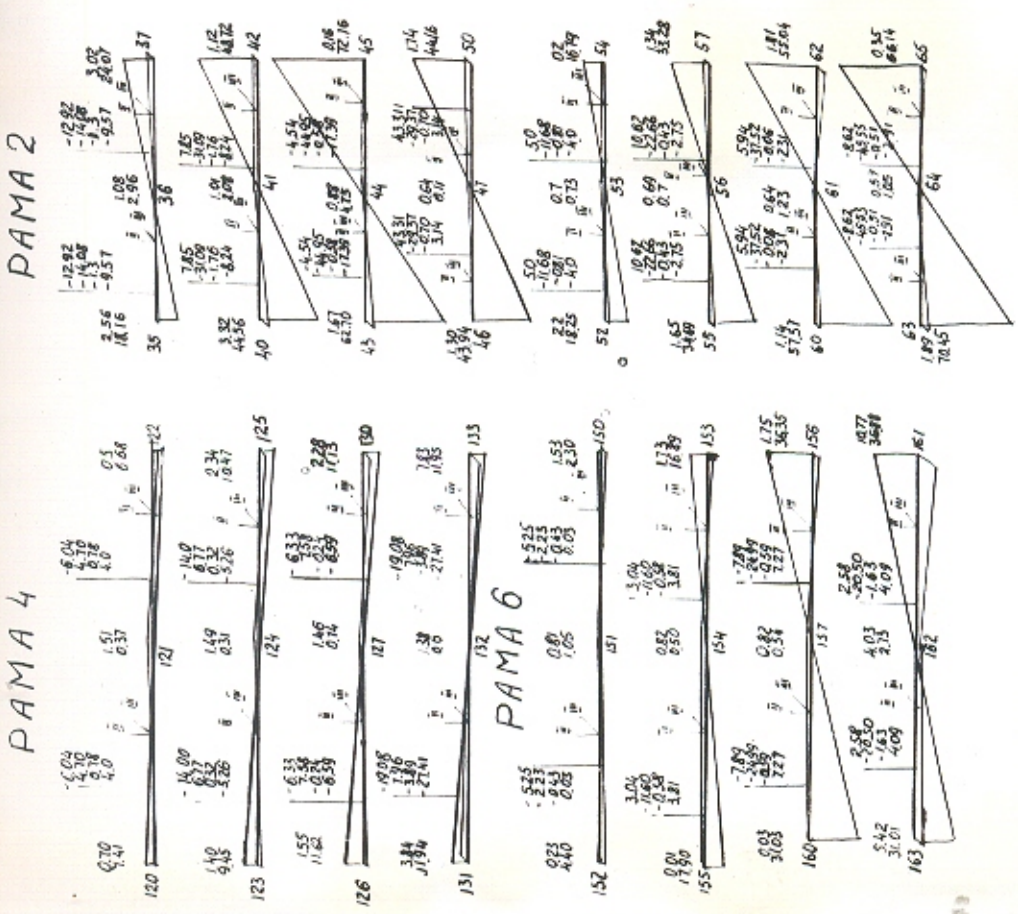


рис. 19



puc. 21



puc. 22

§2. Приближённый метод расчёта рамно-решётчатой пространственной системы.

На основе расчётного анализа вышеприведённых пространственных систем было установлено, что в ней подавляющую часть действующей селевой нагрузки воспринимают основные несущие рамы, направленные под углом 30° к оси потока. Обеспечение прочности этих рам является основным условием обеспечения прочности всей пространственной системы, Ригели же рам, направленных перпендикулярно оси потока, не находятся в столь напряжённом состоянии.

Так как не представляется возможным рекомендовать в практических целях для предварительных расчётов точный расчёт пространственной системы в упругой стадии работы материала из-за его сравнительной трудоёмкости и ограниченных возможностей, необходимо предложить приближённый метод расчёта таких конструкций. Для этого из пространственной системы следует выделить плоскую основную составляющую раму и посчитать её на эквивалентную нагрузку.

Рассмотрим в общем виде вычисление эквивалентной нагрузки, действующей на выделенную из пространственной рамы плоскую, являющуюся основной несущей рамой. Допустим на селеуловитель действует селевой поток интенсивностью q т/м² (рис. 23). Нагрузка, воспринимаемая каждой из рам, зависит от расположения входящих в них элементов по отношению к оси потока.

На каждую из стоек действует равномерно распределённая нагрузка, равная S_p

$$S_p = q \cdot d_p \cdot \sin 60^\circ \quad \text{т/м} \quad (10)$$

где

d_p - расчётная контактная поверхность стойки с селевым потоком /м/

$\sin 60^\circ$ - показывает, что учитывается составляющая селевой нагрузки по направлению рассчитываемой плоской рамы

Селевая нагрузка, действующая на ригели рассчитываемой рамы, раскладывается на две составляющие $q_p = q \cdot h \cdot \sin 30^\circ$ - распределённую нагрузку, действующую перпендикулярно оси и

$q_c = q \cdot l \cdot h \cdot \cos 30^\circ$ - сосредоточенную нагрузку, действующую вдоль оси.

Первой составляющей пренебрегаем, т.к. плоской рамой нагрузка, перпендикулярная её плоскости, не воспринимается.

От ригелей рам-связок рассчитываемая рама воспримет величину опорной реакции R каждого из них, приложенную на соответствующей высоте к стойке.

$$R = \frac{1}{2} \cdot q \cdot l \cdot h \cdot \cos 30^\circ \quad (II)$$

От ригелей других основных несущих рам на рассчитываемую раму на стойки будут передаваться сосредоточенные силы $P_1 + P_2$, соответствующие опорным реакциям от распределённой и сосредоточенной составляющих:

$$P_1 = \frac{1}{2} \cdot q \cdot h \cdot l \cdot \sin 30^\circ \cdot \cos 30^\circ \quad (I2)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \cdot q \cdot h \cdot l \cdot \cos 30^\circ \cdot \sin 30^\circ \quad (I3)$$

Таким образом,

$$P_1 + P_2 = q \cdot h \cdot l \cdot \sin 30^\circ \cdot \cos 30^\circ \quad (I4)$$

$$P_1 + P_2 = \frac{1}{2} \cdot q \cdot h \cdot l \cdot \cos 30^\circ \quad (I5)$$

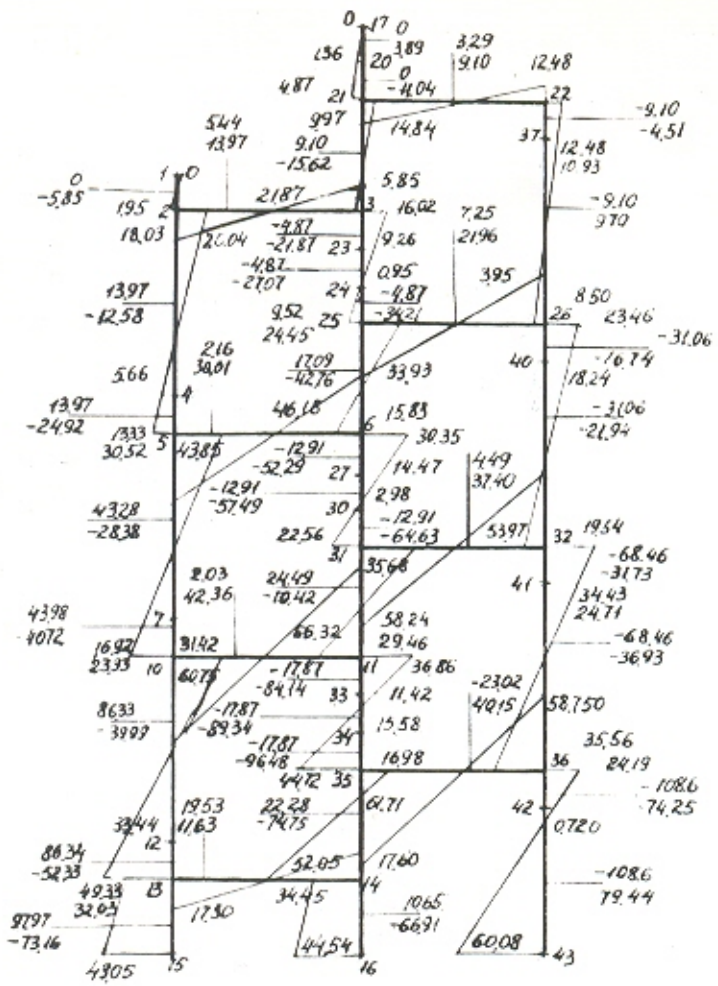


Рис. Эпюра изгибающих моментов и значения продольных и поперечных сил рамы 6. $\frac{EJ_{ст}}{EJ_{рус}} = 3$

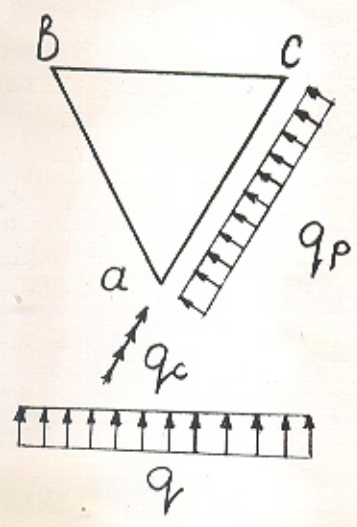


рис. 23

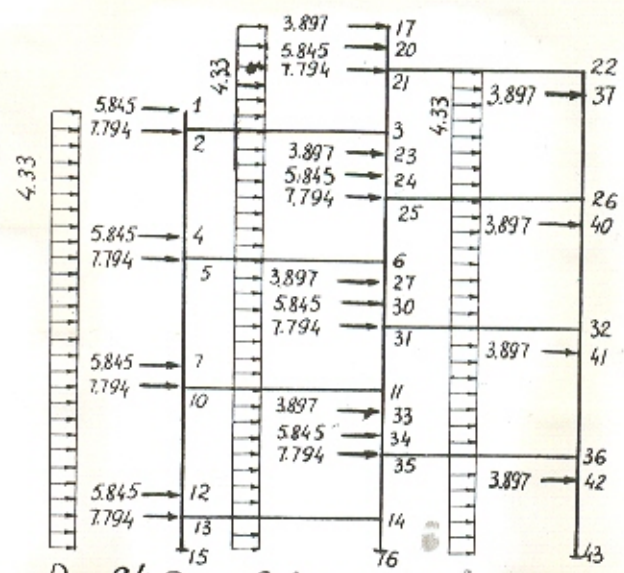


Рис 24 Рама 6 варианта расчетного фрагмента селеуловителя $\frac{EJ_{ст}}{EJ_{рус}} = 3$

Из пространственной системы (рис. 3), нагруженной распределённой нагрузкой $q = 10 \text{ т/м}^2$ была выделена основная несущая рама (рис. 23), к которой была приложена эквивалентная нагрузка. Обе рамы, пространственная и плоская, были посчитаны. Эпюра изгибающих моментов и значения продольных и поперечных сил в этой плоской раме приведена на рис. 25. Эпюра аналогичной рамы из пространственного фрагмента, построенная по данным, взятым из точного расчёта, показана на рис. 19.

Сравнение эпюр для плоских и пространственных рам показывает насколько точно плоские рамы, выделенные из пространственной системы отражают действительную работу последней. На основании результатов расчёта можно сделать следующие выводы.

1. Характер распределения усилий, а также расчётные величины в пространственной и плоской рамах близки. То-есть, для практических целей достаточно определение усилий производить по выделенным несущим плоским рамам.

2. Пространственные расчёты подтвердили, что в сооружении селеуловителя основными несущими конструкциями являются вертикальные плоские рамы, образованные стойками и ригелями. Поэтому при возведении сооружений особое внимание следует уделить тщательности омоноличения конструкции в целях создания жёстких узлов.

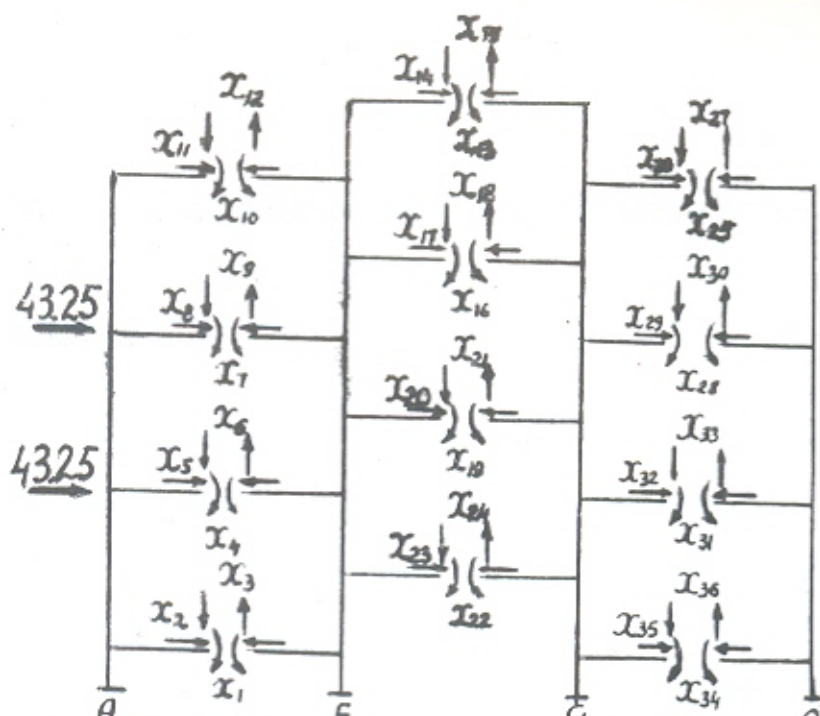


Рис 26 Основная система

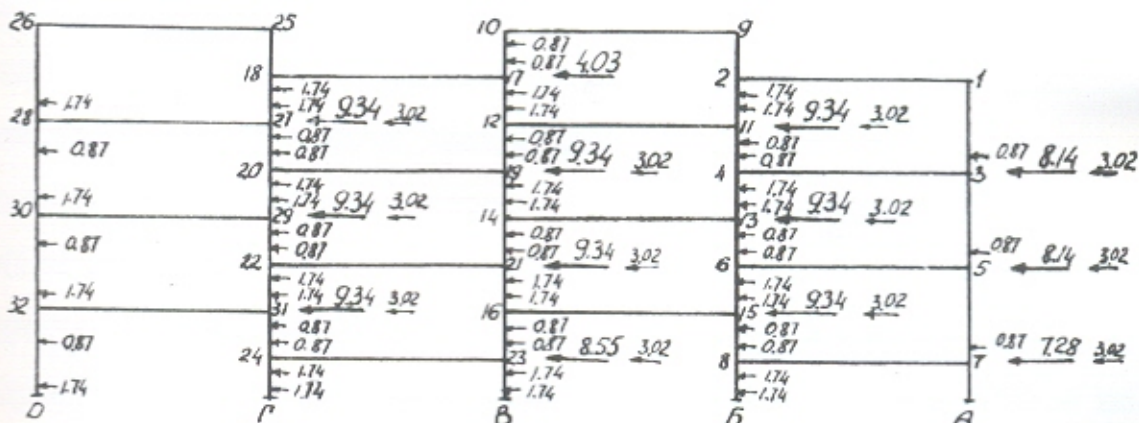


Рис 27 Схема нагрузки на раму.

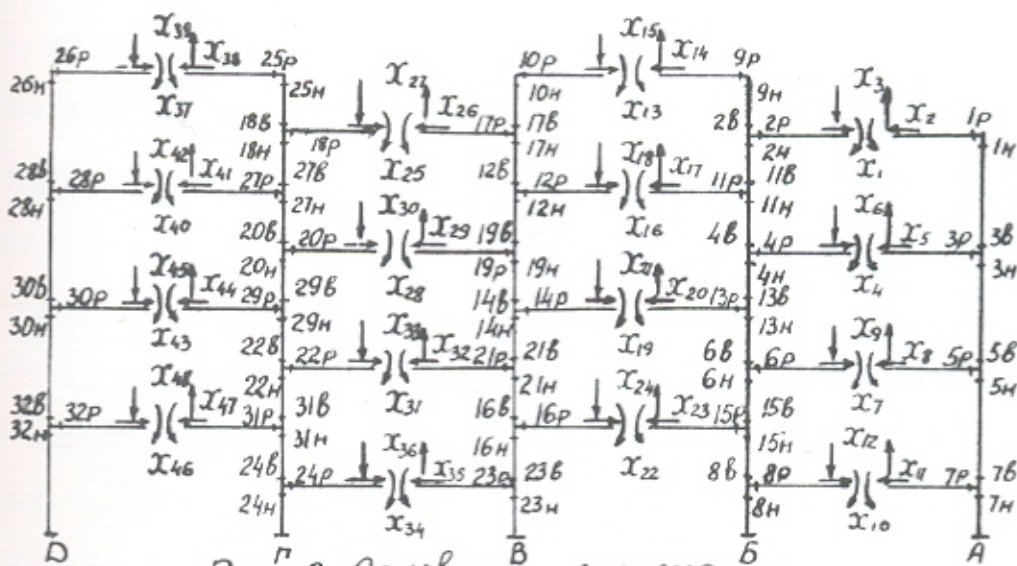


Рис 6 Основная система

§3. Исследование различных пространственных конструкций селеуловителя при помощи первого приближённого метода расчёта.

Как показано выше, сущность работы конструкции селеуловителя хорошо описывают составляющие её плоские вертикальные многоярусные рамы. И для исследования и сравнения вариантов различных типов и размеров конструкций селеуловителя достаточно решать не громоздкую и трудно поддающуюся расчёту пространственную систему, а выделенные из неё плоские составляющие рамы.

Поскольку при принятой схеме работы конструкции — вертикальные рамы — каждый горизонтальный элемент селеуловителя только один раз участвует в работе какой-либо рамы, то суммирование усилий в элементах при расчёте нескольких рам не произойдёт. В такой расчёт нельзя включить рамы, составленные из элементов, расположенных перпендикулярно оси потока. Однако, эти элементы составляют обычно малонапряжённую по сравнению с остальными часть конструкции, и потому их специально можно не рассчитывать и брать по подобию остальных элементов. Детально роль этих элементов, их напряжённое состояние выявилось выше при анализе результатов пространственного расчёта конструкции.

Расчёты некоторых рам (рис. 26) проводились методом сил с составлением канонической системы уравнений, которая решалась на ЭЦМ БЭСМ - 2.

Рама, изображённая на рисунках 6, 27, рассчитывалась методом сил с помощью формулы, выраженной через матрицы, предложенной Дж. Аргиром /52/.

Нижеперечисленные плоские рамы были рассчитаны с помощью программы MAPCC-103, описанной выше.

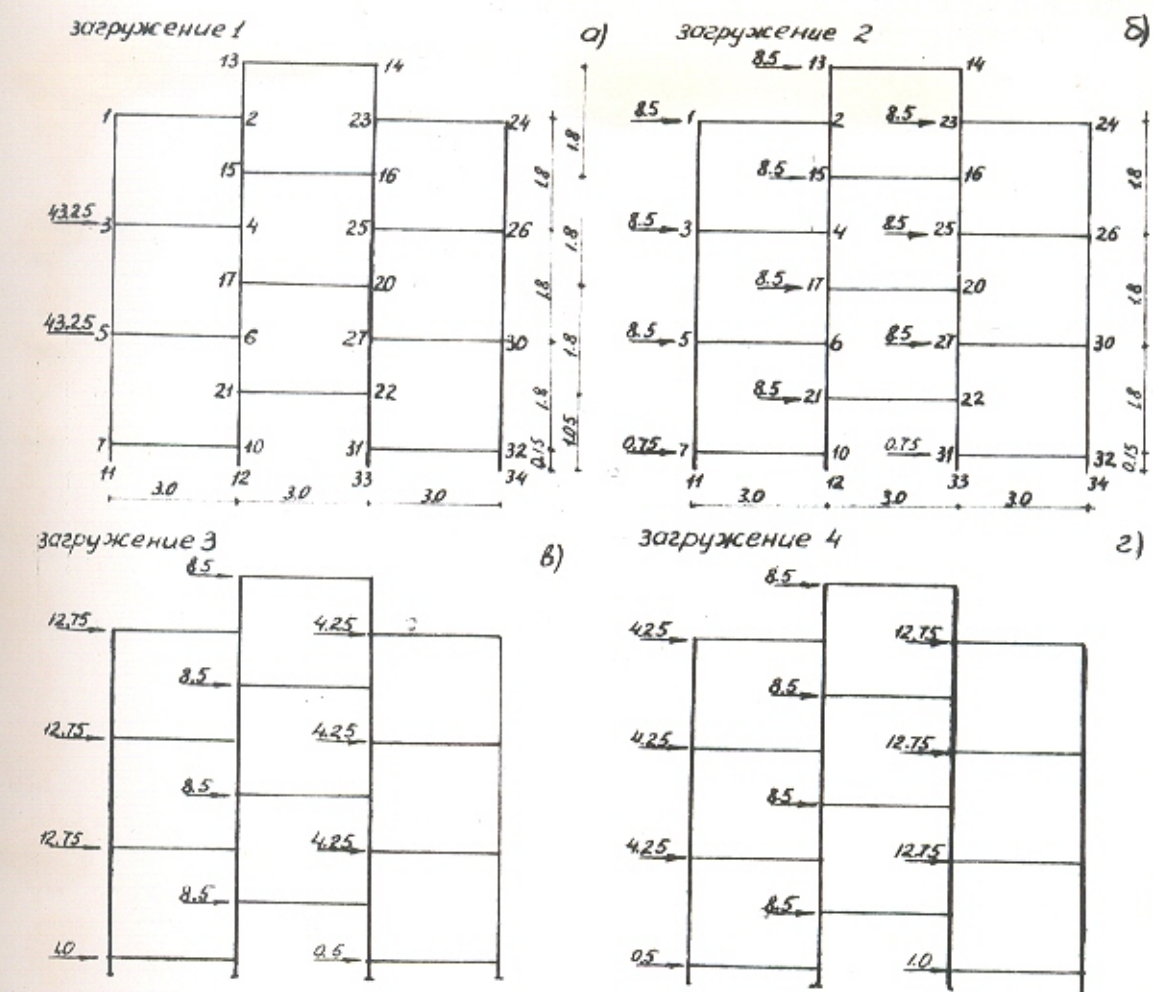


Рис. 28. Рама 1 варианта экспериментального фрагмента селеуловителя
 Соотношения жесткостей стоек и ригелей $\frac{EJ_{ст}}{EJ_{риг}} = 0,5; 1; 3; 5$.

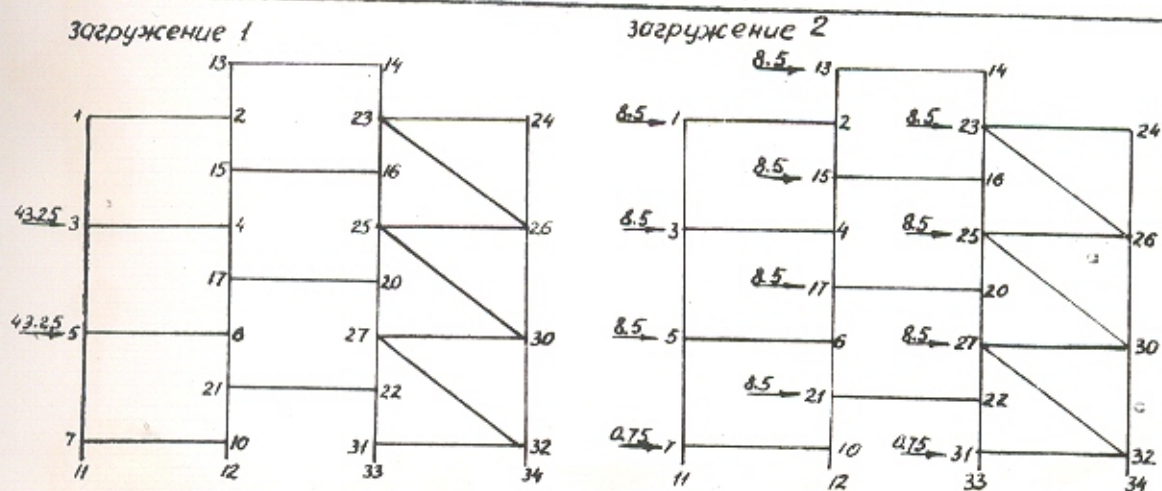


Рис. 35. Рама 10 варианта экспериментального фрагмента селеуловителя
 Соотношения жесткостей стоек и ригелей $\frac{EJ_{ст}}{EJ_{риг}} = 3$

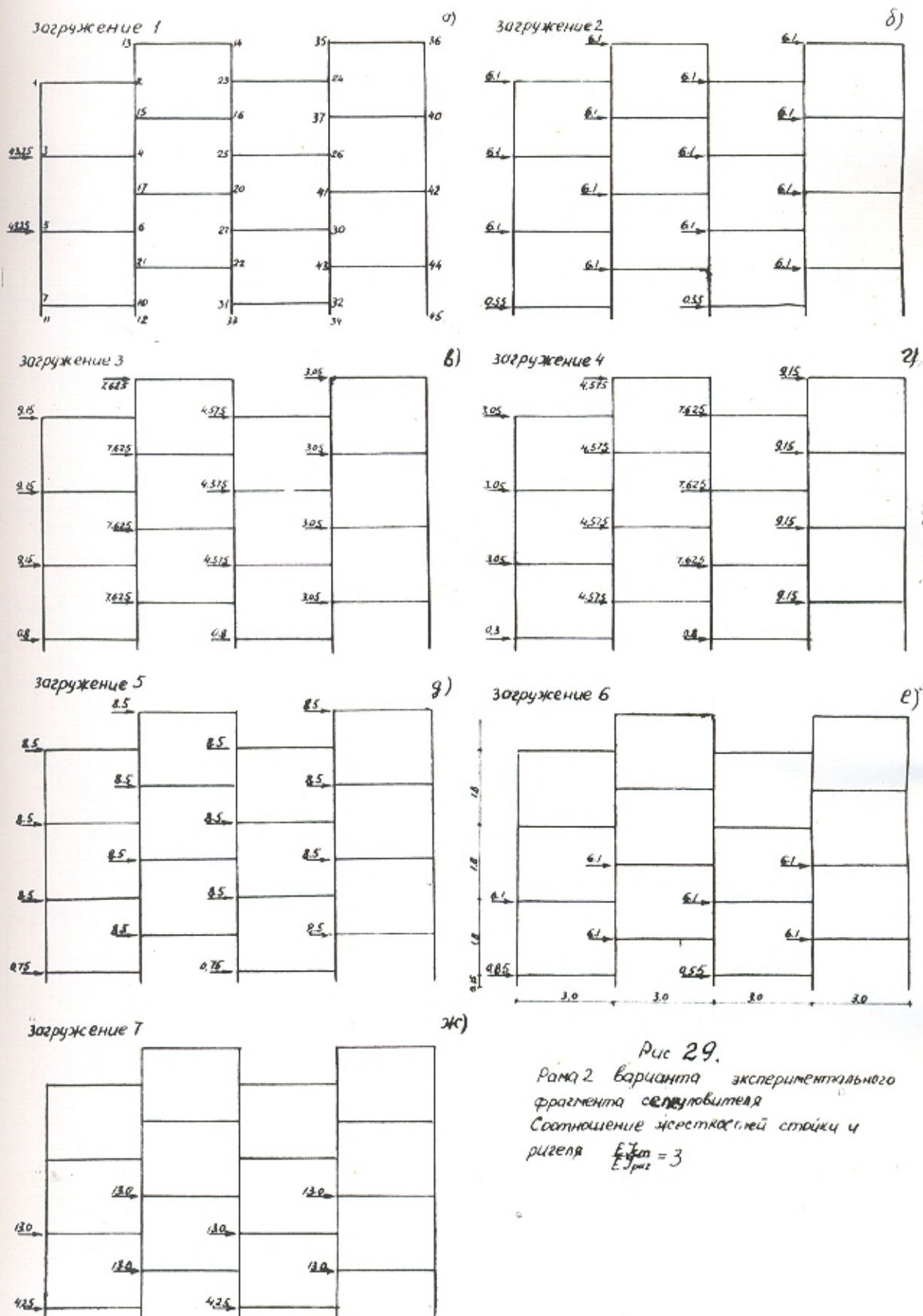
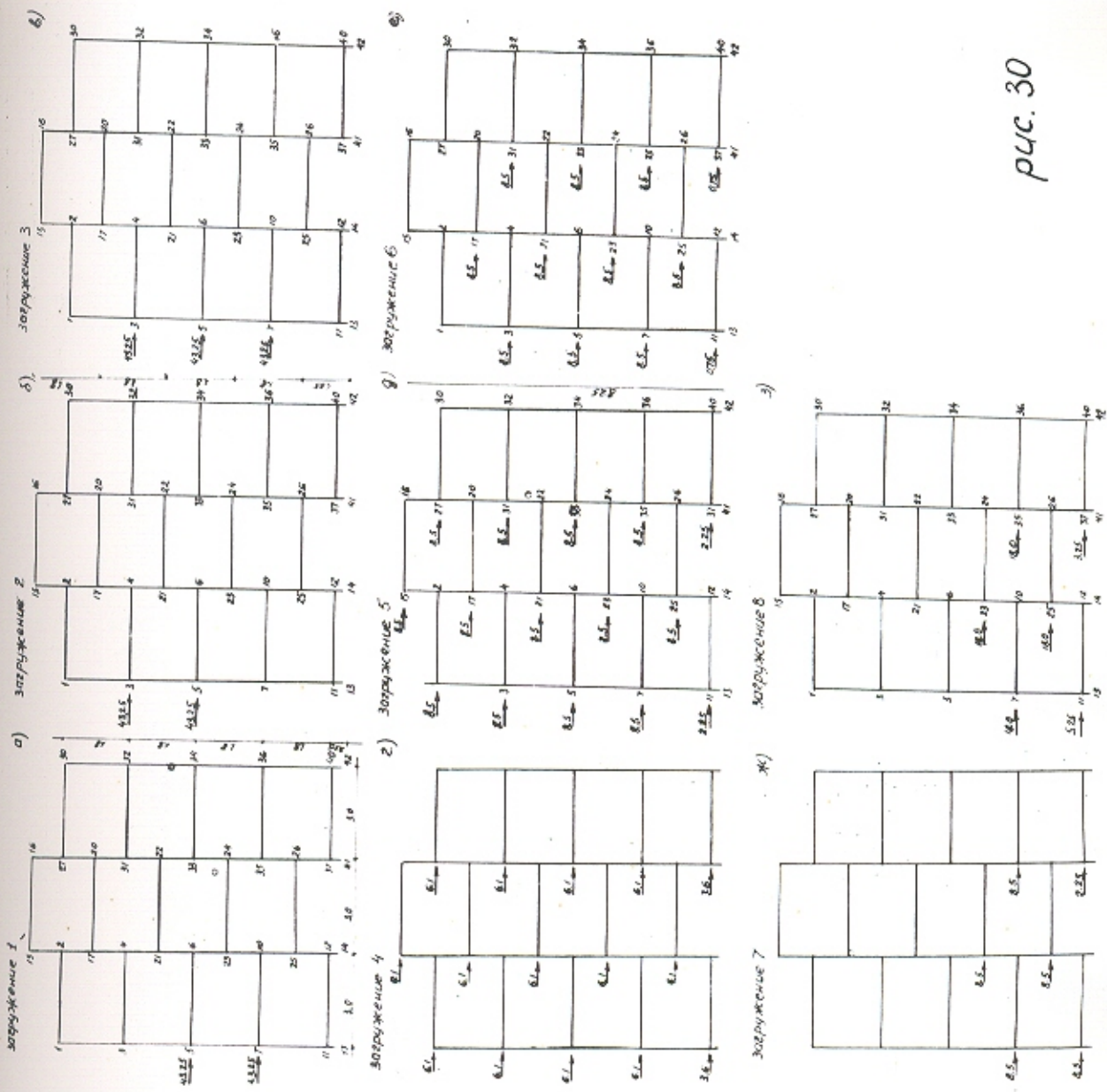


Рис 29.

Рама 2 варианта экспериментального
фрагмента сепаратора
Соотношение жесткостей стоек и
ригеля $\frac{EJ_{ст}}{EJ_{риг}} = 3$



р.с. 30

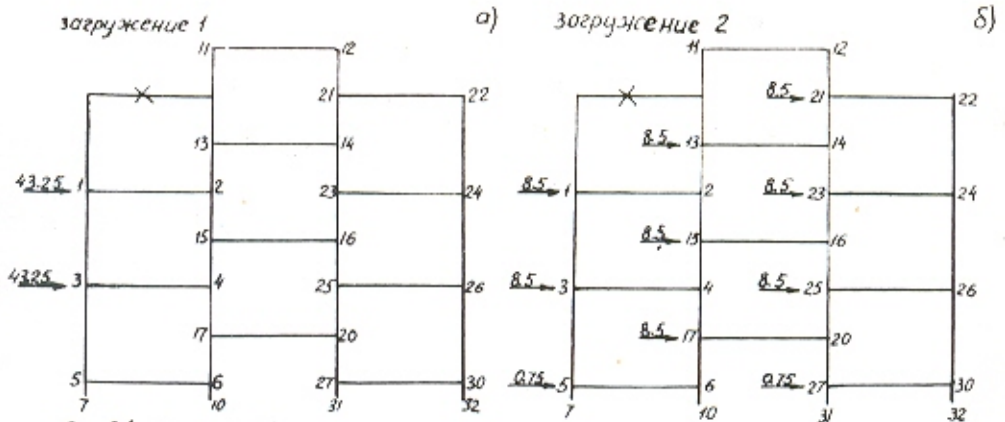


Рис 31. Рама 4 варианта экспериментального фрагмента селеуловителя
Соотношения жесткостей стоек и ригелей $\frac{EJ_{ст}}{EJ_{риг}} = 3$

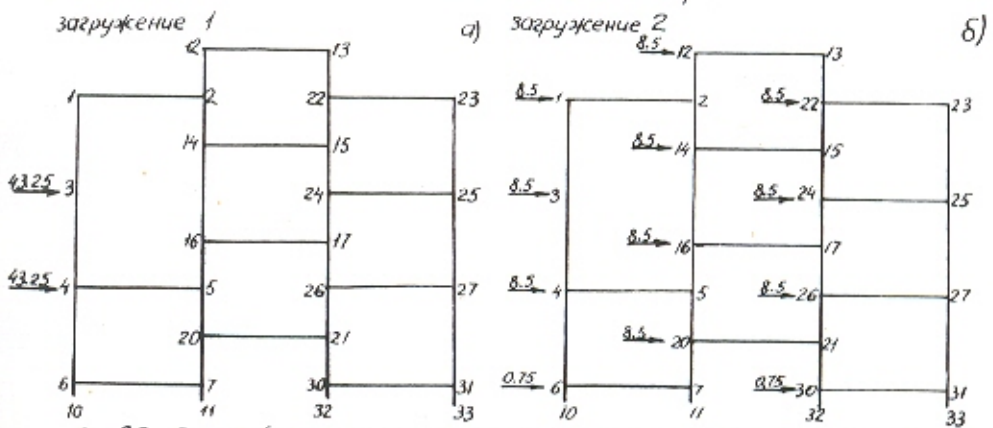


Рис 32. Рама 5 варианта экспериментального фрагмента селеуловителя
Соотношения жесткостей стоек и ригелей $\frac{EJ_{ст}}{EJ_{риг}} = 3$

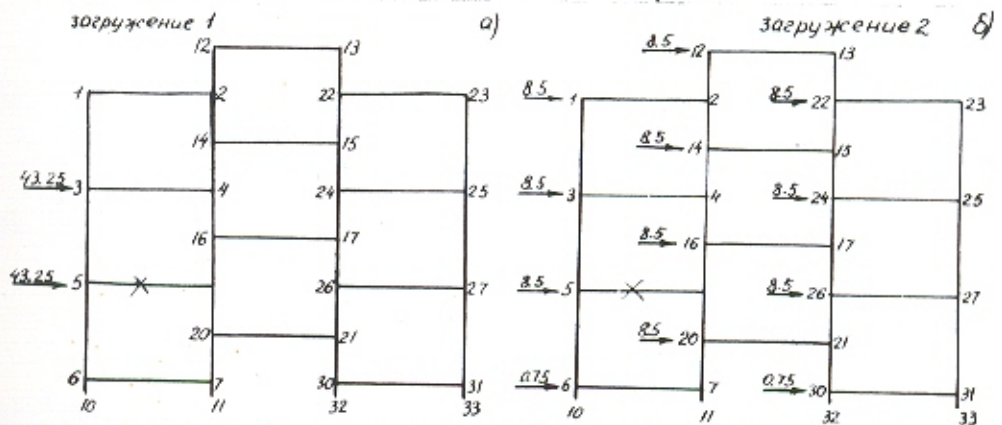


Рис 33. Рама 7 варианта экспериментального фрагмента селеуловителя
Соотношения жесткостей стоек и ригелей $\frac{EJ_{ст}}{EJ_{риг}} = 3$

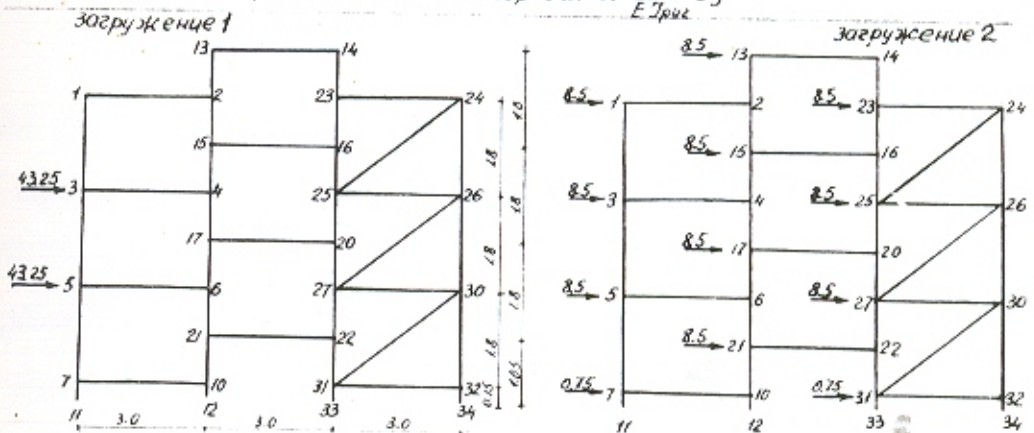


Рис 34. Рама 9 варианта экспериментального фрагмента селеуловителя
Соотношения жесткостей стоек и ригелей $\frac{EJ_{ст}}{EJ_{риг}} = 3$

Выполнены следующие расчёты:

- 1) РАМА I - расчёт рамы (рис.28) на четыре различных загрузки, число пролётов - 3, соотношения жесткостей

$$\frac{E J_{ст}}{E J_{риг}} = 0,5; 1; 3; 5;$$
- 2) РАМА 2 - расчёт рамы (рис.29) с числом пролётов - 4, на семь различных загрузок, соотношения жесткостей равно трём.
- 3) РАМА 3 - расчёт рамы (рис.30) с числом ярусов - 5, на восемь различных загрузок, соотношение жесткости равно 3.
- 4) РАМА 4 - расчёт рамы (рис.31) со сломанным верхним ригелем на два загрузения, соотношение жесткостей - 3.
- 5) РАМА 5 - расчёт рамы (рис.32) со сломанным средним ригелем на два загрузения, соотношение жесткостей - 3.
- 6) РАМА 7 - расчёт рамы (рис.33) со сломанным нижним ригелем на два загрузения, соотношение жесткостей - 3.
- 7) РАМА 9 - расчёт рамы (рис.34) с восходящими раскосами в последнем пролёте на 2 загрузения, соотношение жесткостей - 3.
- 8) РАМА 10 - расчёт рамы (рис.35) с нисходящими раскосами в последнем пролёте на два загрузения, соотношение жесткостей - 3.
- 9) РАМА 6 - расчёт рамы (рис.24) на плоскую нагрузку.

Все эти расчёты проводились на ЭЦМ Минск-22. По полученным усилиям были построены эпюры изгибающих моментов и нанесены величины продольных и поперечных сил. Рассмотрим рамы $I_{0,5}; I_1; I_3; I_5$. Здесь заглавная цифра показывает номер рамы, индекс - вели-

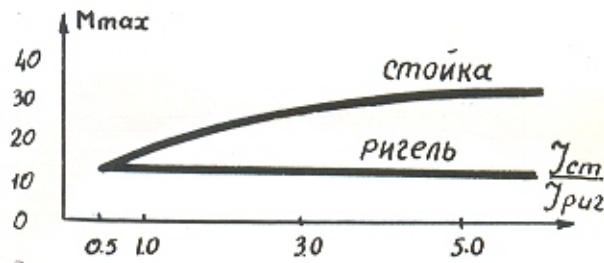


Рис.36. График зависимостей максимальных моментов в стойках и ригелях от отношения их жесткостей.

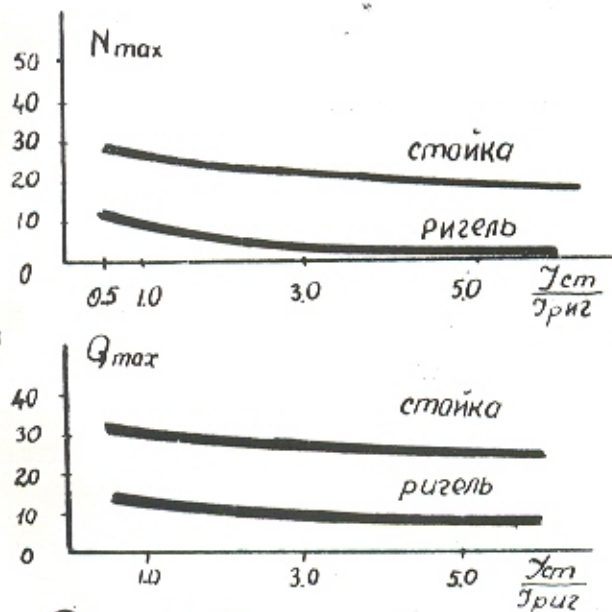


Рис.37. Графики зависимостей максимальных величин продольных и поперечных сил в стойках и ригелях от отношения их жесткостей

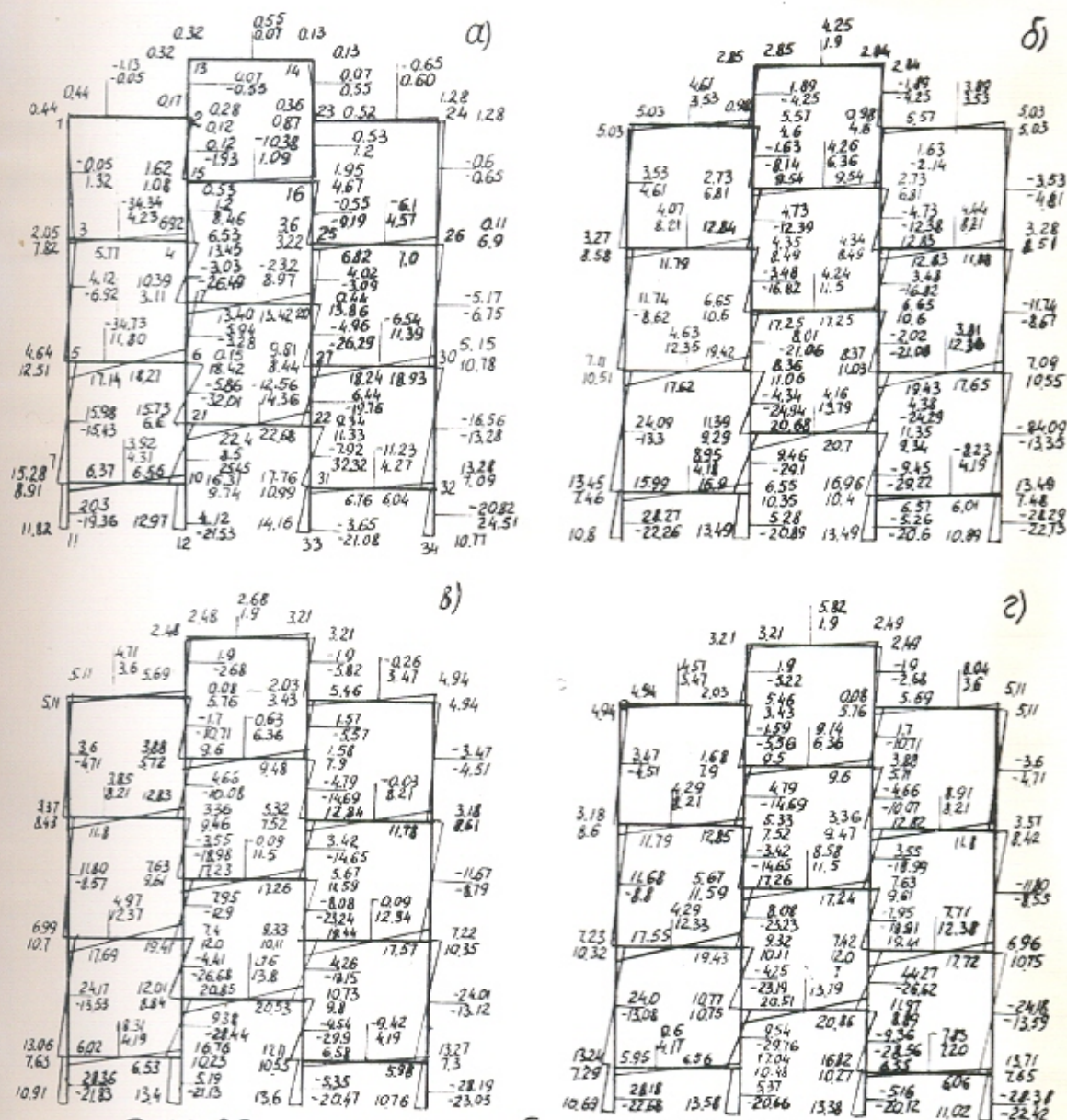


Рис 38. эпюра изгибающих моментов и значения продольных и поперечных сил для рамы 1. $\frac{EJ_{ст}}{EJ_{пер}} = 0.5$

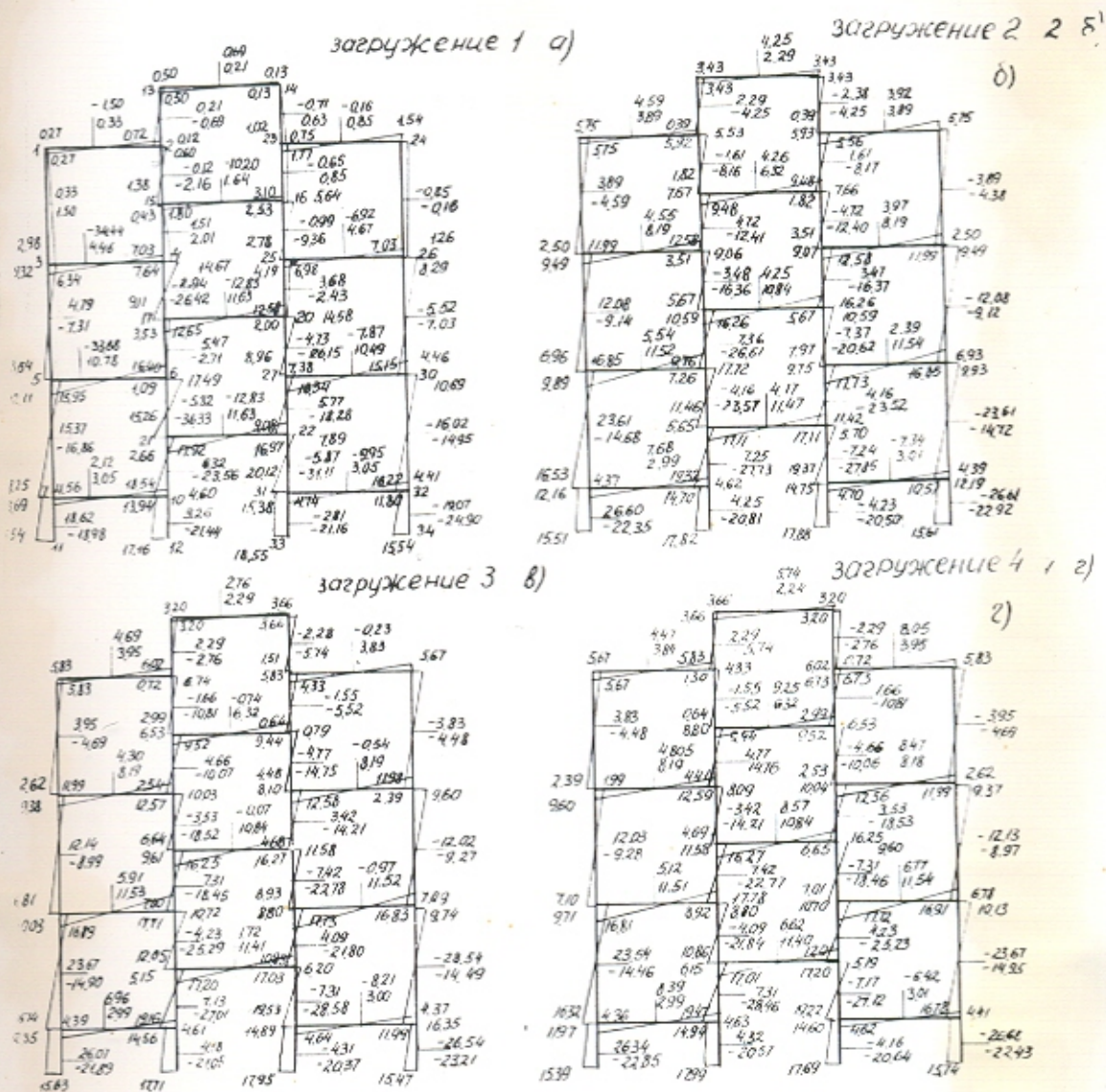


Рис. 39. Эпюры изгибающих моментов и значения продольных и поперечных сил для рамы 1 $\frac{EJ_{ст}}{EJ_{пр}} = 1$

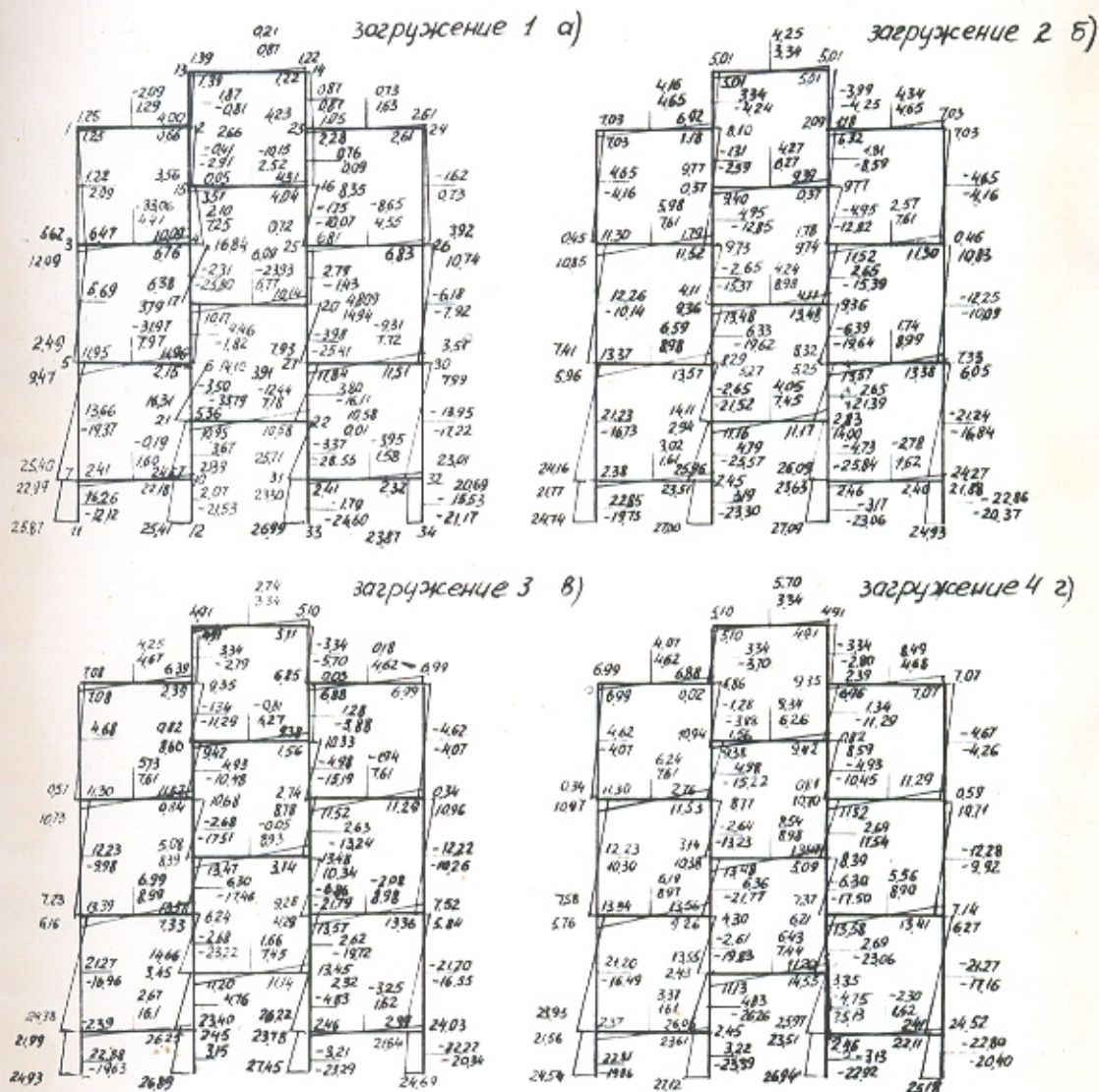


Рис 40. Эпюра изгибающих моментов и значения продольных и поперечных сил для рамы 1 $\frac{EJ_{ст}}{EJ_{пр}} = 3$

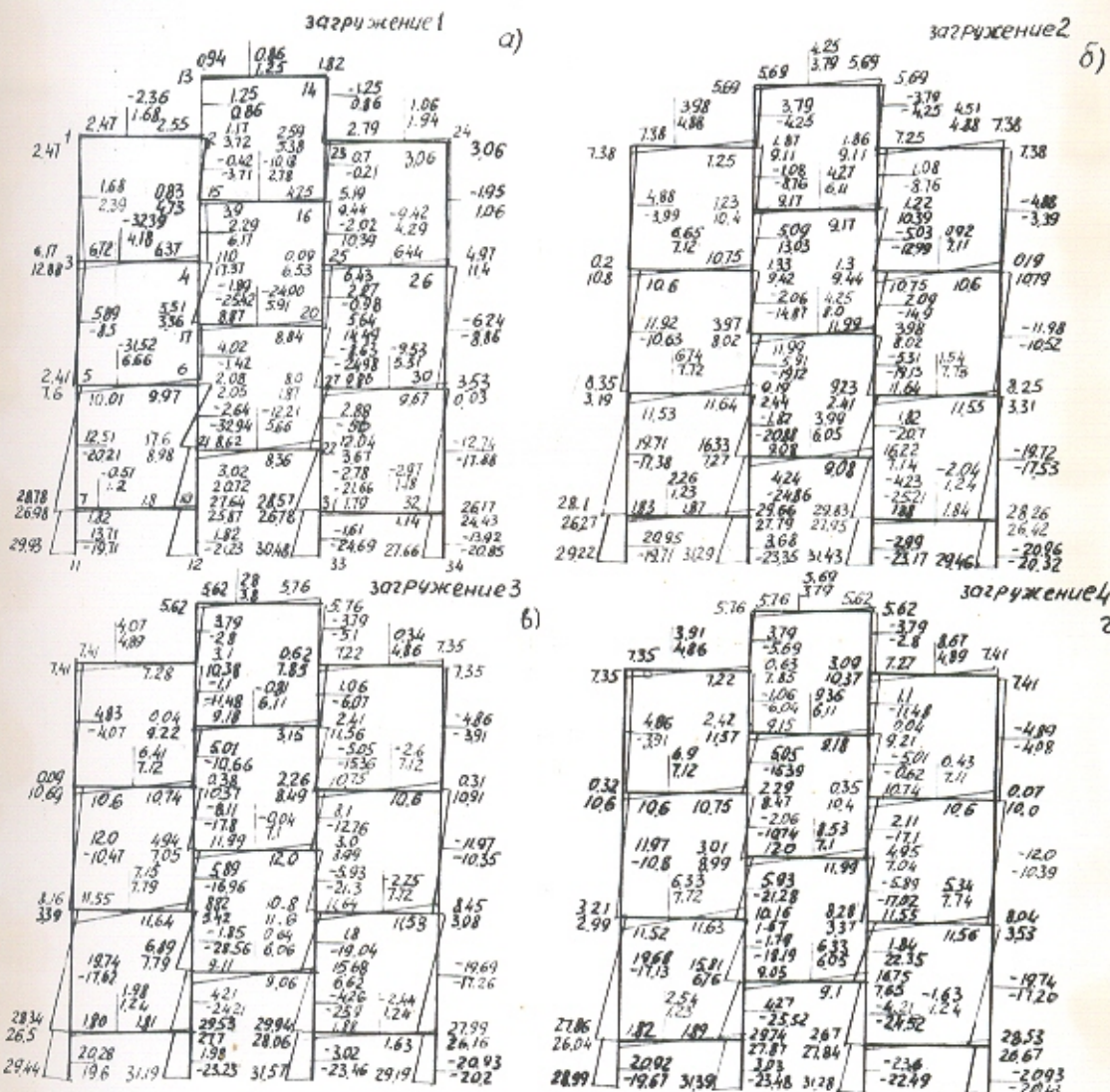


Рис 41. Эпюры изгибающих моментов и значения продольных и поперечных сил для рамы 1
 $EJ_{ст} = 5$
 $EJ_{пл} = 5$

чину соотношения жесткостей стоек и ригелей. Из сравнения построенных для всех рам эпюр видно следующее:

1. С увеличением соотношения между жесткостями стоек и жесткостями ригелей, расчётные моменты в ригелях уменьшаются незначительно, а в стойках увеличиваются значительно. На графике (рис.

36) приведены зависимости максимальных изгибающих моментов в ригелях и стойках от соотношения $\frac{EJ_{cm}}{EJ_{pч2}} \cdot \frac{J_{ст}}{J_{pч2}}$.

На графиках (рис. 37) приведены зависимости максимальных величин поперечных и продольных сил от соотношения $\frac{EJ_{cm}}{EJ_{pч2}}$.

Сравнивая эти три графика, можно сделать следующий вывод: с уменьшением соотношения $\frac{J_{ст}}{J_{pч2}}$ расчётные изгибающие моменты в стойках, которые существенно определяют армирование сечения и соответственно расход металла на конструкцию, уменьшаются значительно. При этом происходит некоторое увеличение усилий (изгибающих моментов, продольных и поперечных сил в ригелях и продольных и поперечных сил в стойках). Этот эффект объясняется тем, что с относительным уменьшением жесткости стоек конструкция лучше перераспределяет усилия, вовлекая в работу и загружая более равномерно все её составные части (рис. 38, 39, 40, 41).

Оптимальные соотношения $\frac{EJ_{ст}}{EJ_{pч2}}$ находятся в пределах от 0,5 до 2,0.

2. При приложении больших сосредоточенных нагрузок и возникновении значительных местных усилий наблюдается быстрое их сглаживание и перераспределение по всем несущим элементам. Конструкция работает рационально (рис. 38, 39, 40, 41, 44).

3. Если нагрузка приложена в нижней части конструкции, то увеличение её высоты незначительно влияет на изменение распределения усилий в нижней части при той же величине нагрузки. При этом в нижней части конструкции возникают расчётные усилия, а в

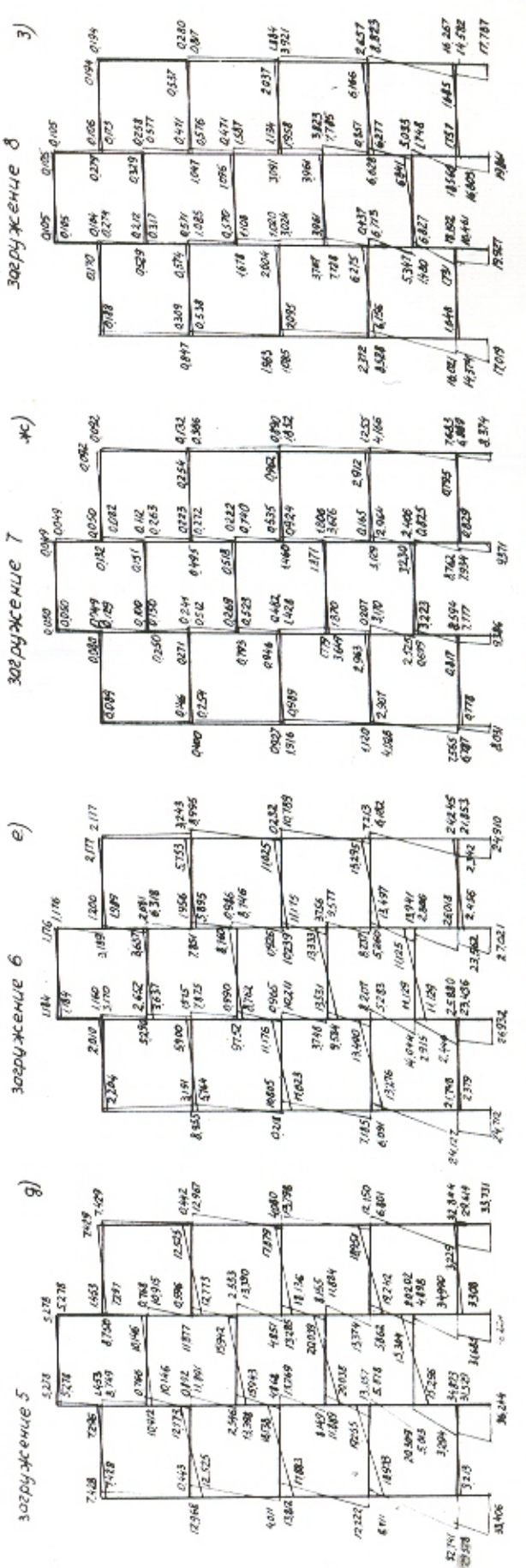
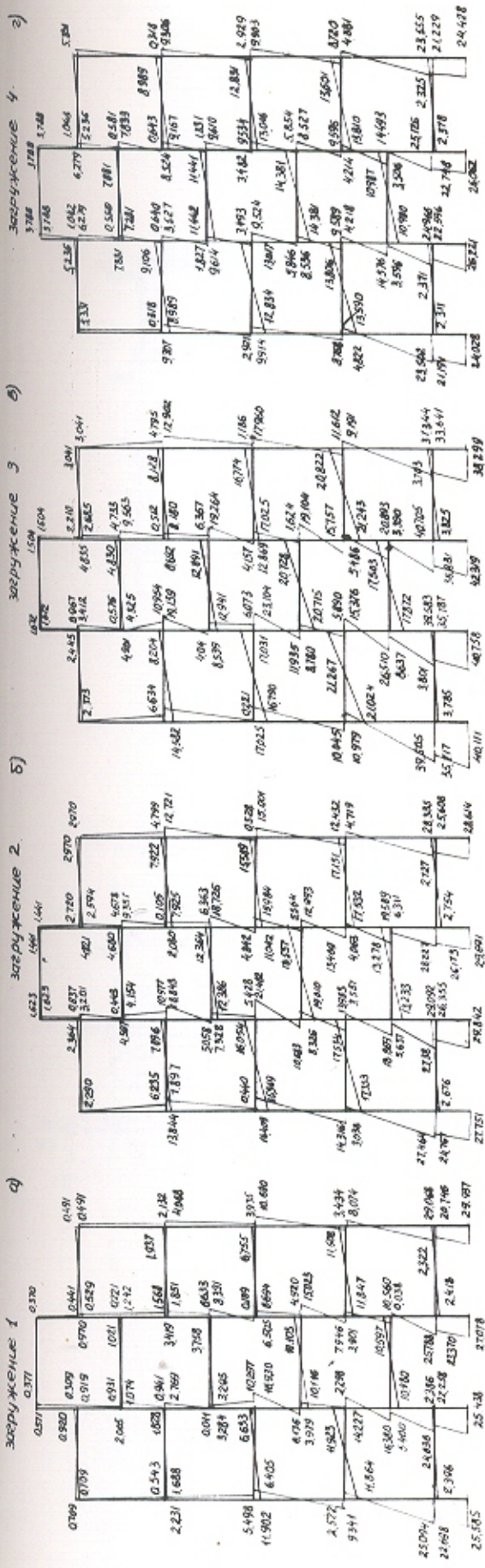


Рис 42. Эпюры изгибающих моментов для рамы 3 $E_{ст} = 3$
 $E_{желез} = 3$

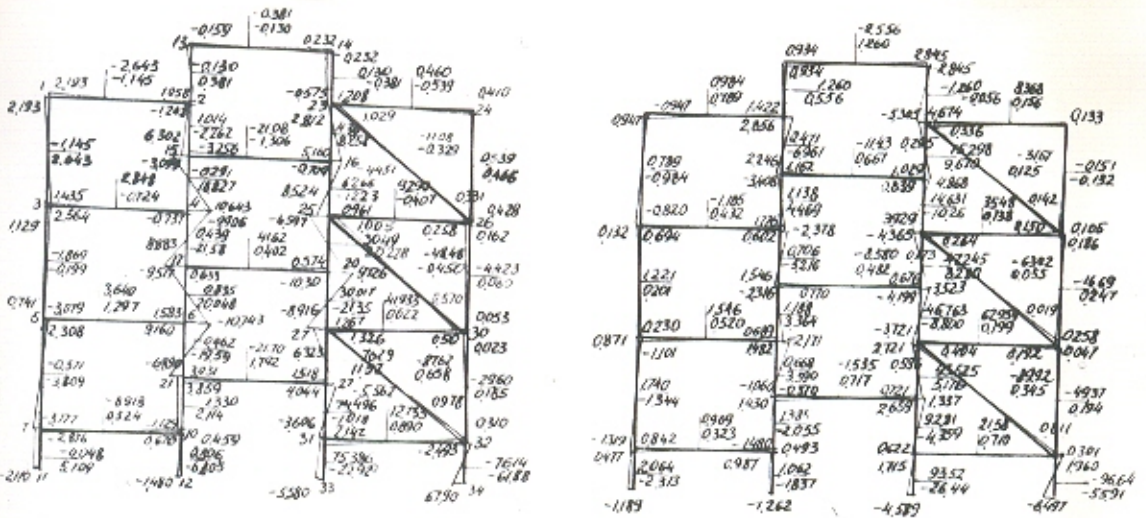


Рис 46. Эпюра изгибающих моментов и значения продольных и поперечных сил для рамы 10 $\frac{E_{ст}}{E_{грч}} = 3$

загружение 1 а)

загружение 2 б)

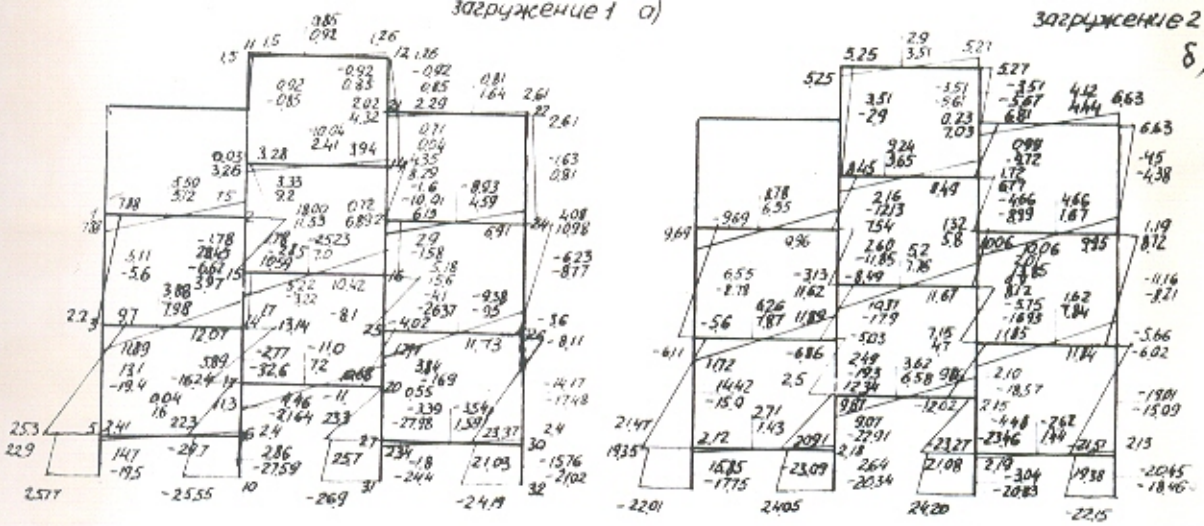


Рис 43. Эпюра изгибающих моментов и значения продольных и поперечных сил для рамы 4 $\frac{E_{ст}}{E_{грч}} = 3$

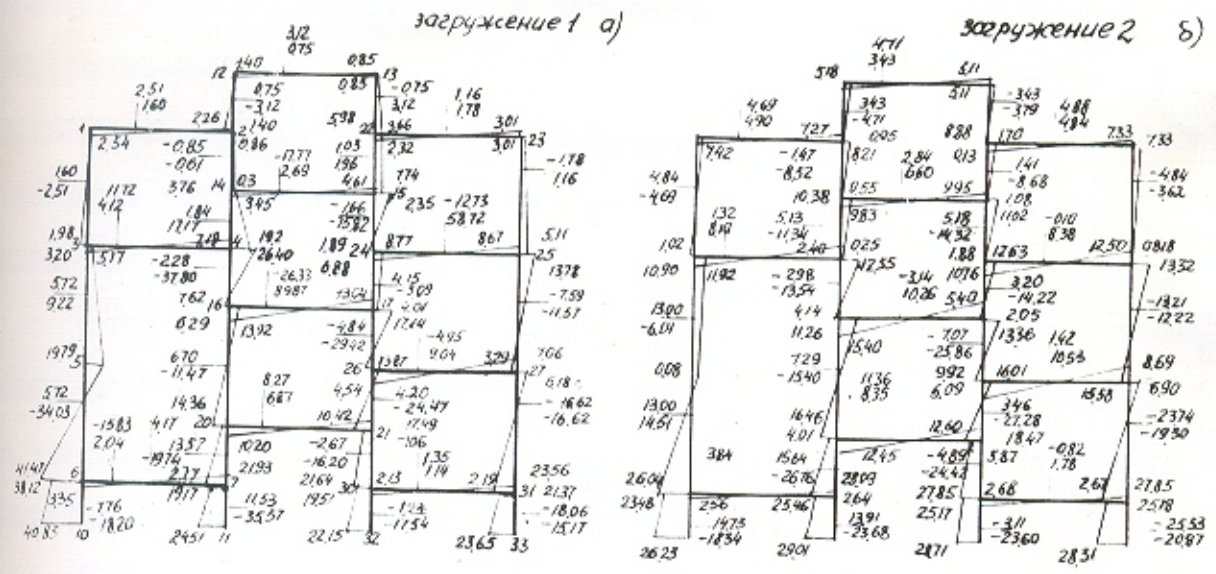


Рис 44 Эпюра изгибающих моментов и значения продольных и поперечных сил рамы 4 $\frac{EJ_m}{EJ_{пл}} = 3$

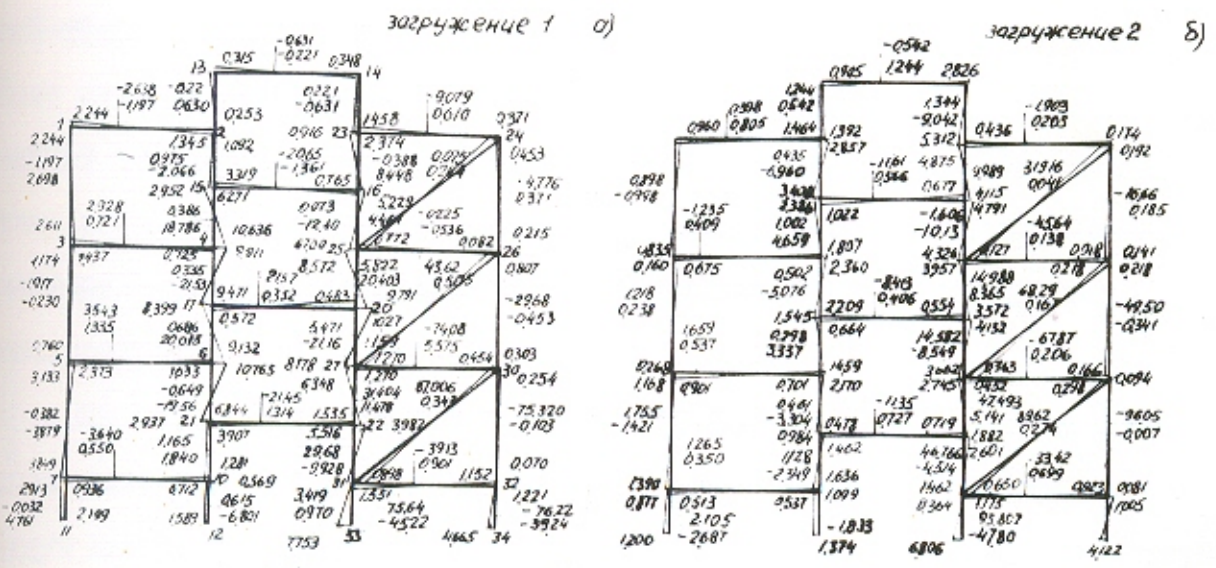


Рис 45 Эпюра изгибающих моментов и значения продольных и поперечных сил рамы 9 $\frac{EJ_m}{EJ_{пл}} = 3$

верхней, находящейся выше уровня приложения нагрузки, — усилия незначительные. Это объясняется тем, что при такой схеме приложения нагрузок верхняя часть конструкции играет роль жёсткой диафрагмы, которая перемещается параллельно деформациям, происходящим в её нижней части (рис. 40, 44). Это даёт возможность разработать технологию строительства селеуловителя поэтапно, наращивая его после занесения нижней части.

4. Максимальные моменты, продольные и поперечные силы возникают в самых нижних элементах стоек. Расчётные величины усилий, в основном, зависят от суммарных действующих сил и мало чувствительны от их расположения по высоте.

5. В случае разрушения ригеля от удара камнем и выхода его из строя, расчётные моменты в некоторых близлежащих элементах увеличиваются до 150% (в 1,5 раза). То-есть, конструкция в целом всё-таки работать может с перегрузкой в остальных элементах. Если стойка, в которой произошло резкое увеличение усилий, также выйдет из строя и потеряет несущую способность, то рассматриваемая рама превратится в такую же раму, имеющую одним пролётом меньше. Несущая и селезадерживающая способность конструкции при этом сохранится (рис. 44).

Из этого следует, что чем больше пролётов имеет рама селеуловителя, тем она более приспособляема и тем меньше значене будут иметь отдельные повреждения. Поэтому не рекомендуется возведение селеуловителей, имеющих менее трёх пролётов в основных несущих рамах.

6. Применение в конструкции селеуловителя диагональных ригелей, установленных в вертикальной плоскости, хотя значительно уменьшает расчётный изгибающий момент в элементах конструкции,

однако, наряду с ухудшением технологичности при монтаже сооружения, меняет структуру конструкции и характер распределения сил в ней.

Являются значительные продольные усилия и соответственно им большие опорные реакции. Это ведёт к необходимости устройства массивных мощных опорных креплений, что невыгодно для данной конструкции. Кроме того часть конструкции, в которой раскосы не установлены, почти не принимает участия в восприятии усилий. И конструкция в общем работает весьма неэкономично (рис. 45, 46).

Г Л А В А Ш

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СЕЛЕУЛОВИТЕЛЯ
РАМНО-РЕШЁТЧАТОГО ТИПА С УЧЁТОМ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОР-
МАЦИЙ МАТЕРИАЛА§ I. Необходимость в расчёте конструкции селеуловителя,
учитывающем пластические свойства материала

Упругий расчёт усилий в статически неопределимых конструкциях основывается на предположениях, что элементы конструкции идеально упруги, а их жёсткости не зависят от величины и длительности действия сил.

При расчёте упругих систем на прочность приходится иметь дело с равнодействующими внутренних напряжений — моментами, силами. Напряжения принимают средними по всему сечению, но действительное их распределение может быть весьма неравномерно. И хотя средние напряжения могут быть ниже предела упругости, в некоторых областях сечение может работать в пластической стадии. В этом случае расчёты по упругой стадии оказываются нереальными.

Расчёты по упругой стадии всегда являются достаточно сложными, возникает при этом необходимость вводить упрощающие

допущения, которые делают связь между практическим решением и теорией весьма неопределённой. В железобетонных конструкциях наблюдаются помимо упругих и неупругие деформации, и происходят необратимые изменения при известных обстоятельствах: в растянутой зоне бетона образуются трещины, возрастают неупругие деформации бетона, нарушается сцепление арматуры с бетоном, течёт арматура.

Поэтому напряжённо-деформированное состояние статически неопределимых железобетонных конструкций, как в условиях эксплуатации, так и на пределе несущей способности, может существенно отличаться от состояния, определяемого из расчёта упругой системы, элементы которой обладают неизменной жёсткостью. Соотношения между различными усилиями и перемещениями могут изменяться в довольно широких пределах. Поэтому неупругие деформации приводят к перераспределению усилий, оказывающему нередко значительное влияние на несущую способность конструкции, а также на жёсткость и трещиностойкость. Вследствие трещинообразования снижаются жёсткости одних элементов, происходит задержка роста усилий в них за счёт ускоренного роста напряжений в других.

Расчёты, проведённые на основе предположения об упругой стадии работы материала конструкции, приводит к недоиспользованию его прочностных свойств, не дают возможности выявить те дополнительные резервы несущей способности, которые обнаруживаются в сооружении с перераспределением внутренних усилий при развитии пластических деформаций в материале, расположенном в перегруженных зонах конструкции.

С помощью упругих расчётов невозможно установить полную несущую способность конструкции, которая может быть исчерпана либо при хрупком разрушении элементов ранее, чем общие деформации ста-

нут слишком велики, либо за счёт роста необратимых деформаций без полного разрушения какой-либо из частей конструкции.

Учёт пластических свойств материалов, который позволяет выявить полную несущую способность конструкции, особенно важен для сооружений, к которым предъявляется единственное требование — обеспечение необходимой несущей способности при развитии практически любом трещинообразовании и любых перемещениях.

К таким сооружениям как раз и относится конструкция селеуловителя, которая работает только при прохождении селевого потока. После прохождения последнего нижняя часть селеуловителя, в которой расположены наиболее напряжённые элементы конструкции, должны заноситься отложениями потока, превращая эту часть, сооружения и железобетонный каркас вновь образовавшейся земляной плотины.

Таким образом, эти элементы перестают быть несущими. В этих условиях вопросы проверки трещинообразования теряют смысл.

При прохождении селея сооружение может получать любые смещения. Поэтому большие перемещения, которыми характеризуется работа конструкции при развитии в ней пластических деформаций, также не являются лимитирующими или опасными.

При геометрических размерах элементов селеуловителя, выбираемых из условия выполнения сооружением его функционального назначения, отпадают также вопросы о потере устойчивости.

Из изложенного следует, что главным при исследовании работы конструкции селеуловителя с учётом пластических деформаций материала является установление её несущей способности.

Для статически неопределимых конструкций, каковой является пространственная система селеуловителя, принимают во внимание,

что для исчерпания их несущей способности может потребоваться образование нескольких пластических шарниров.

Ранее, чем окажется исчерпанной несущая способность конструкций, в них происходят различные неупругие явления: образование трещин в растянутой зоне, нелинейные деформации ползучести бетона, пластические деформации арматуры, перераспределяющие усилия и создающие таким образом отклонения от данных расчёта упругой системы.

Методы расчёта, учитывающие историю развития и накопления неупругих деформаций в сооружениях, весьма сложны и воспользоваться ими для исследования такой решётчатой, пространственной конструкции, каким является селеуловитель, в настоящее время не представляется возможным.

Для определения усилий в конструкции селеуловителя с учётом пластических свойств материалов воспользуемся методами предельного равновесия, развитыми в трудах А.А.Гвоздева /12, 13, 14/, Б.Г.Нила /48/, Р.Г.Ходжа /65, 66/, С.М.Крылова /40/, А.А.Ильющина /28/, Л.М.Качанова /34/, В.Прагера /51/, В.В.Соколовского /57/, Н.В.Ахведиани /1/, Хиллара /64/, Д.С.Друккера /21, 22/, М.Ш.Микеладзе /46/, А.М.Овечкина /49/, Х.М.Гринберга /22/, Г.К.Хайдукова /60/.

Метод предельного равновесия рассматривает конструкцию в момент исчерпания её несущей способности. Период работы конструкции, предшествующий исчерпанию несущей способности, при расчёте методом предельного равновесия, отражения не находит, а потому остаётся вне поля зрения. Метод предельного равновесия для расчёта несущей способности конструкций использует уравнения равновесия недеформируемой системы.

Использовать эти уравнения для стадии разрушения разрешается лишь в том случае, если можно без существенной погрешности пренебречь изменениями всех геометрических величин, входящих в уравнения равновесия, т.е. деформации конструкции до исчерпания несущей способности должны быть достаточно малыми для того, чтобы можно было пренебречь изменениями геометрических величин, входящих в условия равновесия. Это является первой предпосылкой метода, она требует, чтобы конструкция была достаточно жёсткой, т.е. нечувствительность условий равновесия к возникающим деформациям.

Для системы селеуловителя это требование соблюдается, т.к. при действии нагрузок происходящие перемещения практически не влияют на плечи усилий. При перемещении сечений исследуемой конструкции перемещается и плечо внутренней пары усилий, создаваемых растянутой арматурой и сжатым бетоном.

Предел несущей способности представляет собой чёткую границу между двумя областями поведения конструкции: с областью относительно медленного роста деформаций и областью усиленного роста деформаций. Поэтому возможность применения метода предельного равновесия ограничивается ещё следующей предпосылкой. Усилия в элементах конструкции, которые фактически определяют её несущую способность, должны быть ограничены предельными условиями, с достижением которых деформации этих элементов могут значительно возрасти. Эта предпосылка налагает ряд условий на свойства элементов конструкции. Для того, чтобы при достижении предельных условий элементов конструкции было возможно развитие достаточных местных деформаций, необходимо исключить возможность хрупкого

разрушения элементов, которое наступает в результате среза сжатой зоны бетона или раздавливания бетона от главных растягивающих напряжений.

В процессе перераспределения усилий возможна перегрузка сечений элементов конструкции поперечными силами даже тогда, когда нагрузка ещё не достигла полностью расчётных значений.

Хрупкого разрушения элементов конструкции селеуловителя можно избежать, если расчёт и подбор сечений производить по "Инструкции по расчёту статически неопределимых железобетонных конструкций с учётом перераспределения усилий", которая рекомендует назначать количество поперечной арматуры с некоторым избытком против величин, определяемых расчётом, армировать элементы только горячекатанными сталями, обладающими достаточными или пластическими свойствами, проектировать сечения с ограничением процента армирования.

Чрезмерные деформации конструкции в состоянии предельного равновесия происходят за счёт ряда больших местных деформаций, так называемых пластических шарниров. Они в отличие от идеальных шарниров с постоянным по величине моментом и допускают поворот соединяемых ими частей только в одном направлении. При повороте соединяемых частей в обратном направлении происходит обычно уменьшение изгибающего момента, действующего в шарнире, и "закрытие" шарнира.

Пластические шарниры превращают конструкцию в изменяемую систему, в которой рост деформаций происходит без возрастания нагрузки. В результате деформаций в пластических шарнирах конструкции происходит перераспределение усилий в системе в соответствии с предельными условиями в них.

несущими являются элементы, входящие в вертикальные рамы, направленные под углом 30° градусов к оси потока, а основной ролью элементов, входящих в другие рамы, перпендикулярные оси потока, является перераспределение усилий и обеспечение пространственной работы сооружения. При этом, отмеченный характер работы конструкции сохраняется как в упругой стадии работы, так и в пластической стадии вплоть до стадии разрушения после появления пластических шарниров.

То обстоятельство, что конструкция в упругой стадии имеет характер работы, присущий вертикальным рамам под действием горизонтальной нагрузки, можно установить из рисунков 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84. При этом, на рис. 77 видны искривлённые под нагрузкой стойки, а на рис. 78 - отдельные участки этих же стоек. Характер работы, присущий рамным конструкциям, показывают также возникшие трещины в корнях ригелей (рис. 79, 80, 81, 82, 83, 84) в местах, где в рамах имеются максимальные изгибающие моменты.

На рисунке 85 построены графики по показаниям тензодатчиков. Датчики с номерами I - 6I установлены на раматуре стоек, с номерами 62 - 85 - на арматуре ригелей, с номерами 86 - 120 - на бетоне ригелей. По этим графикам можно судить о характере работы стоек и ригелей, входящих в различные рамы. По наклону кривых видна этапность в работе сооружения.

Описанную картину работы конструкции подтверждают также инструментальные записи деформаций отдельных элементов и смещения узлов. На рисунках 86 и 87 нанесены показания датчиков, наклеенных на бетонную поверхность приопорных участков ригелей вертикальных рам, направленных под углом 30° к оси потока, а на рисунке 88 - на бетонную поверхность приопорных участков ригелей рам,

4 4 4 4 4 4	110*	109*	110*	109*	108*	107*	106*	105*	96	95	94	93	92	91	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	109*	110*	109*	108*	107*	106*	105*	96	95	94	93	92	91	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
	109*	110*	109*	108*	107*	106*	105*	96	95	94	93	92	91	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	

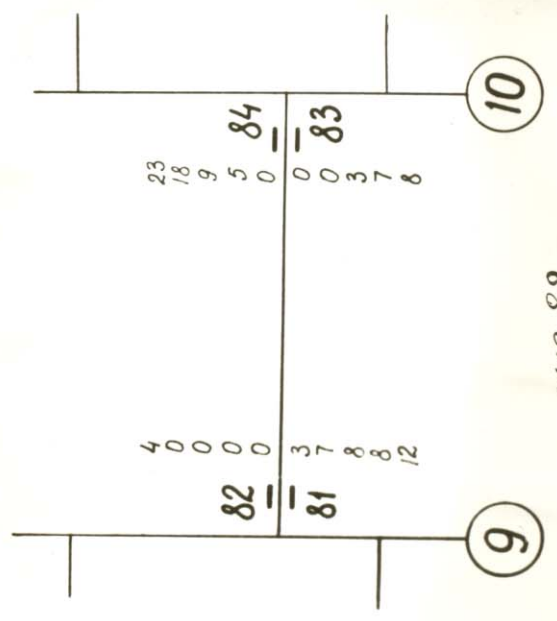
р.ч.с. 86

4 4 4 4 4 4	110*	109*	110*	109*	108*	107*	106*	105*	96	95	94	93	92	91	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	110*	109*	110*	109*	108*	107*	106*	105*	96	95	94	93	92	91	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	110*	109*	110*	109*	108*	107*	106*	105*	96	95	94	93	92	91	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

р.ч.с. 87



р.ч.с. 81



р.ч.с. 88

$h_{ни}$ - высота от основания до этой точки.

Как и при упругих расчётах, рассмотрим две расчётные схемы:

- 1) плоские несущие вертикальные рамы;
- 2) пространственную стержневую систему.

§ 2. Анализ схем разрушения пространственной конструкции с помощью приближённого метода.

С помощью расчётов, учитывающих упругие свойства материалов, была обнаружена качественная аналогия напряжённо-деформированных состояний у пространственной системы рамно-решётчатого селеуловителя и у её плоской основной составляющей рамы. На основе этого был предложен приближённый метод расчёта пространственной системы.

Поскольку непосредственное исследование пространственной системы селеуловителя рамно-решётчатого типа точным методом представляет значительные трудности, для исследования её с учётом пластических свойств материала гораздо проще проанализировать возможные схемы разрушения с помощью первого приближённого метода, т.е. на плоских основных составляющих рамах, каждая из которых представляет регулярную раму с определённым законом расположения всех элементов, работающую на распределённую или сосредоточенную горизонтальные нагрузки.

Как известно /48/ и /65,66/, для плоских рам существуют следующие основные механизмы разрушения: балочный механизм, механизм бокового смещения, механизм вращения узлов. Механизмом разрушения могут быть также комбинации из этих основных механизмов.

Вертикальные полезные нагрузки на элементы селеуловителя не действуют. Усилиям от собственного веса элементов можно пренебречь ввиду их небольшой величины. При таком сочетании нагрузок является невозможным разрушение несущей рамы по балочному механизму. Основными механизмами могут быть лишь механизмы бокового смещения и механизмы вращения узлов. Действительной схемой разрушения может быть только механизм бокового смещения или комбинированный механизм, составленный из механизмов бокового смещения и механизмов вращения узлов.

Как показали упругие расчёты, статически допустимое и безопасное распределение изгибающих моментов для рассматриваемой конструкции даёт максимальные величины изгибающих моментов около узлов, на стойках и по концам ригелей. Таким образом, образование пластических шарниров возможно лишь в корнях ригелей и стоек. Кроме того надо учесть, что в стойках шарнир может образоваться лишь на участке между двумя соседними элементами.

Изложенное было в дальнейшем подтверждено экспериментальными исследованиями: под приложенной горизонтальной нагрузкой значительные трещины с образованием пластических шарниров наблюдались именно в корнях ригелей и стоек.

В зависимости от расположения, вида и величины разрушающей нагрузки, соотношений жесткостей элементов рамы, величин высот составляющих элементов превращение конструкции в механизм возможно при частичном (рис. 47) или полном (рис. 48) разрушении. Избыточное разрушение в рассматриваемом случае исключается. Правда при полном разрушении количество шарниров

$R + I = I_9$ меньше степени статической неопределимости ($R = 24$)

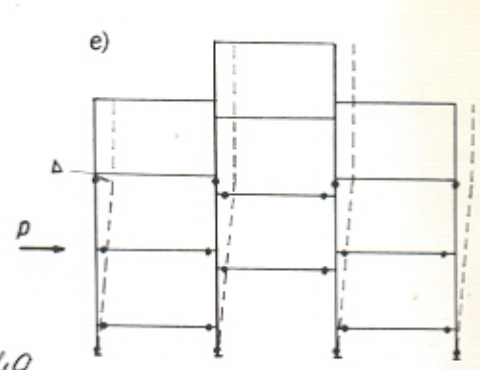
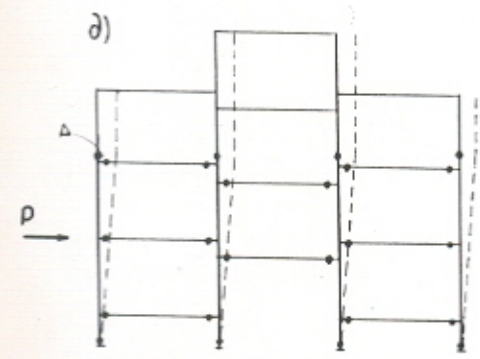
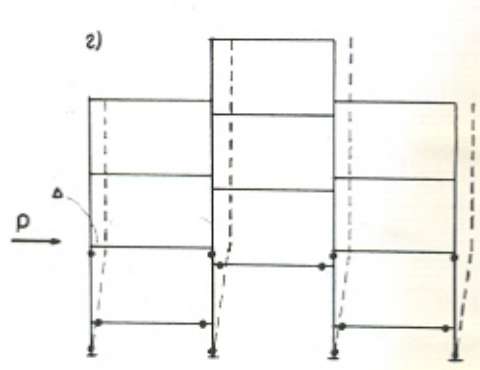
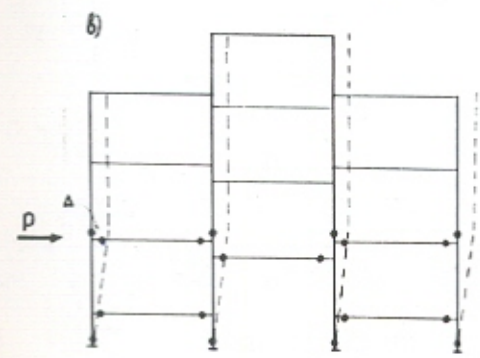
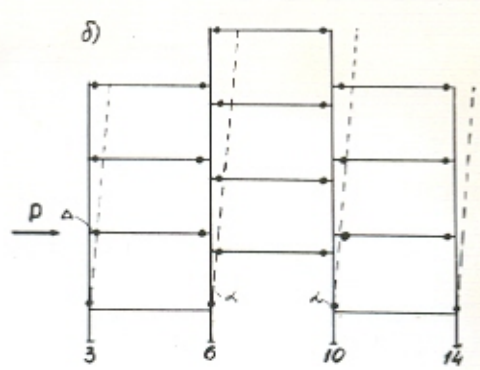
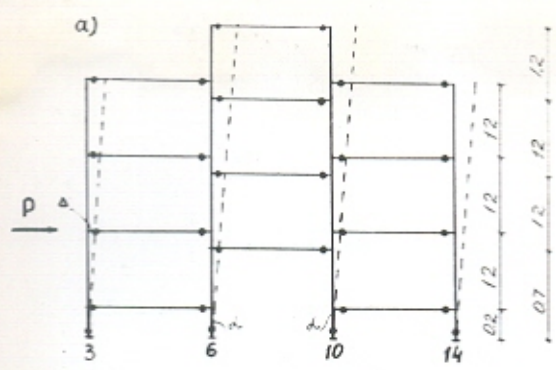


рис 49

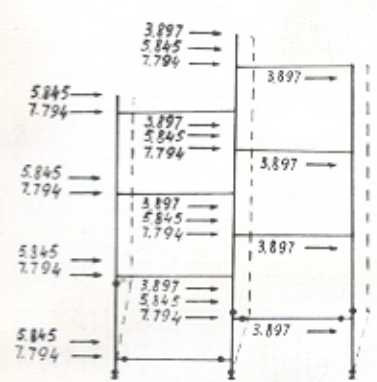


рис 47

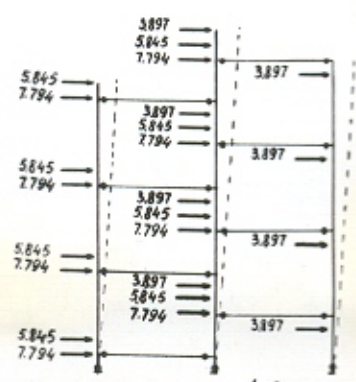


рис 48

системы, и конструкция при вертикальных нагрузках ещё работоспособна, но для действующей горизонтальной нагрузки приведённый механизм бокового смещения можно считать схемой полного разрушения.

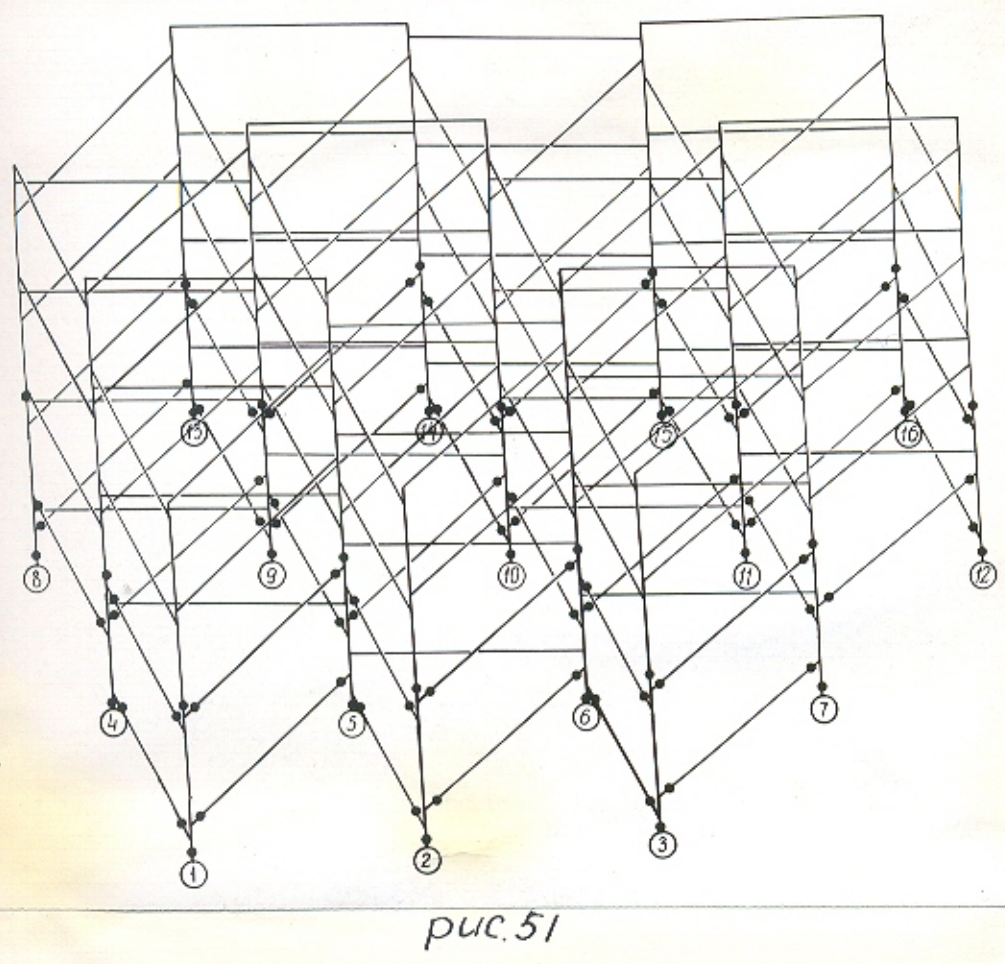
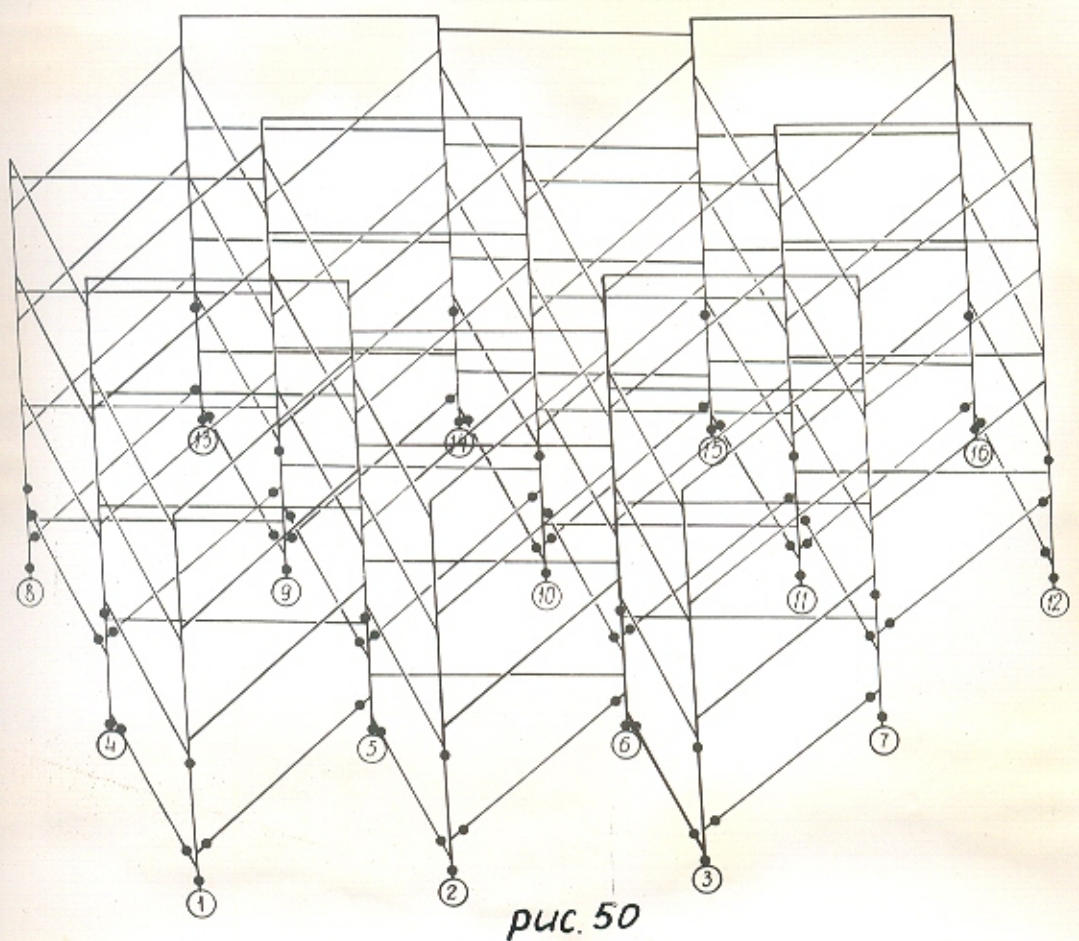
Рассмотрим составляющую раму 3-6-10-14 (рис. рис. 4, 49).

Как будет показано в главе IV §§ 6, 7 для стоек конструкции возможны два типа сечения. На первом этапе загрузки в работе принимает участие лишь один железобетонный сердечник. На втором этапе загрузки стойка имеет комбинированное сечение, в котором растянутой зоной является арматура сердечника, а сжатой — соприкасающиеся участки шайб.

Если предположить, что в момент разрушения стойки имеют сечение первого типа, т.е. железобетонный сердечник, то при этом продольные пластические моменты в ригелях и стойках будут равны $M_0^{pl} = M_0^{cl} = 1,05 \text{ тм}$.

Вычисление предельных нагрузок при соответствующих схемах дадут следующие значения:

1. Рис. 49а	$P \cdot \Delta = 1,05 \frac{\Delta}{1,4} \cdot 28$	$P_1 = 21,0 \text{ т}$
2. Рис. 49б	$P \cdot \Delta = 1,05 \frac{\Delta}{1,0} \cdot 24$	$P_2 = 25,2 \text{ т}$
3. Рис. 49в	$P \cdot \Delta = 1,05 \frac{\Delta}{1,6} \cdot 18$	$P_3 = 11,8 \text{ т}$
4. Рис. 49г	$P \cdot \Delta = 1,05 \frac{\Delta}{1,2} \cdot 14$	$P_4 = 12,8 \text{ т}$
5. Рис. 49д	$P \cdot \Delta \frac{1,4}{2,4} = 1,05 \frac{\Delta}{2,4} \cdot 20$	$P_5 = 15,7 \text{ т}$
6. Рис. 49г	$P \cdot \Delta \frac{1,4}{2,8} = 1,05 \frac{\Delta}{2,8} \cdot 24$	$P_6 = 18,9 \text{ т}$



казаны графики углов поворота концов ригелей несущих рам, а на рисунке 93 графики углов поворота ригелей связевых рам. Разность в углах поворота концов ригелей даст угол закручивания элемента. Как показывает сравнение величин углов поворота, ригели связевых рам поворачиваются на гораздо большие величины, чем ригели несущих рам. Однако углы закручивания, которым соответствуют крутящие моменты, как в первых, так и во вторых имеют относительно небольшие величины. Наличие крутящих моментов в напряжённом состоянии ригелей подтверждается в стадии разрушения незначительным наклоном трещин в пластических шарнирах ригелей несущих рам. (рис. 81).

Эксперимент дал возможность выявить также действительную схему работы сечения стоек. Как видно из показаний компараторов, показывающих взаимное смещение сечений шайб и проушин ригелей (рис. 94), в процессе загрузки, в начальный период, пока работает только железобетонный сердечник стоек, наблюдаются большие деформации в швах, и элементы конструкции имеют некоторую подвижность друг относительно друга. По мере увеличения нагрузки поверхности соседних шайб или оголовков ригелей соприкасаются, элементы заклиниваются, их подвижность исчерпывается, узлы ожесточаются.

Рабочим сечением стойки становится железобетонное сечение, сжатой зоной которого становится соприкасающаяся часть соседних элементов, а растянутой — арматура сердечника. Участки кривых на всех графиках, соответствующих этому этапу работы конструкции, имеют прямолинейный характер.

При увеличении нагрузки в арматуре появляются деформации текучести, что выражается увеличением кривизны кривой на графиках. На рисунке 94 сплошной линией обозначается расширение шва, а

пунктирной — его смыкание с противоположной стороны. Изменения первоначального положения шайб, их поворот относительно горизонтальной плоскости и неравные ширины швов отчётливо прослеживаются на рисунке 94.

Эксперимент дал возможность установить механизм, в который превращается конструкция во время своего разрушения.

§8. Сравнение теоретических данных с экспериментальными.

В работе проведено исследование напряжённо-деформированного состояния селеулловителя рамно-решётчатого типа теоретическими и экспериментальными методами. Причём, теоретически конструкция изучалась как в упругой стадии работы материала, так и с учётом его пластических свойств. При проведении эксперимента испытуемый фрагмент постепенным увеличением горизонтальной нагрузки доводился до разрушения и потому в процессе эксперимента работал как в упругой стадии, так и в пластической.

Количественные ограничения программы расчёта MAPSS-103, с помощью которой было проведено теоретическое изучение пространственной системы, не дали возможность провести расчёт экспериментальной конструкции в упругой стадии. Такое расчётное исследование было проведено для нескольких других пространственных конструкций, напряжённо-деформированное состояние которых аналогично.

Экспериментом была подтверждена правильность принятия пространственной системы за раму. Знакопеременные эпюры изгибающих моментов на стойках и ригелях, которые достигают своего максимума в узлах, формы изогнутых стоек, полученных экспериментальным путём,

Распределяясь по линейному закону вдоль отдельных элементов конструкции, изгибающие моменты по большей части знакопеременны, максимальных своих значений они достигают в нижней части конструкции, в области приложения горизонтальной нагрузки на всех вертикальных и горизонтальных элементах несущих составляющих рам, в корнях ригелей и стоек. Поэтому образование пластических шарниров ожидается в местах примыкания элементов, причём в ригелях — в верхних волокнах, положительный шарнир, в их началах и в нижних волокнах, отрицательный шарнир, в их концах.

В ригельных рам-связок не возникает никаких сколь-нибудь значительных усилий и поэтому разрушение их как элементов конструкции, от её внутренних усилий не ожидается при её превращении в механизм.

Ссылаясь на вышеизложенное, можно установить, что при разрушении пространственной конструкции в её элементах, входящих в основные несущие рамы, будет происходить последовательное образование плоских пластических шарниров, особенности которых изучены многими авторами.

Плоский шарнир, ось которого лежит в плоскости, перпендикулярной продольной оси элемента, образуется под действием изгибающего момента. Для данной задачи исключается появление в её элементах пространственного пластического шарнира, возникающего при совместном действии изгиба и кручения, ось которого располагается под некоторым углом к плоскости, перпендикулярной продольной оси элемента.

Таким образом, задача определения действительного механизма разрушения пространственной системы сводится к нахождению минимальной критической нагрузки, найденной при решении уравнений возможных работ, составленных для каждой из возможных схем

разрушения, полученных путём последовательного образования в стойках и ригелях основных несущих рам плоских пластических шарниров.

Проведённый анализ схем разрушения для плоских составляющих рам облегчает поиск действительной схемы разрушения пространственной конструкции.

Перейдём к теоретическому определению действительной схемы разрушения и определению разрушающей нагрузки, рассматривая экспериментальный фрагмент селеуловителя, как пространственную систему. Для экспериментального фрагмента разрушение может произойти аналогично схемам разрушения плоских составляющих плоских составляющих рам 49в или 49г, т.к. обе требуют минимальных значений P .

Определим разрушающую нагрузку по 2 схемам. Горизонтальные силы прикладываются к передним стойкам на уровне 7 - 8 рядов.

Разрушение по схеме I (рис. 50): пластические шарниры образуются в основаниях стрек и между 6 и 7 рядами, $n_{ш}^{ст} = 32$, пластические шарниры в ригелях образуются в их корнях, во всех элементах I-руса, входящих в составляющие рамы $n_{ш}^{рп} = 2 \cdot 22 = 44$

Тогда, согласно принципу возможной работы, получим:

$$3 \Delta P = 0,866 \left(32 \cdot 2,05 \cdot \frac{\Delta}{1,2} + 44 \cdot 1,05 \cdot \frac{\Delta}{1,2} \right)$$

$$P = 26,8 \text{ т}$$

где 0,866 учитывает то обстоятельство, что при перемещении силы на Δ , составляющие рамы получают перемещение в этой же точке на $0,866 \Delta$.

Разрушение по схеме 2 (рис. 5I): пластические шарниры образуются в основании стоек и между 8 и 9 рядами, $\Pi_{ш}^{сг} = 32$, пластические шарниры в ригелях образуются в их корнях, в элементах I и II ярусов, входящих в составляющие рамы. В средних пролётах этих рам шарниры образуются в ригелях только I яруса, $\Pi_{ш}^{рчг} = 2 \cdot 36 = 72$.

Тогда уравнение будет:

$$3 \Delta P = 0,866 \left(32 \cdot 2,05 \cdot \frac{\Delta}{1,6} + 72 \cdot 1,05 \cdot \frac{\Delta}{1,6} \right)$$

$$P = 25,5 \text{ т}$$

Следовательно, пространственная система должна разрушиться по схеме 2 с разрушающей нагрузкой 25,5 т.

Разница между значениями разрушающих сил, полученных по точной ($P = 25,5 \text{ т}$) и приближённой методике ($P = 29,0 \text{ т}$), составляет 13,5 %.

Г Л А В А IV

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
СЕЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ РАМНО-РЕШЁТЧАТОГО ТИПА.

§ I. Цель экспериментальных исследований.

Сквозной селеуловитель рамно-решётчатого типа представляет собой сложную регулярную пространственную систему, собранную из однотипных железобетонных элементов, соединённых при помощи арматурных каркасов, которые заделаны в железобетонные фундаменты. Омоноличивание связывает всю конструкцию в единое жёсткое целое. Различные комбинации этих элементов, укладываемых по схеме примыкающих треугольников, образуют пространственную структуру.

Селеуловитель имеет сложную статическую схему, большое количество элементов, находящихся в разных уровнях, и потому много узлов. В конструкции могут быть несколько несущих схем, но в зависимости от жёсткости узлов, условий закреплений могут реализоваться лишь некоторые из них. Эти факторы обуславливают некоторую неопределённость конструкции и делают необходимым установить экспериментально её действительную схему.

Проведение экспериментального исследования конструкции селеуловителя рамно-решётчатого типа необходимо для выяснения ряда особенностей в её работе, связанных со способом возведения, и проверки состоятельности принятой схемы расчёта и сделанных при этом допущений.

Причисление этой пространственной системы к типу пространственных рам, принятое при теоретическом исследовании данной конструкции, требует экспериментального подтверждения. Для этого необходимо выяснить, как некоторые конструктивные особенности селеуловителя отражаются на работе пространственной системы.

Стойки конструкции объединяются, но не на полное сечение, а на его части. Неопределённость работы такого сечения вносит неопределённость в работу самой конструкции. Кроме того, учёт действительного рабочего сечения стоек в расчёте значительно повлияет на величину несущей способности конструкции в целом.

Большая податливость узлов вследствие частичного их замощивания ставит под сомнение применимость тех предпосылок для рассматриваемого случая, на которые опираются упругие методы расчёта. Справедливость этих предпосылок может быть установлена только экспериментально.

Конструкция по роду своей работы допускает возможность больших смещений, она может выполнять своё назначение вплоть до разрушения. Поэтому представляет интерес установление её несущей способности при образовании полного механизма. Установить при этом схему разрушения можно только экспериментально.

Разработка точных методов расчёта пространственной конструкции с несовершенными узлами представляет сложную задачу, а выполнять для каждого случая эти расчёты связано со многими неудобствами. Поэтому необходима разработка приближённых методов расчёта, которые и были разработаны в данной работе. Но при этом возникла необходимость в принятии дополнительных допущений, которые должны быть проверены экспериментом.

Для выяснения отмеченных вопросов и были сформулированы цели проводимых экспериментальных исследований:

1. Исследование действительной работы конструкции.
2. Определения рабочего сечения стоек.
3. Изучение напряжённого состояния ригелей.
4. Правомочность применения к расчёту конструкций методов, установленных для упругих систем.
5. Установление схемы разрушения конструкции, определение величины разрушающей нагрузки.
6. Проверка предпосылок, на которых основаны приближённые методы расчёта.

Нами были проведены испытания конструкции, собранной из элементов натуральной величины, на действие горизонтальной сосредоточенной нагрузки.

§2. Описание опытного селеуловителя.

Испытания конструкции натуральных размеров исключило необходимость моделирования материала и конструкции. Помимо большей достоверности полученных результатов, преимущество испытаний заключается в том, что даже при коэффициенте моделирования $1/2$ и $1/3$ весьма затруднительно изготовление элементов селеуловителя (сечение ригеля 15×15). Ещё труднее при этом монтаж опытной конструкции и размещение на ней измерительной аппаратуры.

Возведение опытной конструкции в натуральную величину целесообразно ещё и потому, что приближает опыт к экспериментальному строительству и позволяет получить данные об особенностях монтажа рабочей конструкции. Имитация нагрузки движущегося селя одинаково трудно как для натуре, так и для модели. Поэтому селевую нагрузку, действующую по всему фронту селеуловителя

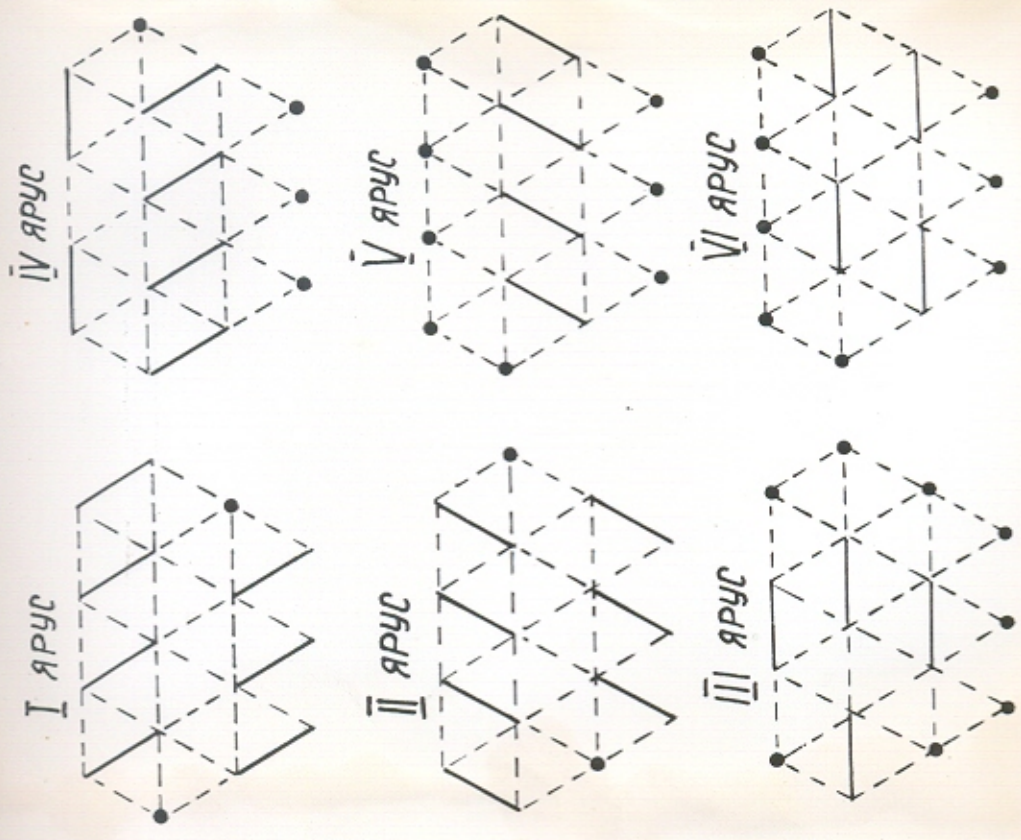


рис. 52

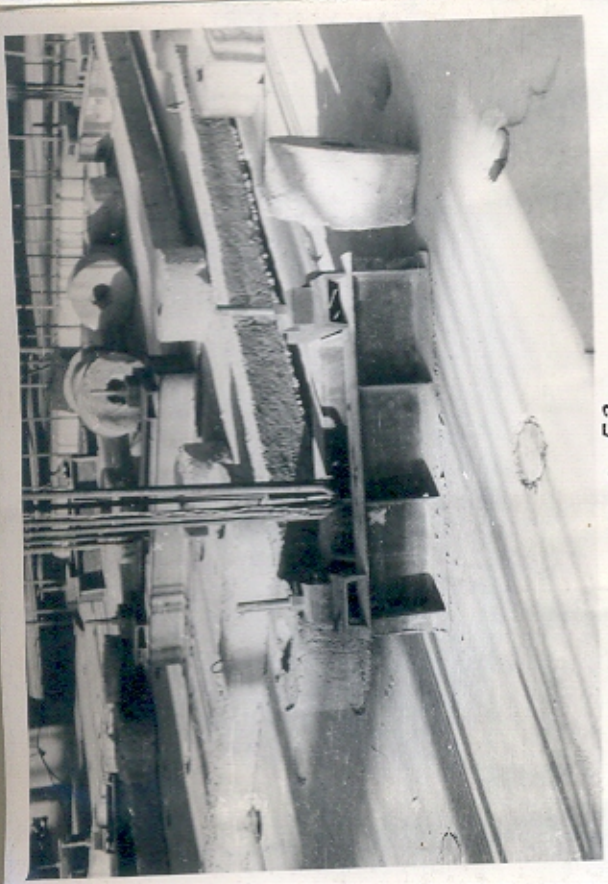


рис. 53



рис. 55

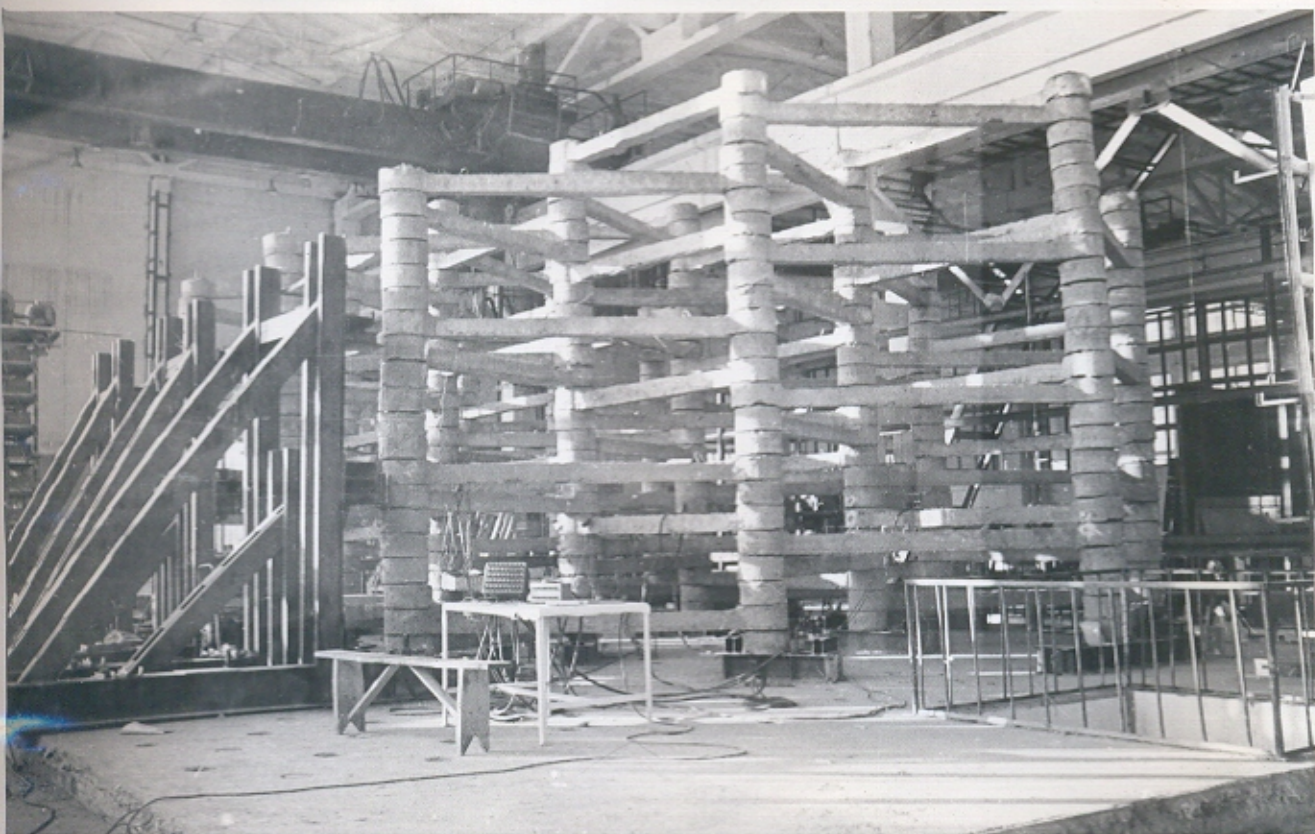


рис. 56



рис. 54

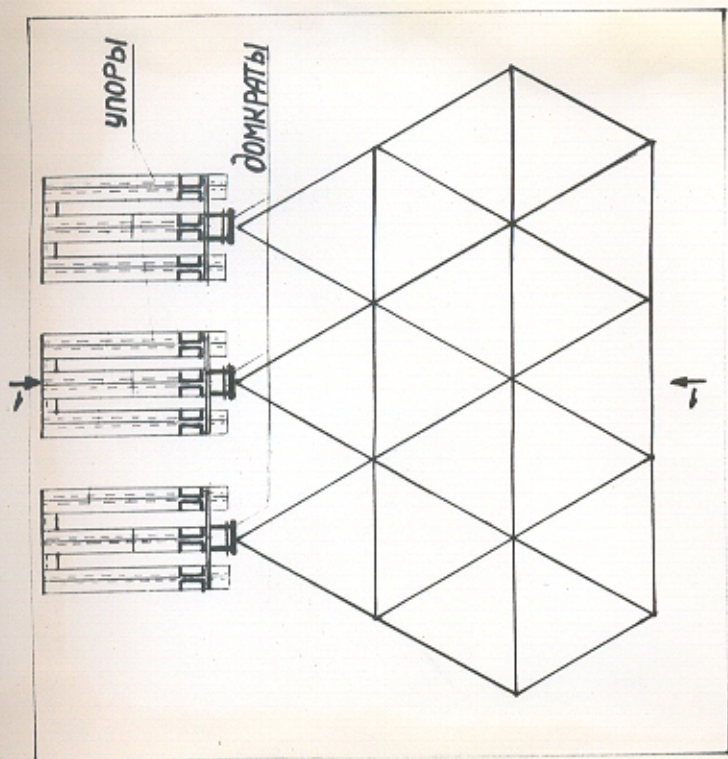


рис. 57

перпендикулярно плоскости передних стоек, при испытаниях пришлось привести к сосредоточенным силам, приложенным в одном уровне к передним стойкам. Такое приложение нагрузки даёт возможность довольно точно судить о действительном характере работы конструкции. Теоретически с помощью разработанного и предложенного метода была решена задача нахождения механизма разрушения и разрушающей силы на экспериментальной конструкции. Полученная при этом возможность провести сравнение вышеперечисленных факторов, определённых разными путями, дала бы основание судить, насколько точно предложенный метод расчёта отражает действительную работу конструкции, а для этого не обязательно имитирование действующей селевой нагрузки.

Экспериментальный селеуловитель был смонтирован на силовом полу ТбИЛЗНИИЭПа. Элементы конструкции были изготовлены на заводе железобетонных конструкций из бетона М-200 и арматуры СТ-3. Для её монтажа потребовалось 128 ригелей и 103 шайбы. План конструкции и схема раскладки её элементов приведены на рис. 52. Площадь, занимаемая опытным фрагментом, составила $12 \times 8 \text{ м}^2$, высота - 5,3 м. Железобетонные багмаки - фундаменты под каждую стойку были имитированы 16 металлическими приспособлениями (рис. 53), сваренными из швеллеров № 22, к внутренней стороне которых были приварены 6 $\varnothing 12$, являющиеся арматурой стоек.

Сами металлические багмаки прижимались к полу через отверстия двумя анкерными болтами диаметром 20 мм. На арматуру стоек с помощью мостового крана укладывались железобетонные элементы, согласно схеме раскладки. Через каждые 8 рядов элементов по высоте монтаж прекращался, а каналы, образованные отверстиями в проушинах ригелей и шайбах, бетонировались мелкозернистым бетоном (рис. 54). Затем сваркой (рис. 55) наращивалась арматура стоек



по 1-1

испытываемая конструкция

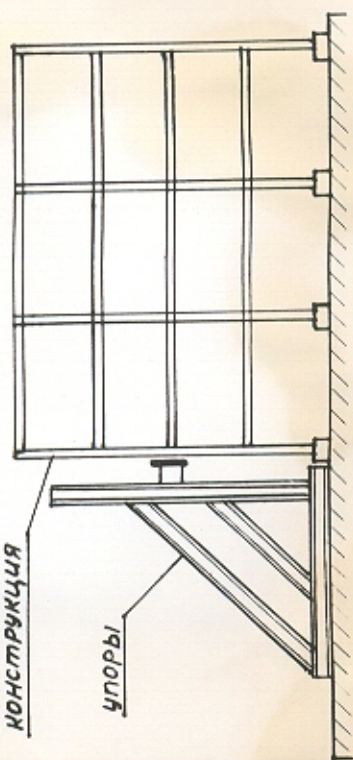


рис. 60

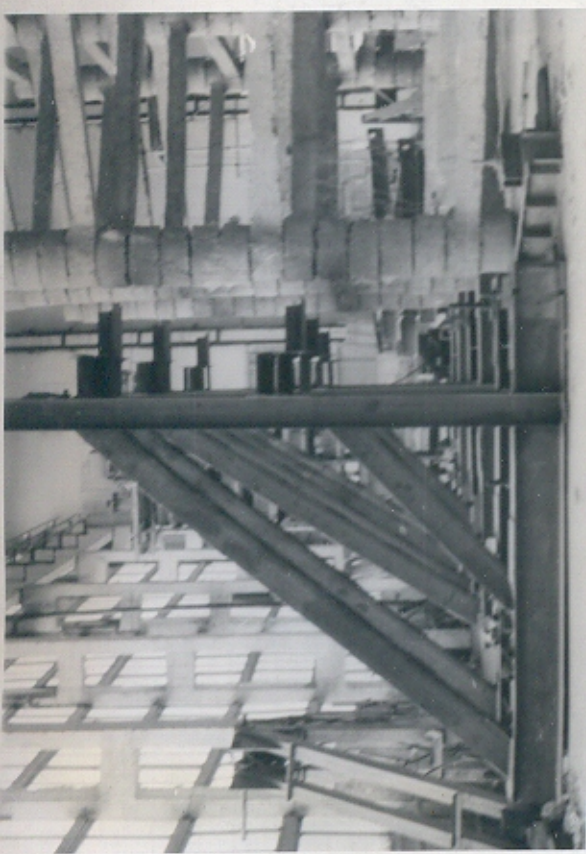


рис. 58



рис. 59

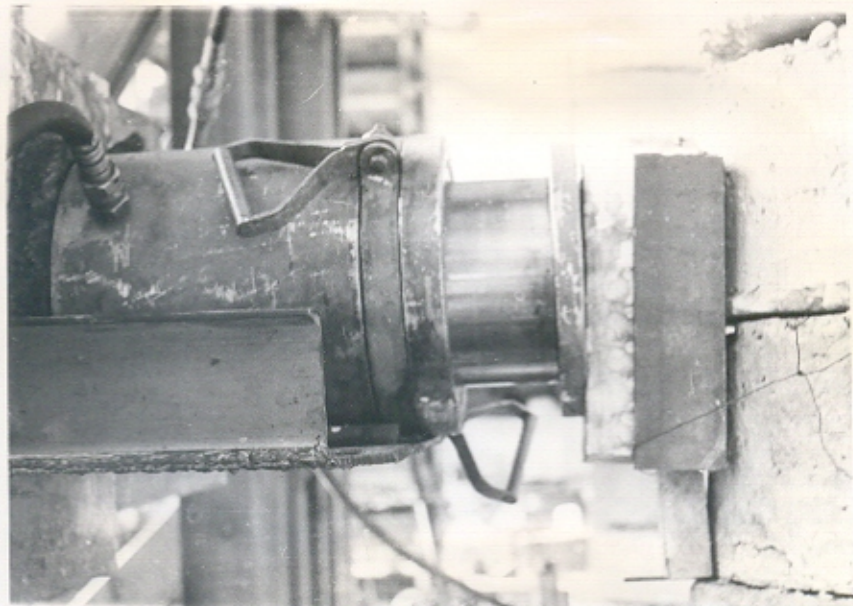


рис. 61

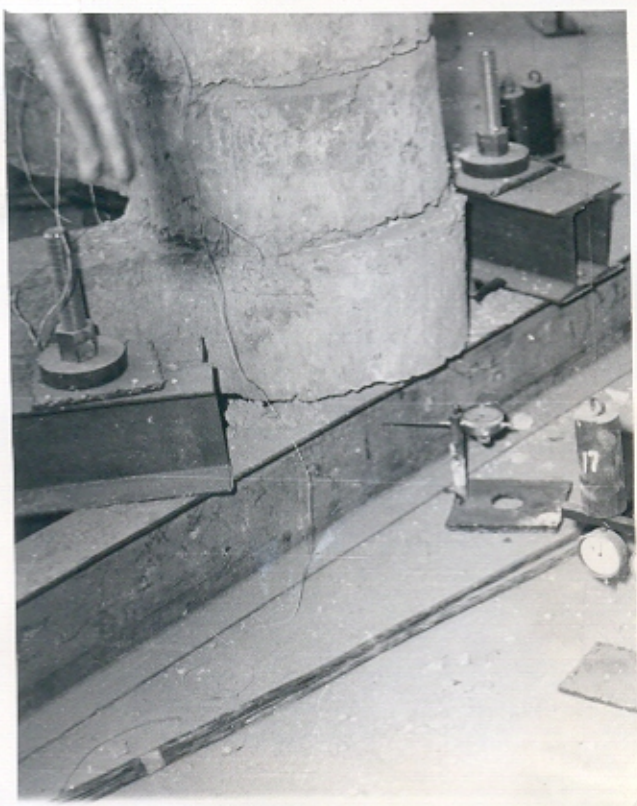


рис. 62

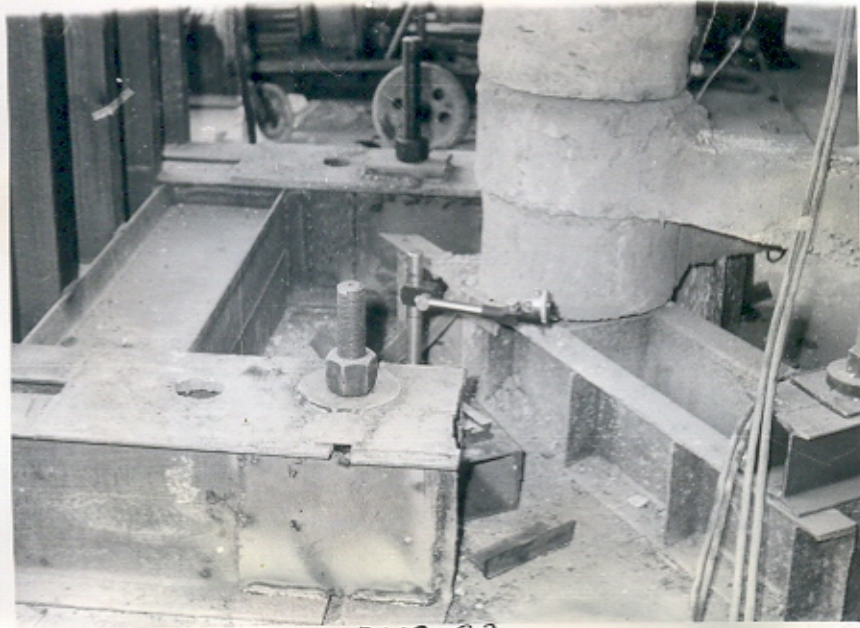


рис. 63

и надевались хомуты. Монтаж был закончен за три этапа. Для монтажа использовались элементы облегченного типа длиной 3 м между осями стоек, сечением $15 \times 15 \text{ см}^2$. Общий вид экспериментальной секции после монтажа приведён на рис. 56.

§3. Силовое устройство.

На каждую из трёх передних стоек конструкции прикладывалась сосредоточенная горизонтальная нагрузка по направлению оси Y . Силовое устройство было представлено 3 гидравлическими домкратами мощностью по 100 т ДГ-100-2. Они приводились в действие одной электромеханической насосной установкой (рис. 57.) Давление масла в домкрате измерялось контрольным манометром с максимальным давлением 250 кг/см^2 . Одно деление манометра соответствовало нагрузке домкрата $\approx 0,66 \text{ т}$. Домкраты были протарированы на пятидесятитонном прессе.

Для восприятия горизонтальных реакций домкратов было установлено три специальных металлических упора (рис. 58, 59). Схема установки упоров показана на рис. 60.

На рисунках 58, 59, 60 приведена конструкция упоров. Они выполнены из прокатного металла и представляют собой вертикальные стойки, усиленные подпорками. Стойки и подпорки укреплены на жёстких горизонтальных основах. Мощные металлические горизонтальные основы, выполненные из профильного металла, с помощью пяти анкерных болтов диаметром 45 мм были прикреплены к силовому полу. На стойках упоров были устроены горизонтальные столики для установки домкратов, которые упирались через металлодеревянные накладки в передние стойки селеуловителя на уровне седьмого и восьмого рядов элементов, т.е. на 1,6 м от уровня пола. Узел

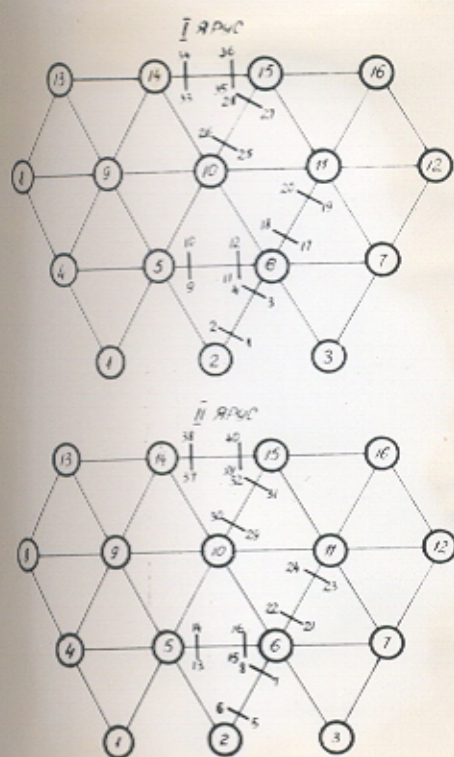


рис. 64



рис. 65



рис. 67



рис. 66

передачи усилий на фрагмент селеуловителя виден на рис.61.

§4. Размещение измерительной аппаратуры.

Для наблюдения за работой конструкции и регистрации изменения напряженно-деформированного состояния как отдельных её элементов, так и конструкции в целом, в процессе её загрузки на ней была установлена необходимая измерительная аппаратура.

Стойки селеуловителя в естественных условиях зацемяются в железобетонные балясы, которые или зарыты в грунт или пригружены камнем. Можно считать, что в естественных условиях смещение концов стоек под нагрузкой не происходит.

Стойки же опытного фрагмента зацемяются на силовом полу с помощью опор в виде металлических приспособлений, прижатых к полу анкерными болтами. Для выявления скольжения опор во время загрузки к каждой из шестнадцати металлических опор были приставлены на штативах индикаторы (рис.62). Для определения вертикальных перемещений опор также были установлены индикаторы (рис.63).

В процессе работы конструкции её ригели находятся в сложном напряжённом состоянии и испытывают различные деформации: прогибы, смещения осей, угловые перемещения, закручивание. Для учёта этих факторов на десяти ригелях (рис.64): 2 - 3, 5 - 6, 6 - II, 10 - 15, 14 - 15 - первого и второго яруса были установлены клинометры (рис.65). Они изготавливаются и крепятся следующим образом: по концам стального уголка длиной 50 см просверливаются отверстия. Сам уголок гипсом крепится на верхней грани ригеля перпендикулярно его продольной оси на расстоянии 85 см от оси стойки.

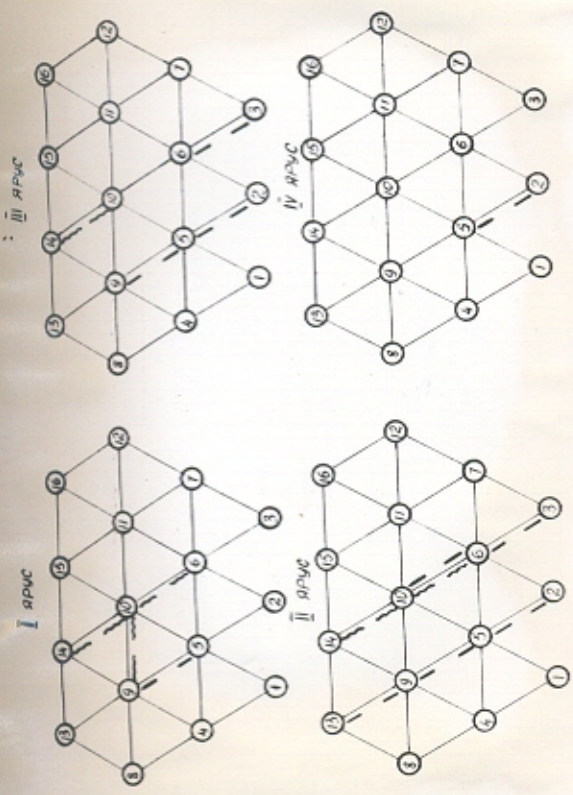


рис. 74

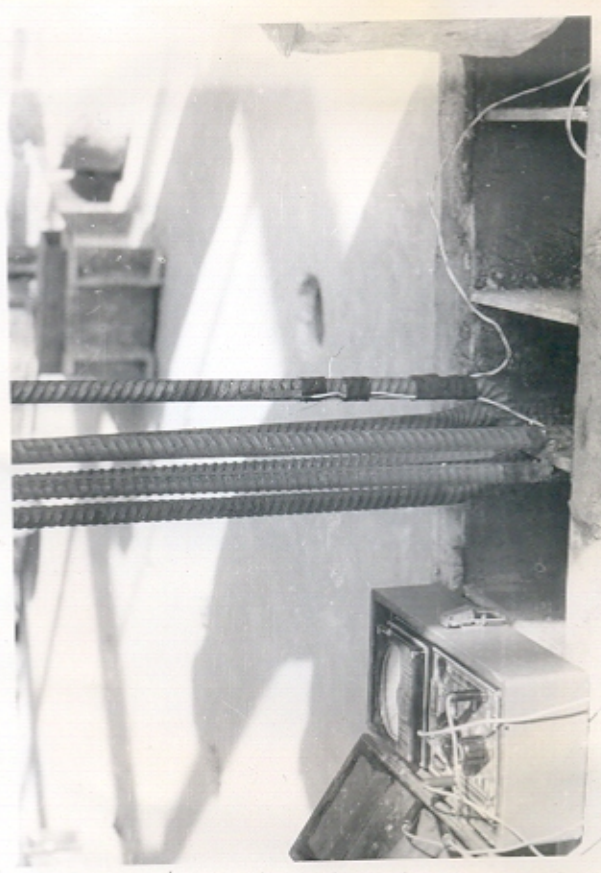


рис. 70



рис. 71



рис. 71

29

29

Через отверстие в уголке пропускается тонкая стальная проволока с двухкиллограммовыми гирями по концам. Гири касаются головок индикаторов с ценой деления 0,01 мм, закреплённых в штативах, стоящих на полу. На каждом ригеле ставилось по два уголка с обоих его концов и по 4 индикатора. Было установлено 20 таких клинометров.

Стойки конструкции кроме деформаций изгиба, растяжения или сжатия испытывают сдвиговые деформации. Для изучения работы стоек, изменения податливости узлов в процессе нагружения измерялись смещения в швах между элементами, составляющими стойки. Было установлено на стойках конструкции попарно 28 мессур-компараторов (рис. 66, 67).

Компаратор состоит из двух металлических брусков со сквозными отверстиями, которые крепятся по разные стороны от наблюдаемого шва. Металлический стержень, диаметром 3 мм, с винтовой нарезкой с одной стороны, ввинчивается в шток закреплённого в одном из брусков индикатора. Противоположный конец стержня зажат в отверстии другого бруска.

Горизонтальные перемещения элементов конструкции определялись в стойках № 10 и № 15 по высоте каждого составляющего их элемента, что позволили установить изгибные формы этих стоек. В остальных стойках эти же перемещения определялись в двух уровнях: на самом верху и на уровне тринадцатых-четырнадцатых элементов, считая от пола. Для измерения боковых перемещений в стойках № 4, 7, 8 и 12 были установлены четыре прогибомера (рис. 68). Всего было использовано 80 прогибомеров Максимова и Аистова.

Для установки прогибомеров к каждому наблюдаемому элементу

на гипсе крепился металлический крючок, на который накидывалась петля от конца тонкой стальной проволоки, перекинутой через круглый стержень, расположенный на уровне данного элемента. Для закрепления приборов была сооружена специальная металлическая рама, изолированная от опытной секции (рис. 69).

Для изучения поведения ригелей, в плоскости несущих рам и удлинений арматуры стоек были использованы тензометрические датчики сопротивления. На конструкции было установлено 125 тензодатчиков, причём, восемьдесят пять из них — на арматуре стоек (рис. 70) и ригелей (рис. 71), а остальные сорок штук — на бетоне ригелей (рис. 72). Кроме них были подготовлены к работе ещё шесть компенсационных датчиков (рис. 73), причём два из них на бетоне.

Датчики с базой 20 мм устанавливались попарно на высоте первого и восьмого элементов, считая от пола, по бокам переднего стержня арматуры во всех стойках. На арматуре ригелей датчики устанавливались на верхних и нижних стержнях ригелей. На верхнюю и нижнюю бетонные поверхности ригелей также клеились датчики с базой 100 мм. Схема расположения датчиков на конструкции приведена на рисунке 74. Тензодатчики были протарированы на тарировочной машине.

§5. Проведение эксперимента.

Эксперимент был проведён за два дня: 21 и 27 января 1972 года. Три домкрата нагружались одновременно ступенями. Ступени нагружения равнялись 5 делениям манометра, что соответствовало $\approx 3,3$ т. В первый день испытания было проделано шесть этапов нагружения до 30 делений манометра, после чего конструкция была оставлена в напряжённом состоянии. Во второй день селеуловитель

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА.

1. Ахвледиани Н.В. - О выборе возможных перемещений при составлении уравнений предельного равновесия. Труды института строительной механики и сейсмостойкости АН СССР, IX, 1963.
2. Бейлин Е.А. - О предельном состоянии изогнутых и скато-изогнутых стержней. Строительная механика и расчёт сооружений. № I, 1961.
3. Безусов Н.И. - Рамные конструкции. Расчёт и конструирование. Гостехиздат, Москва. 1937.
4. Бернштейн С.А. - Очерки по истории строительной механики. Госстройиздат. Москва. 1957.
5. Богоявленский К.Н., Григорьев А.К., Борисов В.Р.: - Экспериментальное исследование поверхностей деформации при пластическом изгибе. Труды ЛПИ, № № 293. 1965.
6. Бочков Г.Ф. - Упруго-пластический изгиб рам. Труды Горьковского политехн. ин-та, I4, № 10, 1960.
7. Бурдули Н.С. - Исследование распределения усилий в конструкции сквозного селеловителя системы ЗакНИГМИ. Труды ЗакНИГМИ, выпуск 40 (46). 1972.
8. Бычков Г.Г. - К вопросу определения несущей способности статически неопределимых систем, элементы которых испытывают изгиб и кручение. Труды Калининского торф. ин-та, выпуск 10. 1959

4. Конструкция селеуловителя может работать при симметричной и несимметричной нагрузке. Наиневыгоднейшим случаем является прохождение селя по всему фронту селеуловителя. Несимметричная нагрузка, характеризуемая прохождением потока через часть конструкции или под углом к её фронту меньше 90° , улучшает условия работы конструкции, т. к. равнодействующая в этом случае будет меньше, чем при симметричной нагрузке, и направлена под другим углом к её фронту, что вызовет изменение ролей составляющих рам в конструкции и вовлечение в работу в качестве несущих и рам-связок, имеющих гораздо большую жёсткость по сравнению с несущими, разгружающие последние.

5. Определение расчётных усилий в элементах конструкции селеуловителя рамно-решётчатого типа в предположении упругой работы можно производить точным либо приближённым методом. Для пространственной конструкции точные значения усилий можно получить, используя для расчёта программу MARSS-103 на ЭЦВМ Минск-22. Приближённо, с близкой степенью точности расчёт можно вести не для всей конструкции, которая может не удовлетворять количественным ограничениям программы, а для её фрагмента на такую же распределённую нагрузку. В качестве приближённого расчёта также можно пользоваться определением усилий в плоских рамах, являющихся основными несущими в пространственной конструкции и работающих на эквивалентную нагрузку. При этом каждый горизонтальный элемент селеуловителя однажды участвует в работе какой-либо рамы, и суммирование усилий в них исключено. Расчёт плоских рам проводится либо по программе, либо обычными методами строительной механики с записью всех данных в матричной форме. Дальнейшее упрощение

расчётной схемы путём изменения расположения ригелей до совмещения их в одном уровне недопустимо, т. к. ведёт к значительным погрешностям.

6. На основании упругих расчётов установлено, что для элементов, выполняющих роль ригелей в несущих рамах, расчётной нагрузкой является изгибающий момент в плоскости рам. Он достигает максимальной величины в местах примыкания элементов к стойкам. В элементах возникают также продольные и поперечные силы и незначительные крутящие моменты из плоскости рам. От удара камней в ригелях возникнут изгибающие моменты из плоскости рамы, которые достигнут максимальных величин в их средней части.

7. Рабочее сечение стоек изменяется в зависимости от величины нагрузки. В начальной стадии приложения нагрузки в работе участвует только железобетонный сердечник. С увеличением нагрузки стойка работает как составной стержень, в котором арматура сердечника растягивается, а соприкасающиеся части соседних элементов являются сжатой зоной сечения. При расчёте конструкции как в упругой, так и в пластической стадии рабочим сечением стойки следует считать составной стержень, что приближает расчётную схему к действительности и повышает несущую способность конструкции на 40 - 50 %.

8. В работе конструкции с начала загрузки до её разрушения с увеличением действующей нагрузки можно выделить четыре этапа: I этап - упругая стадия, когда в стойках работает только сердечник, II этап - упругая, самая продолжительная стадия, когда рабочее сечение стойки становится составным, III этап - стадия, в которой исчерпаны упругие свойства материала, появляются трещины, зависимость между нагрузками и перемещениями приобретает нелинейный

характер, IV этап — стадия последовательного образования пластических шарниров, которая заканчивается полной потерей общей жёсткости и, следовательно, разрушением конструкции. Перед разрушением конструкция превращается в механизм с образованием определённого числа пластических шарниров. В местах образования шарниров напряжения в арматуре достигают предела текучести, трещины в растянутой зоне бетона раскрываются до 2 — 4 см, стойки сильно наклонены, ригели повёрнуты, конструкция получает значительные смещения.

9. Расчёт конструкции селеуловителя с учётом пластических свойств материала целесообразно производить методом предельного равновесия, используя кинематический способ. В этом случае подбор сечений для элементов конструкции делается с помощью "Инструкции по расчёту статически неопределимых железобетонных конструкций с учётом перераспределения усилий."

10. В работе даётся оптимальный вариант сечения и армирования основного элемента — ригеля — селеуловителя.

სსრკ მეცნიერებათა აკადემიის მეცნიერებათა აკადემიის
 ტექნიკური მეცნიერებების განყოფილება

სსრკ მეცნიერებათა აკადემიის
 მეცნიერებათა აკადემიის ტექნიკური

380012, თბილისი, 12, პლ. მესაბეგის ქ. 150

ტელ. 954377, 952028, კომ. 956501



Главное управление гидрометеорологической
 службы при Совете Министров СССР

ЗАКАВИАССКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ЗАНИИГМ)

380012, Тбилиси, 12, пр. Месабегидзе, 150

Тел. 954377, 952028, комм. 956501

13-02-74 № Н2-430
 № 74 от

ДИРЕКТОРУ ИНСТИТУТА СТРОИТЕЛЬНОЙ
 МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ АН ГССР
 АКАДЕМИКУ К.С. ЗАВРИЕВУ.

На Ваш телефонный запрос сообщаем, что разработанная в Вашем институте инженером Н.С. БУРДУЛИ методика расчета сквозных железобетонных селеуловителей рамно-решетчатой системы Закавказского института /автор конструкций И.И. ХЕРХЕУЛИДZE/, была использована при непосредственном участии Н.С. БУРДУЛИ в расчетах сквозного селеуловителя, указанного типа, запроектированного в составе разработанного Закавказского института проекта „Опытное строительство селезащитных сооружений на р. Дуруджи“. В настоящее время сквозной селеуловитель высотой 9,6 и длиной 100 м построен и успешно функционирует.

Рекомендации Н.С. БУРДУЛИ по оптимальному армированию и усовершенствованию оголовков сборных железобетонных элементов, содержащиеся в представленном Вашим институтом отчете об исследованиях, выполненных по договору с Закавказским институтом, будут использованы нами при дальнейших разработках рациональных противоселевых сооружений.

• Директор Закавказского НИИГМ

В.П. Ломинадзе
 В.П. Ломинадзе/.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА.

1. Ахвледиани Н.В. - О выборе возможных перемещений при составлении уравнений предельного равновесия. Труды института строительной механики и сейсмостойкости АН ГССР, IX, 1963.
2. Бейлин Е.А. - О предельном состоянии изогнутых и скато-изогнутых стержней. Строительная механика и расчёт сооружений. № I, 1961.
3. Безусов Н.И. - Рамные конструкции. Расчёт и конструирование. Гостехиздат, Москва. 1937.
4. Бернштейн С.А. - Очерки по истории строительной механики. Госстройиздат. Москва. 1957.
5. Богоявленский К.Н., Григорьев А.К., Борисов В.Р. - Экспериментальное исследование поверхностей деформации при пластическом изгибе. Труды ЛПИ, № № 293. 1965.
6. Бочков Г.Ф. - Упруго-пластический изгиб рам. Труды Горьковского политехн. ин-та, I4, № 10, 1960.
7. Бурдули Н.С. - Исследование распределения усилий в конструкции сквозного селеуловителя системы ЗакНИГМИ. Труды ЗакНИГМИ, выпуск 40 (46). 1972.
8. Бычков Г.Г. - К вопросу определения несущей способности статически неопределимых систем, элементы которых испытывают изгиб и кручение. Труды Калининского торф. ин-та, выпуск 10. 1959

9. Вайнберг Д.В., Чудновский В.Г. - Пространственные рамные каркасы инженерных сооружений. Гостехиздат Украины. 1948.
10. Гагошидзе М.С. - Селевые явления и борьба с ними. Изд-во "Саботча Сакартвело", Тбилиси, 1970.
11. Гвелесиани Л.О., Чикваидзе Р.Д., Дзаганя Н.А. - Экспериментальное исследование работы железобетонных элементов сквозного селеуловителя системы ЗакНИГМИ. Труды ЗакНИГМИ, вып. 40 (46). Ленинград, 1972.
12. Гвоздев А.А. - Расчёт конструкций по предельным состояниям и нормы проектирования. Ж. Строительная механика и расчёт сооружений, № 2, 1970.
13. Гвоздев А.А. - Расчёт несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. Москва, 1949.
14. Гвоздев А.А. - Развитие теории железобетона в СССР. Ж. Бетон и железобетон, № 8, 1964.
15. Гемерлинг А.В. - О работе стержневых систем в упруго-пластической стадии. Ж. Строительная механика и расчёт сооружений, № 6, 1964.
16. Гемерлинг А.В., Трофимов А.И., Милейковский И.Е., Кочерова Е.А. - Исследование работы рамных конструкций. Научные сообщения ЦНИИПС, вып. 21. Госстройиздат.
17. Горбунов Б.Н., Кротов Ю.В. - Основы расчёта пространственных рам. Москва, 1936.

18. Гребень Е.С. - Вопросы матричного расчёта многократно-статически неопределимых систем. Сб. трудов ЛИИЖТ-а, вып. 172. 1960.
19. Дидов Б.В. - К расчёту пространственной рамы. Уч. зап. строит. фак-та Всесоюзн. заочн. Ин-та инж. ж.д. транспорта, вып. 13. 1964.
20. Динкевич С.З. - К расчёту пространственных рам. Сб. Исследов. по теории сооружений, вып. 15, Стройиздат. 1967.
21. Друккер Д. - Пластические методы расчёта рам. Преимущества и ограничения. Механика, сб. переводов, Москва, ИЛ, № 1. 1960.
22. Друккер Д., Прагер В., Гринберг Х. - Расширенные теоремы о предельном состоянии для непрерывной среды. Механика, сб. переводов, М., ИЛ, № 1. 1953.
23. Жвания Г.А. - Расчёт рамных систем с учётом пластических деформаций. Сб. Исследование по строительной механике, Тбилиси. 1970.
24. Жвания Г.А. - Жёстко-пластический анализ железобетонных рам. Сб. Исследование по строительной механике, Тбилиси. 1971.
25. Жемочкин Б.Н. - Расчёт рам. Стройиздат. 1965.
26. Завриев К.С. - Основы расчёта сооружений по методу расчётных предельных состояний. Тбилиси. Изд-во АН ГССР. 1956.
27. Завриев К.С. - Расчёт стержней на одновременное действие изгиба и осевого сжатия. 1932.
28. Илькишин А.А. - Пластичность. Основы общей математич. теории. М. Изд-во АН СССР. 1963.

29. - Инструкция по расчёту статически неопределённых железобетонных конструкций с учётом перераспределения усилий. Госстройиздат. 1960.
30. - Исследование новых сквозных сборных противоселевых сооружений типа ЗакНИГМИ. Отчёт по хождоговорной теме ГИИ им. Ленина, каф. мостов и ж.б. конструкций.
31. Кальницкий А.А. - Расчёт статически неопределённых железобетонных конструкций с учётом перераспределения усилий. М., Стройиздат. 1970.
32. Кани Г. - Расчёт многоэтажных рам. Стройиздат. 1963.
33. Карцивадзе Г.Н., Джинчарадзе Д.И. - Экспериментальное исследование работы железобетонных элементов и узлов сквозных селеуловителей типа ЗакНИГМИ. Труды ЗакНИГМИ, вып. 30 (36), Л. 1968.
34. Качанов Л.М. - Основы теории пластичности. М., Наука. 1969.
35. Кизирия Г.В. - К расчёту конструкций сквозных селеуловителей системы ЗакНИГМИ. Труды ЗакНИГМИ, вып. 30(36), Гидрометеиздат, Л. 1968.
36. Кизирия Г.В., Бурдули Н.С. - Теоретическое и экспериментальное исследование конструкции селеуловителя системы ЗакНИГМИ. Сб. док. УП объедин. с. нии закавк. республ. по строит. Баку. 1971.
37. Казачевский А.М., Крылов С.М. - Исследование перераспределения усилий в сложных стержневых системах с учётом неупругих свойств железобетонных конструкций. Стройиздат. 1968.

38. Красиков В.И. - Испытания строительных конструкций. Госиздат лит-ры по стр-ву и архит-ры. М.-Л. 1952.
39. Кротов Ю.В. - Расчёт пространственных рам. Госстройиздат. 1948.
40. Крылов С.М. - Перераспределение усилий в статически неопределимых железобетонных конструкциях. Стройиздат. 1964.
41. Кузьмичёв А.Е. - Исследование несущей способности железобетонных рам и сборных неразрезных балок. Ж. Бетон и железобетон, № 12. 1957.
42. Кузьмичев А.Е. - Исследование влияния пластических деформаций сжатого бетона на перераспределение усилий в железобетонных рамах. Труды НИИЖБ, вып. 17, Исслед. по теории железобетона. Госстройиздат. 1960.
43. Лессиг Н.Н. - Определение несущей способности ж. б. элементов прямоугольного сечения, работающих на изгиб с кручением. Сб. НИИЖБ, Исследов. прочности элем.ж.б. конструкций, вып. 5, Москва. 1959.
44. Лессиг Н.Н. - Определение несущей способности железобетонных элементов при совместном действии изгиба и кручения. Ж. Бетон и железобетон, № 3. 1959.
45. Маслеников А.М. - Матричный расчёт статически неопределимых систем. Сб. трудов ЛИИЖТа, вып. 190. 1962.

46. Микеладзе М.Ш. - Статика анизотропных пластичных оболочек. Тбилиси. Изд-во АН СССР. 1963.
47. Мурашёв и др. - Железобетонные конструкции. Госстройиздат, Москва. 1962.
48. Нил Б. - Расчёт конструкций с учётом пластических свойств материала. Госстройиздат. 1961.
49. Овечкин А.М. - Расчёт железобетонных осесимметричных конструкций (оболочек). Госстройиздат, Москва. 1961.
50. Пагаза О.Е. - Определение неразрушающей нагрузки и возможные варианты разрушения рамных систем. Труды ГПИ, № 5. 1961.
51. Прагер В., Ходж Ф.Г. - Теория идеально-пластических тел. Москва, ИЛ. 1956.
52. - Программа расчёта плоских и пространственных стержневых систем MAPCC-103. Гипротис, Москва, 1969.
53. Рабинович И.М. - К расчёту многоярусных рам. Труды ВИС-у, Гостехиздат, Москва. 1931.
54. Рабинович И.М. - Кинематический метод в строительной механике. Изд-во МВТУ, Москва. 1928.
55. Рабинович И.М. - Курс строительной механики стержневых систем. Ч. I, Ч. II. Госстройиздат. 1954.
56. Ряницын А.Р. - Расчёт сооружений с учётом пластических свойств материалов. М. Госстройиздат. 1954.
57. Соколовский В.В. - Теория пластичности. ГИИЛ, Москва. 1950

58. Уразбаев Т.В. - Исследование селевого и сейсмического воздействия на сквозные системы уловителей на примере Заильского Алатау. Дис. на соискание учёной степени кандидата технических наук. 1971.
59. Филин А.П. - Матрицы в статике стержневых систем. Госстройиздат, М., Л. 1966.
60. Хайдуков Г.К. - Расчёт по предельным состояниям ступенчато-вспарушенных панелей. Научн. сообщ. НИИЖБ, вып. 7, Москва. 1960.
61. Херхеулидзе И.И. - Сквозные защитные и регулирующие сооружения на горных реках. Гидрометеопиздат. Москва. 1967.
62. Херхеулидзе И.И. - Сквозные противоселевые гидротехнические сооружения системы Закингми. Труды Закингми, вып. 30(36), Л. 1968.
63. Херхеулидзе И.И. - Некоторые вопросы индустриального противоселевого строительства. Труды Закингми, вып. 40(46), Л. 1972.
64. Хилл Р. - Математическая теория пластичности. Госизд-во технико-теоретической литературы. Москва. 1956.
65. Ходж Ф.Г. - Расчёт конструкций с учётом пластических деформаций. Машгиз, М. 1963.
66. Ходж Ф.Г. - Практическое значение теории предельного равновесия. Пер. ж. Механика, №3. 1959.
67. Хуберян К.М. - Метод расчёта пространственных сквозных селеуловителей на прочность при действии горизонтальных нагрузок. Приложение №1

к монографии И.И.Херхеулидзе "Сквозные сооружения из сборного железобетона на горных реках". Гидрометеиздат, М. 1967.

68. Бурдули Н.С., Кизирия Г.В., Кофман И.С., Херхеулидзе И.И.
Практические методы расчёта пространственной конструкции селеловителя системы ЗакиГМ. Информация Госстроя СССР. 1973.