

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Існуюча методика оцінки вантажопідйомності мостових споруд («Метод класифікації») була розроблена в 1930 році. Усі розрахунки у ній були орієнтовані на «ручні» обчислення, вони не враховують деякі особливості конструкцій. У статті показана можливість застосування метода прямого розрахунку металевих прогнових будов на основі автоматизованих обчислень.

Существующая методика оценки грузоподъемности мостовых сооружений («Метод классификации») была разработана в 1930 году. Все расчеты в ней ориентированы на «ручные» вычисления, они не учитывают некоторые особенности конструкций. В статье показана возможность использования метода прямого расчета металлических пролетных строений на основе автоматизированных вычислений.

The existent carrying capacity evaluation method of operational bridge structures (Classification method) was developed in 1930. All the calculations represented there are oriented on hand computation methods and do not take into account some features of the constructions. The article shows a possibility of using direct calculation method of steel span structures on the basis of automated calculations.

Существующая методика оценки грузоподъемности в России и Украине основана на положениях действующих руководств и правил [1; 2]. Она базируется на принятом в 1930-х годах методе классификации. Его основное преимущество – формальное разделение влияния подвижного состава и несущей способности элементов, что помогает избегать многократного перерасчета сооружений на действие многообразных нагрузок и, как следствие, снизить трудоемкость вычислений, вероятность допустить ошибку. Однако определение грузоподъемности по этой методике имеет недостатки, одним из которых является неточность расчетов элементов со сложными (нетреугольными) линиями влияния усилий. Дело в том, что справочные таблицы эквивалентных нагрузок различных транспортных средств [3] составлены только для треугольных линий влияния, а учет «нетреугольности» нормировано выполнять, используя различные приведения и допуски.

Вместе с тем, элементы со сложными линиями влияния усилий весьма распространены. Их можно обнаружить в фермах проектировки

ПСК, в статически неопределимых конструкциях, например, в неразрезных пролетных строениях, а также в эксплуатируемых мостах с дефектами, связанными с изменением расчетной схемы, или в пролетных строениях, подвергнутых реконструкции. Кроме того, степень сложности линий влияния зависит от расчетных допусков и предпосылок. Например, расчет средних сечений продольных балок железнодорожных ферм допускают вести по расчетной схеме балки на двух опорах и треугольной линии влияния [1; 2]. Однако линии влияния, построенные по более точной расчетной схеме неразрезной балки на упругоподатливых опорах, не являются треугольными.

Исследования показывают, что приведение сложных (зубчатых, двухзначных) нетреугольных линий влияния к треугольной форме в методе классификации может давать ошибку при определении усилий от временной нагрузки до 45 % (в сравнении с прямым расчетом). Например, для элемента фермы конструкции ПСК (линия влияния усилия изображена на рис. 1) ошибка такого приведения составляет 42 %.

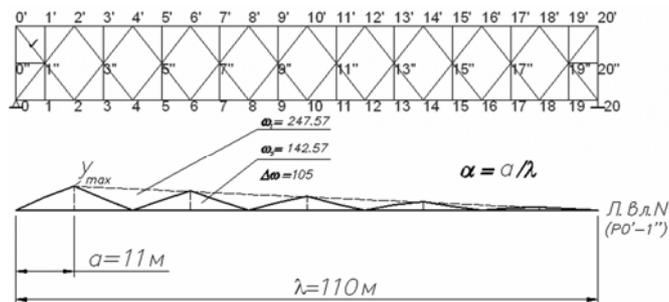


Рис. 1. Пример линии влияния продольного усилия  $N$  элемента фермы ПСК

Описанные упрощения связаны с тем, что существующие нормы ориентированы, прежде всего, на «ручные» вычисления, и поэтому часто не учитывают усложняющих расчетную схему особенностей работы пролетного строения. Вместе с тем, учет таких обстоятельств, как совместная работа основных несущих конструкций с проезжей частью или продольными связями, таких дефектов, как ограничение перемещений пролетного строения (упирание в устой, заклинивание опорных частей и прочее) зачастую требует определения усилий по сложным пространственным расчетным схемам и линиям влияния, что в методе классификации не предусмотрено.

Известно, что перечисленных недостатков лишены матричные методы [4] и методы прямого расчета, для которых характерна высокая точность результатов определения усилий в сложных конструкциях. Но для обработки матрицы напряжений необходимо использовать ЭВМ, а прямой метод обладает большой трудоемкостью, связанной с необходимостью проведения сложных прочностных расчетов для каждой вновь задаваемой эксплуатационной нагрузки. На практике удобно использовать экспериментально-теоретические методы определения грузоподъемности [4; 5], но для них необходимы специальные обследования и испытания.

Отметим далее, что оценка несущей способности и определение условий пропуска нагрузки – это одна из основных задач автоматизированных систем управления содержанием искусственных сооружений (АСУ ИССО [6]). Поэтому решение указанных проблем автор связывает, прежде всего, с использованием прямых или матричных методов, функционирующих в рамках автоматизированных комплексов и систем управления содержанием мостов.

Попытки автоматизировать процесс расчета грузоподъемности металлических пролетных строений методом классификации были предприняты в девяностых годах прошлого века в нескольких вузах (ХабИИЖТ, НИИЖТ, МИИТ и НИИмостов ЛИИЖТа [7–9]), но только в НИЛ мостовых конструкций СГУПСа удалось довести программу расчета грузоподъемности до промышленной эксплуатации и внедрения на сети железных дорог России. Речь идет о расчетном комплексе «АргоМ», который с 1994 года был несколько раз модернизирован. Каждая из версий программы разрабатывалась с учетом существовавшего уровня развития программного обеспечения, решая актуальные для своего периода задачи.

Первая версия «АргоМ v.1» функционировала под управлением операционной системы DOS. Она способна максимально быстро производить расчеты грузоподъемности по руководству 1987 года [1] и передавать результаты в АСУ ИССО первого поколения (АСУ ИССО v.1) [6]. Для АСУ эти данные являются исходными при определении условий пропуска поездной нагрузки по пролетному строению, во время которого выполняется классификация подвижного состава и сравнение классов элементов с классами нагрузок.

Многочисленные обследования и испытания, проводимые в НИЛ мостовых конструкций СГУПСа, позволили создать обширную базу данных по конструкциям пролетных строений для первой версии программы «АргоМ». Информация о металлических пролетных строениях (балках и фермах) представлена в ней большим количеством разнообразных типовых и типичных (наиболее распространенных) проектов – около 130 типов конструкций пролетных строений. Уровень подробности данных очень высок, так как для подсчета грузоподъемности необходима информация о составе каждого элемента, стыка и прикрепления. В этой базе, например, есть информация, полностью описывающая геометрию конструкции, количество и расположение заклепок или болтов, а также данные по условиям эксплуатации и имеющимся повреждениям.

Появление современной операционной системы «Windows» фирмы Microsoft открыло возможность для реализации в программных разработках удобного пользовательского интерфейса, режима многозадачности, современной организации работы с базами данных и т.д. К тому времени (конец 1990-х гг.) появилась качественно усовершенствованная вторая версия АСУ ИССО для «Windows». Связь ее с «АргоМ» оказалась прервана из-за несовместимости операционных сред, в которых функционировали эти программы.

Для решения этого вопроса была поставлена задача по модернизации «АргоМ». Достигнутый уровень развития информационных технологий, а также опыт, полученный при разработке и внедрении первой версии программы и автоматизированной системы АСУ ИССО второго поколения, позволили перейти в 2000–2002 гг. к созданию Автоматизированной расчетно-аналитической системы определения грузоподъемности металлических пролетных строений («Арго М v.2»). Архитектура программы «АргоМ v.2» представлена на рис. 2.

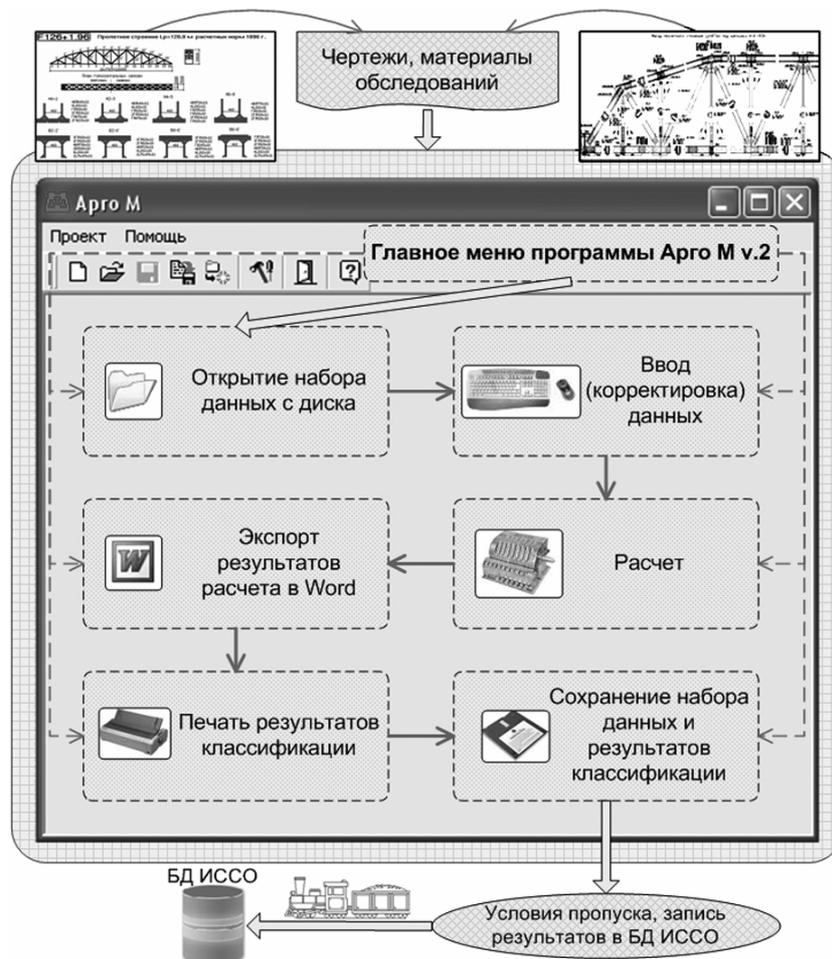


Рис. 2. Архитектура программы «АргоМ v.2»

Программа состоит из единого модуля ввода и редактирования исходных данных, расчета, печати результатов и сохранения их для программы определения условий пропуска.

В сравнении с «АргоМ v.1» версия второго поколения обладает полноценным графическим интерфейсом Windows, в ней присутствуют практически все справочники и таблицы, позволяющие без обращения пользователя к руководству выполнять расчеты грузоподъемности. Результаты программа предоставляет в формате «Microsoft Word» в табличной форме, предусмотренной руководством. Ее сервисные функции позволяют получать детальную информацию об элементах пролетных строений, в них реализованы поддержка данных первой версии «АргоМ», возможность импорта-экспорта в графические редакторы («AutoCAD» фирмы Autodesk), процедуры построения линий влияния ферм (в том числе неразрезных), получение справок и другие функции.

Однако опыт эксплуатации и развития «АргоМ v.2» показал, что единый программный модуль существенно ограничивает возможность модернизации и развития «живого» ком-

плекса. Дело в том, что для использования функций «АргоМ» (например, расчетных) в других приложениях требуется копировать исходный код этих процедур и помещать его в код нового приложения. Такой подход является некорректным в программировании, он влечет за собой дублирование ошибок, существенно затрудняет возможность модернизации комплекса приложений.

Для решения этой проблемы программа «АргоМ v.2» в 2005 году была значительно переработана. На ее основе создана третья версия, работающая с библиотеками интерфейсов и объектно-ориентированной моделью, использование которых допускается и в иных приложениях, например, в «Проводнике АргоМ». Архитектура комплекса вместе с «Проводником АргоМ» представлена на рис. 3.

Связь между составляющими комплекс программы «АргоМ» и «Проводник АргоМ для АСУ ИССО» организована на основе COM технологии. Оба эти приложения используют одни и те же библиотеки интерфейсов и объектную модель. Такое разделение на модули допускает модернизацию отдельных частей без перекомпиляции других.

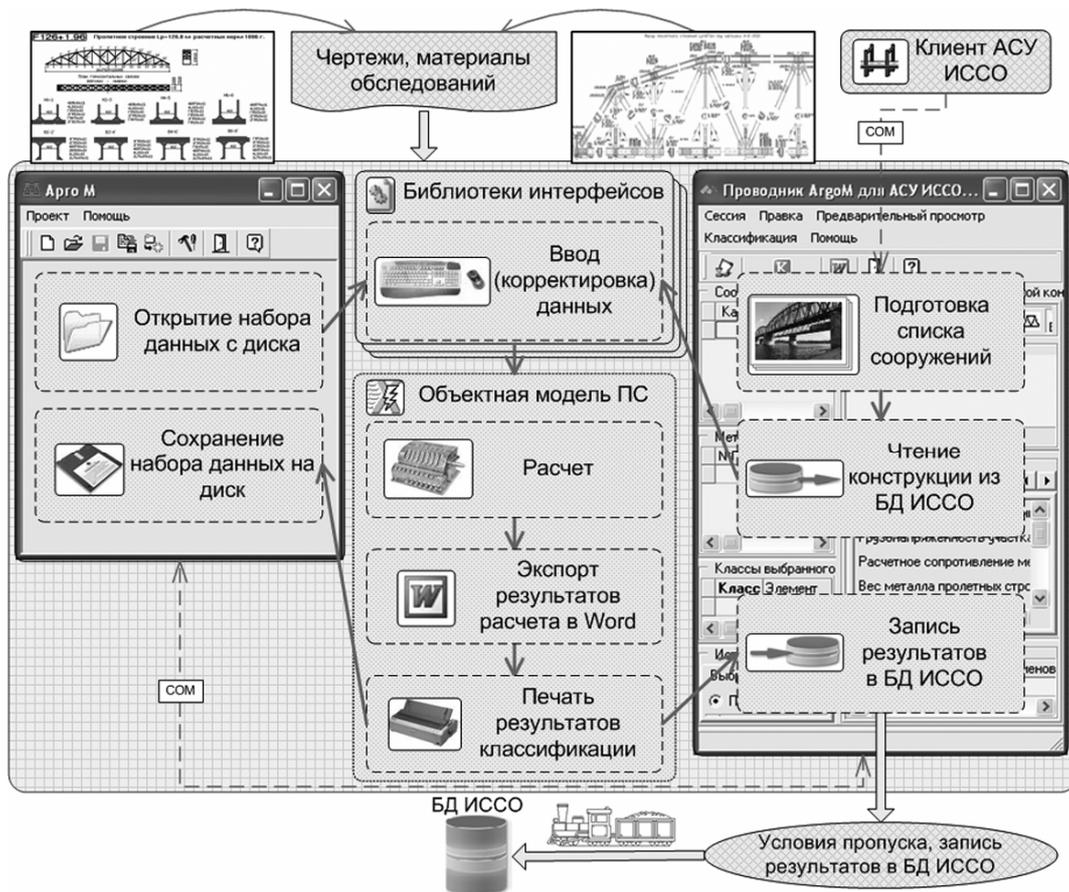


Рис. 3. Архитектура комплекса «АргоМ v.3»

Рассмотрим далее особенности объектно-ориентированной модели и библиотек интерфейсов.

Объектная модель полноценно отражает свойства столь сложной структуры как пролетное строение. Результатом ее разработки стал тип TArgoMProject (понятие «тип» или «класс» заимствовано из объектно-ориентированного программирования, оно обозначает логическую программируемую модель для описания объектов реального мира). Наиболее значимые элементы главного типа «АргоМ» представлены на схеме рис. 4.

Основной тип TArgoMProject включает поля для идентификации пролетного строения – его наименование Name, комментарий пользователя Commentary, код Code, а также общие данные GeneralData, список материалов MaterialList, список балок проезжей части CarriagewayList, консолей ConsoleList и настройки режимов обработки и печати данных Options. Тип общих данных представлен списком полей, содержащих наиболее общую информацию пролетного строения («адрес» сооружения, типовой проект, вид соединений, грузонапряженность участка и другие). Список материалов и другие списки содержат соответствующие им объекты. Далее

под понятием «объект» подразумеваем переменную (экземпляр) какого-либо типа (класса). Каждый «объект» соответствует реальному элементу конструкции или любому иному конкретному объекту. Тип материала TMaterial описан его наименованием и характеристиками (расчетные сопротивления  $R_y$ ,  $R_u$ , модуль упругости  $E$  и другие). Тип балки TBeam описывает ее геометрию (модули балки BeamModuleList – участки с одинаковыми геометрическими размерами) и расчетные сечения CalculationList (вид проверки Type, положение сечения  $x$ , данные для расчетов  $a$ ,  $katet$  и другие). Тип прикрепления балки программа определяет динамически, так как он зависит от вида балки BeamType: для прикрепления продольной балки прикрепление описано типом TBtoP, а для прикрепления поперечной балки – типом TPtoF. Тип консоли TConsole описывает геометрию консоли продольной балки.

Тип TArgoMProject отвлечен от свойств основных несущих конструкций, он описывает лишь общие параметры как фермы, так и главной балки. Более конкретными являются его типы-наследники TBeamProject и TTrussProject. Структура типа TBeamProject (см. рис. 4) проста, он содержит объект «балка» и объект «опорная стойка».

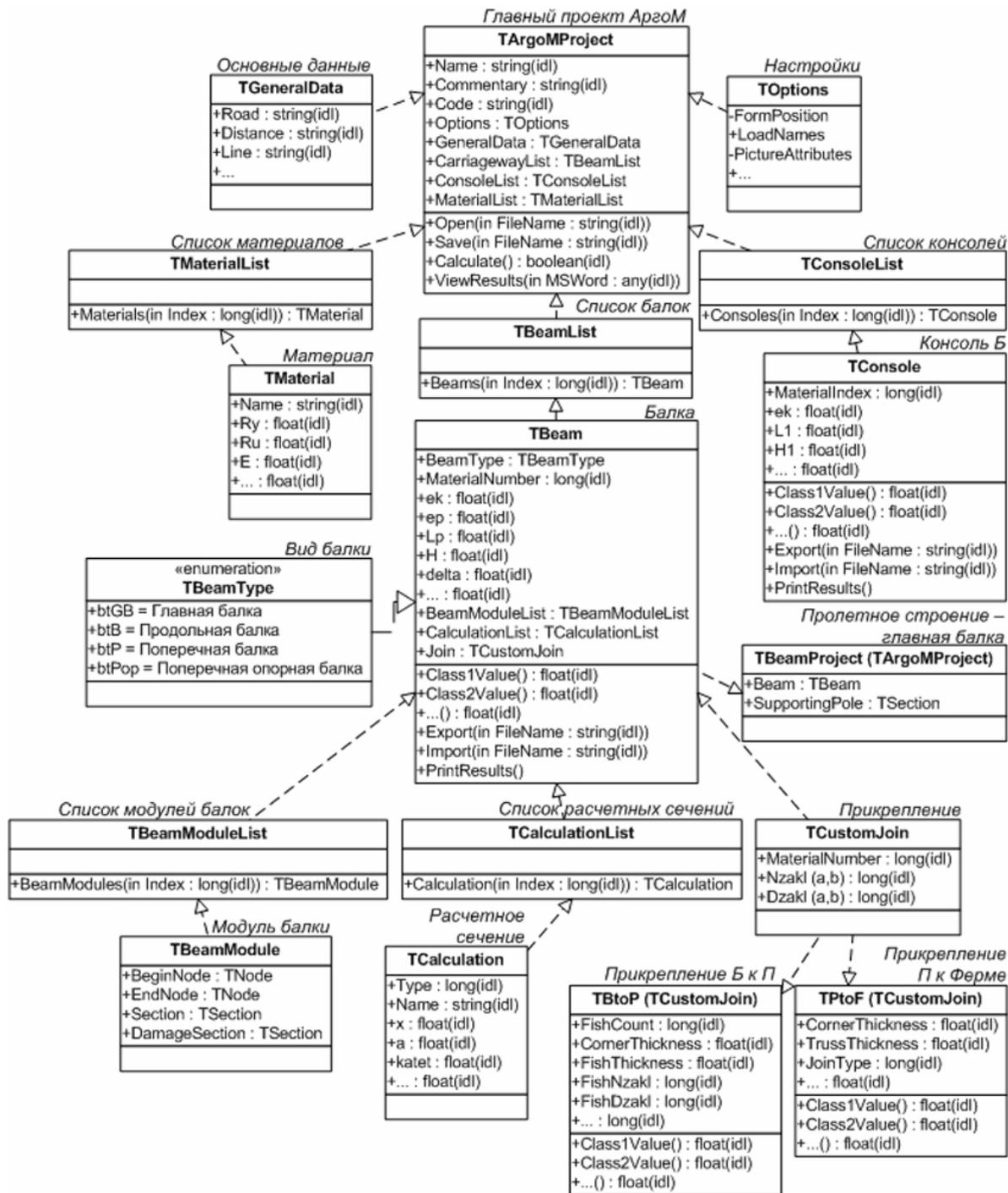


Рис. 4. Структура объектной модели для описания пролетного строения

Схема реализации типа TTrussProject представлена на рис. 5.

Кроме полей, свойств и методов родительского типа, TTrussProject расширен дополнительными данными AdditionData, списками элементов TrussList, сечений SectionList и прикреплений FastenengList. Дополнительные данные необходимы для расчета ферм (описание portalной рамы, данные для расчетов при открытом верхнем поясе и другие). Каждый объект списка элементов фермы характеризует один стержень Truss. В нем содержатся поля с

его наименованием Name, положением в пролетном строении BeginNode и EndNode. Сечения Section и прикрепления Fastening целесообразно описывать в соответствующих списках, а идентификацию производить по порядковым номерам – SectionNumber и FasteningNumber. Тип сечения и прикрепления состоит из списка простых элементов (прямоугольные элементы TRectangle, прокатные уголки TCorner и швеллеры TShveller). Среди свойств простых элементов – их местоположение, собственные размеры и геометрические характеристики.

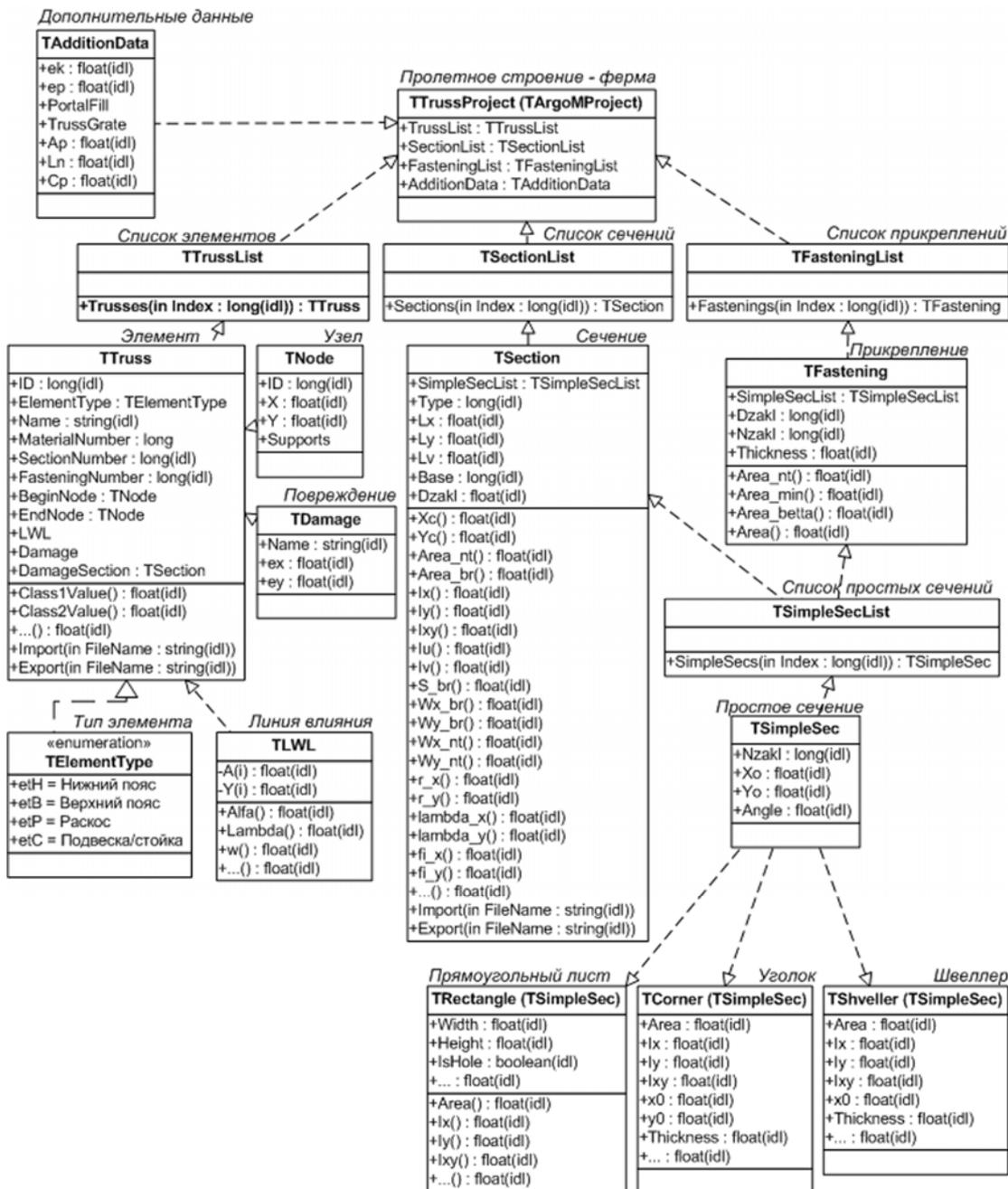


Рис. 5. Структура объектной модели для описания фермы

Использование объектно-ориентированной модели сделало возможным логически выстроить и организовать элементы всей конструкции, описать поведение каждого отдельного звена внутри целого пролетного строения. Любой элемент конструкции соответствует реальному объекту и описан соответствующим типом. Структура каждого типа содержит набор полей (исходных данных) и набор методов их обработки – свойств.

На рис.4 и 5 поля помещены в верхнюю область прямоугольника типа, а свойства – в нижнюю. Свойства, с точки зрения программирования – это функции-обработчики полей объекта. Их результат, как правило, есть основан-

ное на исходных данных вычисление. С точки зрения физического смысла свойство – это интегральная характеристика реального объекта. Например, такое свойство поперечного сечения как момент инерции (Ix на рис. 5), имеет свою функцию, вычисляющую моменты инерции простейших элементов списка SimpleSecList и суммирующую их по известным формулам для приведения геометрических характеристик.

Структура объектов TBeamProject и TTrussProject, разделенная на отдельные элементы, позволяет создавать интерфейсы (динамические библиотеки) редактирования полей только одного конкретного объекта. Общая схема использования такого интерфейса представлена на рис. 6.

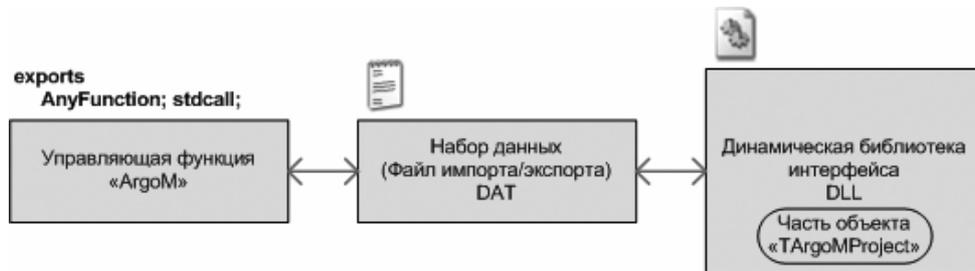


Рис. 6. Использование динамической библиотеки

Управляющая программа подготавливает данные для экспорта и вызывает функцию динамической библиотеки для работы с ними. Результат работы пользователя библиотека записывает в этот же набор данных, который управляющая программа впоследствии импортирует. Например, при создании интерфейса редактирования сечений потребовалось использовать тип TSection. В управляющей программе «ArgoM» (см. рис. 3) имеется вызов функции библиотеки, которая реализует интерфейс редактирования типовых сечений. Пример соответствующего кода представлен на рис. 7.

```

1 begin
2 Section.Export (TempFileName);
3 Result := TypicalEditorExecute (TempFileName,
4                               Application.Handle);
5 if Result = 1 then Section.Import (TempFileName);
6 end;
```

Рис. 7. Код вызова функции редактора типовых сечений

В коде на рис. 7 обозначено:

– Section – поперечное сечение – объект, описанный типом TSection (см. рис. 5);

– Export, Import – методы типа (класса) TSection, позволяющие экспортировать и импортировать данные, описывающие сечение целиком (см. рис. 5) в промежуточный файл;

– TempFileName – имя временного промежуточного файла, для обмена данных класса;

– TypicalEditorExecute – функция динамической библиотеки, вызывающая на экран диалог для редактирования типового сечения;

– Result – возвращаемое функцией TypicalEditorExecute значение. Если результат работы редактора типовых сечений положительный (пользователь подтвердил сделанные изменения), тогда переменной Result присваивается значение, равное единице;

– Application.Handle – дескриптор управляющего приложения.

Преимущество реализованного подхода в том, что составные части комплекса «ArgoM» оказываются независимы друг от друга. Библиотеки интерфейсов и базовый тип TArgoMProject могут быть использованы сторонними программистами в своих разработках. Схема включения его в подобные приложения представлена на рис. 8.

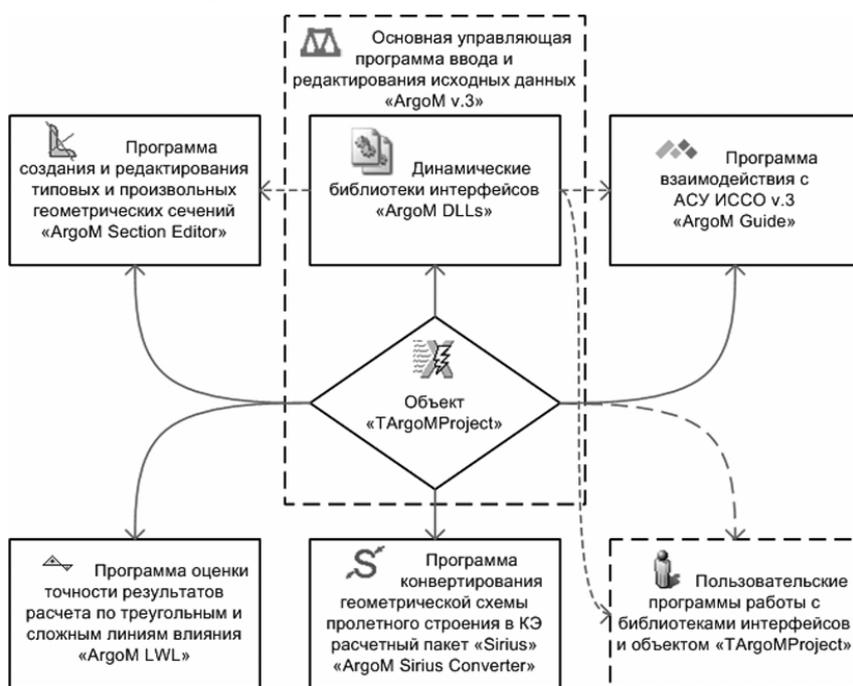


Рис. 8. Схема включения объекта TArgoMProject в интерфейсные приложения

По данной технологии были разработаны управляющие программы: «ArgoM Sirius Converter» (конвертирование данных из «ArgoM» в конечно-элементный расчетный пакет Sirius, разработанный в СГУПС); «ArgoM LWL» (программа оценки точности определения усилий по линиям влияния для разных нагрузок, разработана автором), а также являющийся частью рассматриваемой Автоматизированной системы – «Проводник ArgoM в АСУ ИССО» («ArgoM Guide»).

Основные возможности «ArgoM Guide» таковы:

1. «ArgoM Guide» предоставляет пользователю АСУ ИССО интерфейс расчета грузоподъемности пролетных строений выбранных сооружений. Связь программ осуществлена по СОМ-технологии (см. рис. 3) при помощи встроенного в АСУ объекта автоматизации. «Проводник ArgoM» получает от АСУ ИССО сформированный пользователем список сооружений, пролетные строения которых подлежат расчету. Такой подход удобен и нагляден для инженера, который визуально оперирует списком интересующих его сооружений, размещенных на рабочем столе АСУ ИССО.

2. Определение грузоподъемности металлических пролетных строений выбранного сооружения или списка сооружений. Для осуществления расчета пользователь имеет в распоряжении полноценное расчетное ядро и основ-

ной управляющий интерфейс корректировки данных программы «ArgoM v.3» (см. рис. 3). Для удобства описания наиболее распространенных дефектов реализована универсальная возможность быстрого их ввода. Для задания сплошной коррозии элементов ферм или балок, выколов в балках и т.д. предусмотрены специальные интерфейсные диалоги и функции.

3. Запись результатов расчета в базу данных, где они будут использованы модулем определения условий пропуска поездных нагрузок.

Важнейшим элементом в функционировании рассматриваемой автоматизированной системы является банк данных конструкций типовых и типичных пролетных строений. Металлические пролетные строения железнодорожных мостов всегда были и остаются предметом исследования НИЛ мостовых конструкций НИИЖТа-СГУПСа. За десятки лет деятельности по изучению технического состояния мостов сотрудниками лаборатории была накоплена, систематизирована и каталогизирована обширная информация по металлическим конструкциям мостов. Сейчас в базу АСУ ИССО включен каталог типовых и типичных металлических пролетных строений (свыше 400 штук). На его основе формируется расширенный каталог для расчетов этих конструкций.

С появлением «ArgoM v.3» схема обмена данными в рамках АСУ ИССО v.3 (совместно с БД АСУ ПХ) стала следующей (рис. 9).



Рис. 9. Обмен данными в рамках автоматизированного комплекса по расчету грузоподъемности металлических пролетных строений «ArgoM v.3»

На основе натурных обследований и изучения технической документации пользователь готовит данные для расчета конструкции, используя программу «АргоМ v.3». При их помощи модуль «АргоМ Guide» подготавливает и записывает в «БД АРГО М» следующую информацию:

- данные для условий пропуска нагрузки по сооружению (классы элементов пролетного строения);
- данные для расчета, которые соотносятся с пролетным строением выбранного на рабочем столе АСУ ИССО v.3 сооружения;
- данные для расчета, которые записываются в каталог типовых и типичных конструкций (если это пролетное строение таковым является).

База «АРГО М» является составной частью БД АСУ ИССО, которая, в свою очередь, входит в состав БД АСУ ПХ. Так формируется база данных для расчета металлических пролетных строений.

Следует отметить наличие в БД ИССО электронного каталога поездных нагрузок (свыше 100 схем) и подвижного состава (около 400 схем). Информация представлена наименованием нагрузки, схемой поезда в осях и нагрузками на ось. Наличие в БД ИССО необходимой для расчета грузоподъемности информации, каталога обращающихся поездных нагрузок делает возможным автоматизировать расчет грузоподъемности и условий пропуска, открывает потенциальные возможности для проведения прямых расчетов на заданную эксплуатационную нагрузку.

Преимущества прямого расчета, выполненного «прогонкой» реальной схемы поезда по линии влияния, очевидны – учет соотношения расстояний между осями поезда, уточненный расчет элементов пролетных строений со сложным не треугольным очертанием линий влияния усилий, учет особенностей работы конструкции (пространственная расчетная схема, совместная работа проезжей части с главными фермами и т.д.), учет дефектов, вносящих перераспределение усилий в элементах (упирание свободного торца пролетного строения в соседнее пролетное строение или устой, заклинивание опорных частей, перекос подферменных камней) и другие.

Но так как действующее руководство пока предписывает определять грузоподъемность пролетного строения методом классификации, прямой расчет может быть использован лишь в исследовательских и научных целях, для сравнения и анализа результатов. Выполненные ав-

тором расчеты показывают, что, например, приведение многозначных нетреугольных линий влияния к треугольной форме в методе классификации может давать ошибку при определении усилий от реальной временной нагрузки до 45 %.

В настоящее время на железных дорогах успешно эксплуатируют многофункциональную программу по расчету грузоподъемности металлических пролетных строений на основе действующего руководства 1987 года «АргоМ v.3». Представленный комплекс получил широкое распространение в мостостанциях, а также ряде научных и образовательных учреждений (СГУПС, МИИТ). Это означает, что уже сейчас существует возможность централизованных автоматизированных расчетов грузоподъемности железнодорожных мостов, в том числе с использованием прямого метода оценки несущей способности на заданную нагрузку.

На основании приведенных данных можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время разработана и внедрена третья версия расчетного комплекса по оценке грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов «АргоМ v.3».

2. В базу данных АСУ ИССО включен банк типовых конструкций, на основе которого возможно выполнение автоматизированных расчетов металлических пролетных строений.

3. В программу «АргоМ v.3» входят объектная модель пролетного строения и интерфейсные модули, которые могут быть использованы сторонними пользователями в собственных программных разработках, а сама программа приспособлена для дальнейшего развития.

4. Комплекс «АргоМ» имеет потенциальные возможности для реализации методики прямых расчетов элементов пролетных строений на любую эксплуатационную нагрузку.

Среди перспективных задач по развитию автоматизированного комплекса «АргоМ» можно выделить следующие:

1. Реализация методики прямого расчета в рамках железной дороги. Внедрение метода прямого расчета как уточняющего, по сравнению с методом классификации.

2. Расширение базы данных для расчета пролетных строений. Необходимо создать банк данных как можно большего числа конструкций. Это необходимо для автоматизированного определения условий пропуска нагрузки по металлическим пролетным строениям.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководство по определению грузоподъемности металлических железнодорожных мостов. Утв. Гл. упр. пути МПС 02.08.1985 г. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
2. Правила визначення вантажопідйомності металевих прогонових будов залізничних мостів. Затверджено та надано чинності наказом Міністерства транспорту України від 05.12.2001. – К.: 2003. 382 с.
3. Руководство по пропуску подвижного состава по железнодорожных мостам. Утв. Гл. упр. Пути МПС 04.07.1991. – М.: Транспорт, 1993. – 368 с.
4. Ефимов П. П. Усиление и реконструкция мостов: Монография / СибАДИ. – Омск, 1996. – 154 с.
5. Временное руководство по определению грузоподъемности мостовых сооружений на автомобильных дорогах. ОДН 218.0.032-2003.
6. Бокарев С. А. Управление техническим состоянием искусственных сооружений железных дорог России на основе новых информационных технологий. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2002. – 276 с.
7. Кирста А. А. Автоматизированная система расчета грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов / А. А. Кирста, А. С. Ткач, А. В. Сеницын и др. // Исследования искусственных сооружений на железнодорожном транспорте. М. – 1990. – С. 92–95.
8. Гусев Д. Е. Автоматизированное определение грузоподъемности железобетонных балочных разрезных пролетных строений мостов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1992. – 20 с.
9. Кирста А. А. Автоматизированная подсистема определения геометрических характеристик составных сечений металлических мостов / А. А. Кирста, В. М. Лобода // Исследования искусственных сооружений на железнодорожном транспорте. – М., 1990. – С. 19–27.

Поступление в редакцию 04.12.2005.