

Анализ некоторых положений СНиП 2.03.01-84* с использованием программы АРБАТ

Большинство программных продуктов, предназначенных для расчета элементов железобетонных конструкций, требуют от пользователя информацию и выдают результаты в терминах СНиП, то есть оперируют с отдельным сечением железобетонного элемента. В тоже время, для большинства инженеров информация о несущей способности отдельных сечений носит лишь промежуточный характер, а главный вопрос, на который должна отвечать программа, может быть сформулирован следующим образом:

Обеспечена ли в соответствии с требованиями СНиП несущая способность элемента железобетонной конструкции с заданными размерами, материалом, нагрузками, условиями эксплуатации, размещением арматуры и т.п.?

Именно этот подход реализован в программе АРБАТ при решении задач подбора арматуры и проверки несущей способности таких элементов железобетонных конструкций, как неразрезные балки, колонны и плиты, опертые по контуру. Расчеты выполняются с учетом предельных состояний первой и второй группы для расчетных сочетаний усилий (РСУ), выбираемых автоматически в зависимости от заданных расчетных нагрузок в соответствии с требованиями СНиП 2.01.07-85* [1] и СНиП 2.03.01-84* [2].

Подбор и проверки предусмотрены для железобетонных конструкций без предварительного напряжения. Предполагается, что конструкции изготовлены из тяжелого, мелкозернистого или легкого бетонов с применением арматурной стали класса А-I, А-II, А-III, А-IV, А-V и А-VI, арматурной проволоки класса ВР-I или арматуры классов А400С, А500С, предусмотренных документом [3].

Кроме указанных функций, программа выполняет в определенной степени и роль справочника, с помощью которого можно получить данные о сортаментах и характеристиках арматуры, нормативных и расчетных сопротивлениях бетона, коэффициентах условий работы бетона и предельных прогибах.

Программа АРБАТ позволяет за считанные секунды просчитать ряд однотипных задач и получить результаты по широкому спектру произведенных проверок. Это дает возможность исследовать зависимость напряженно-деформированного состояния элемента при изменении различных входных параметров.

Первая часть статьи представляет собой краткое описание программы (более полно с описанием программы можно ознакомиться в [5]), которая используется как инструмент исследования, вторая — анализ некоторых результатов этих исследований.

Разработка выполнялась с расчетом не только на опытного проектировщика, но и на пользователей, которые не обязательно должны ориентироваться во всех тонкостях применения нормативных документов, какими являются как СНиП 2.03.01-84*, так и документы, на которые в СНиП даются внешние ссылки. Пользователь должен быть уверен, что применение специализированной программы избавит его от сомнений относительно полноты и качества выполненных проверок конструкции на соответствие требованиям норм.

Чтобы программа выполняла функции квалифицированной экспертизы, разработчики сознательно отказались от включения в нее режимов работы и проверок, не определенных в СНиП 2.03.01-84* (например, проверки на трещиностойкость при общем случае нагружения). Реализация таких режимов означала бы, что допускаются отступления от норм или нестрогое следование им. Одновременно, программа автоматически запрещает работу с конструктивно неудачными сечениями. С этой целью предусматривается контроль исходных данных, осуществляются проверки на выполнение конструктивных ограничений СНиП (например, правил расстановки арматурных стержней).

Поскольку любой набор нормативных требований, как правило, может быть представлен в форме списка неравенств вида

$$F_i(S,R) \leq 1 \quad (i = 1, \dots, n),$$

где F — функция основных переменных, S — обобщенные нагрузки (нагрузочные эффекты), R — обобщенные сопротивления, то, обозначив $K_i = F_i(S,R)$, вводится понятие о коэффициенте использования ограничения (K_i), а критерий проверки представляется в форме

$$K_{max} = \max_i \{K_i\} \leq 1.$$

Само значение K_i при этом определяет для элемента (узла, соединения, сечения и т.п.) имеющийся запас прочности, устойчивости или другого нормируемого параметра качества (фактора). Если требование норм выполняется с запасом, то коэффициент K_i равен относительной величине исчерпания нормативного требования (например, $K_i = 0,7$ соответствует 30%-му запасу). Значение $K_i > 1$ свидетельствует о нарушении того или иного нормативного требования, то есть характеризует степень перегрузки.

Во время проверки конструкции выводится значение K_{max} — максимального (то есть наиболее опасного) из обнаруженных значений K_i и указывается тип проверки (прочность, ширина раскрытия трещин и т.п.), при которой этот максимум реализовался. По специальному запросу можно получить результаты детального

диагностирования (рис. 1), что дает пользователю возможность в необходимых случаях оперативно принять решение об изменении поперечного сечения элемента, его армирования или других параметров проектирования.

Железобетонные конструкции должны удовлетворять требованиям расчета по несущей способности (предельные состояния первой группы) и по пригодности к нормальной эксплуатации (предельные состояния второй группы). Предельные

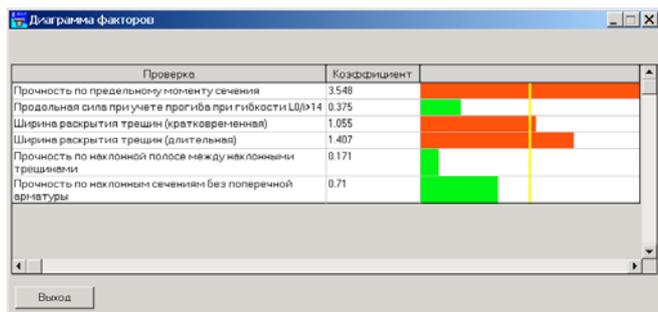


Рис. 1. Представление результатов расчета в виде диаграммы факторов

условия определяют для усилий определенную границу. В более общем случае предельные условия по прочности могут быть заданы в виде системы неравенств — ограничений. Такая система неравенств задает некоторую область, описывающую прочность сечения для рассматриваемого вида напряженного состояния. Такую область удобно представить в координатах продольная сила – момент ($N-M_y$, $N-M_z$), момент – момент (M_y-M_z), продольная сила – поперечная сила ($N-Q_y$, $N-Q_z$). Когда такое неравенство не выполняется, элемент конструкции, к которому относится рассматриваемое усилие, вступает в новую область поведения.

В программе АРБАТ в режиме **сопротивление сечений** реализована возможность для каждого из предусмотренных в программе типов сечений (прямоугольного, таврового, двутаврового, кольцевого) построить такие области. Результаты расчета отображаются в виде **кривых взаимодействия**, ограничивающих область несущей способности сечения при действии на него пар усилий, внутри которой располагаются точки с допустимыми парами рассматриваемых усилий, т.е. усилиями, для которых коэффициент использования несущей способности сечения $K_{max} \leq 1$ (рис. 2). При этом остальные усилия в сечении полагаются равными нулю.

С помощью курсора можно обследовать представленную на графике область изменения усилий. Каждому положению курсора соответствует определенная пара числовых значений усилий, которая отображается рядом с графиком. Одновременно на экран выводится максимальное значение коэффициента использования K_{max} , соответствующее этим усилиям, и тип проверки, при которой он вычисляется.

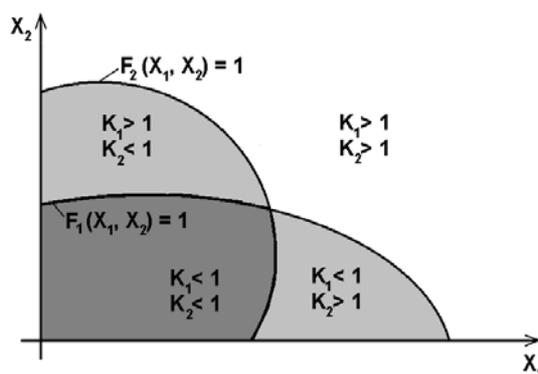


Рис. 2. Геометрическая иллюстрация к построению кривой взаимодействия

Для любого положения курсора в поле отображения кривой взаимодействия можно получить диаграмму факторов для всех выполняемых проверок.

В качестве исходных данных задаются форма и размеры сечения, характеристики и размещение в сечении продольной и поперечной арматуры, геометрические и расчетные длины элементов, случайные эксцентриситеты, вид, класс и коэффициенты условий работы бетона, условия твердения. Предусмотрена возможность проверки несущей способности сечения с учетом второго предельного состояния (расчет по трещиностойкости).

Хотелось бы отметить, что во многих случаях (в частности при несимметричном армировании) область

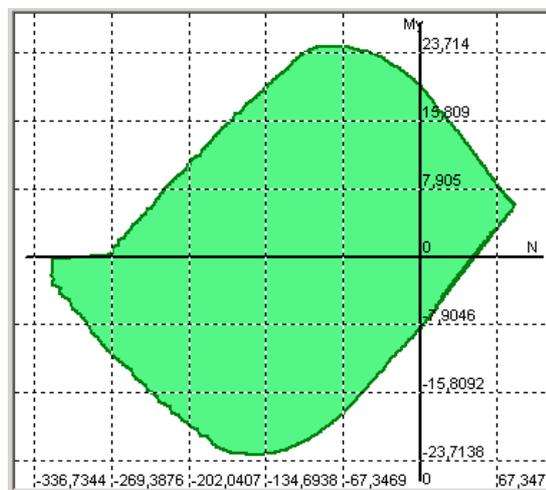


Рис. 3. Кривые взаимодействия

несущей способности является **невыпуклой** (см. рис. 3).

Последствия этого факта могут носить катастрофический характер, поскольку большинство проектировщиков уверены в том, что конструкция, которая удовлетворяет требованиям СНиП под действием двух различных нагрузок, удовлетворяет также всем требованиям норм, если она находится под действием, например, загрузки, являющегося полусуммой этих нагрузок. Невыпуклость области несущей способности говорит о том, что это не всегда верно.

В программе предусмотрены информационные и функциональные режимы работы. Каждому режиму соответствует кнопка выбора в главном окне программы.

Первые пять режимов являются в некотором смысле вспомогательными и обеспечивают доступ к нормативной и справочной информации. К ним относятся:

- **Класс бетона** (СНиП 2.03.01-84*) — приведены расчетные (для предельных состояний первой группы), а также расчетные и нормативные (для предельных состояний второй группы) сопротивления бетона по прочности на сжатие (табл. 12, 13 СНиП 2.03.01-84*);
- **Марка бетона** — приведены расчетные (для предельных состояний первой группы), а также расчетные и нормативные (для предельных состояний второй группы) сопротивления бетона по прочности на сжатие для различных марок бетонов. Информация может использоваться для корректировки указанных параметров при экспертизе элементов конструкций, запроектированных в соответствии со СНиП II-21-75;
- **Арматура** — приведены характеристики арматуры (таб. 19 и 22 СНиП 2.03.01-84*), а также сортамент арматуры;
- **Коэффициенты** — приведены коэффициенты условий работы бетона в зависимости от различных факторов, обуславливающих их введение (таб. 15, 16 и 17 СНиП 2.03.01-84*);
- **Предельные прогибы** — даны таблицы 19, 21, 22 СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия» с ограничениями на прогибы элементов конструкций.

Следующие режимы объединены в три группы и являются функциональными. В группу **Экспертиза** входят режимы для проверки конструктивных решений элементов железобетонных конструкций на соответствие требованиям СНиП по прочности и трещиностойкости. К ним относятся:

- **Сопротивление сечений** — в этом режиме проверяется несущая способность и строятся кривые взаимодействия, ограничивающие область несущей способности сечения, для пар усилий $N - M_y$, $N - M_z$, $M_y - M_z$, $N - Q_z$, $N - Q_y$.
- **Прогиб балки** — вычисляются прогибы в сечениях неразрезной балки согласно требованиям СНиП;
- **Экспертиза балки** — выполняется экспертиза на соответствие требованиям норм (по предельным состояниям первой и второй групп). Рассматривается изгиб в одной силовой плоскости;
- **Экспертиза колонны** — выполняется экспертиза на соответствие требованиям норм (по предельным состояниям первой группы — для внецентренно сжатых и растянутых колонн с двухосным эксцентриситетом, и по предельным состояниям первой и второй групп — для внецентренно сжатых и растянутых колонн с одноосным эксцентриситетом);

- **Экспертиза плиты** — выполняется экспертиза на соответствие требованиям норм (по предельным состояниям первой и второй групп).

В группу **Подбор арматуры** включены режимы обеспечивающие автоматический подбор арматуры в балках и колоннах:

- **Подбор арматуры в балке** — выполняется подбор арматуры в многопролетной железобетонной балке по прочности и трещиностойкости при изгибе в одной силовой плоскости;
- **Подбор арматуры в колонне** — выполняется подбор арматуры в железобетонной колонне.

В группу **Местная прочность** включены режимы обеспечивающие проверку несущей способности элементов конструкций. Сюда входят проверки на **местное сжатие**, **продавливание** (для плитных конструкций), **отрыв** (для мест сопряжения конструкций), а также экспертизу **закладных деталей и коротких консолей**.

Форма представления несущей способности сечений в виде соответствующих графиков дает общую картину о сопротивлении данного сечения действию внешних сил. Благодаря этому появилась возможность наглядно проследить изменение значений различных нормативных критериев при изменении усилий.

В процессе разработки и эксплуатации программы АРБАТ был выявлен целый ряд ситуаций, в которых получаемые результаты представляются по крайней мере нелогичными. Некоторые примеры с описанием полученных результатов мы приводим ниже.

I. Расчет по предельным состояниям второй группы. Рассмотрим пример расчета по предельному состоянию второй группы (3-я категория трещиностойкости). Формула (144) СНиП 2.03.01-84* для определения ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента, кроме общеизвестных недостатков эмпирического подхода (отсутствие ясного физического смысла, ограниченная область применения и др.) учитывает приближенно либо не учитывает вообще влияние целого ряда факторов. Последнее приводит в одних случаях к необоснованному увеличению расчетной ширины раскрытия трещин (элементы с низкими процентами армирования), а в других (элементы с высокими процентами армирования), наоборот, к уменьшению.

При определении ширины раскрытия трещин a_{crc} не учитывается работа бетона растянутой зоны. В элементах (не слабоармированных), для которых коэффициент Мурашова ψ_s , учитывающий работу бетона растянутой зоны, близок к единице, это не приводит к большим погрешностям, но для слабоармированных элементов данное обстоятельство является одной из причин превышения расчетных значений a_{crc} над опытными. Поэтому в программе АРБАТ проводится уточнение расчета a_{crc} для слабоармированных элементов в диапазоне $M_{crc} \leq M_r \leq M_0$ (см. п.4.14 СНиП 2.03.01-84*).

На рис. 4 приведен график несущей способности слабоармированного сечения с учетом предельного состояния второй группы, полученный по программе АРБАТ с учетом уточнения расчета a_{cre} в диапазоне $M_{cre} \leq M_r \leq M_0$. Для примера, приведенного на рис. 5, изъят формулы (144) СНиП хорошо виден в нижней части графика (при внецентренном сжатии) в виде так называемого “зуба”.

II. Подбор арматуры в слабоармированных сечениях. Некоторые результаты армирования, полученные в строгом соответствии с нормами, могут представляться нелогичными. При этом у пользователей возникает сомнение относительно корректности

Прямоугольное сечение 30×60 см
 армировано арматурой класса А-III,
 нижняя арматура — $2\varnothing 8$,
 верхняя арматура — $2\varnothing 10$,
 бетон класса В-25 ($\gamma_{b2}=0,9$),
 защитный слой $a_1=a_2=3$ см.
 3-я категория трещиностойкости,
 условия эксплуатации конструкции в помещении,
 влажность бетона - естественная,
 влажность воздуха окружающей среды 40-75 %,
 допустимая ширина раскрытия трещин:
 непродолжительная — 0,4 мм,
 продолжительная — 0,3 мм.

Рис. 4. Область несущей способности слабоармированного сечения

полученных результатов. В качестве примера приведем следующую ситуацию, на которую обращают внимание пользователи программы. При подборе арматуры в однопролетной балке прямоугольного сечения, нагруженной сосредоточенной силой в середине пролета, при увеличении ширины сечения суммарная площадь арматуры ведет себя немонотонно (сначала происходит увеличение площади арматуры, затем при некоторой ширине площадь арматуры падает, а при дальнейшем увеличении ширины вновь начинает расти (рис. 5).

Анализ показывает, что расчет, выполненный программой АРБАТ, корректен. Первоначальный рост площади арматуры определяется тем, что в соответствии с таблицей 38 СНиП 2.03.01-84*, следует использовать конструктивную арматуру, площадь которой растет при увеличении ширины сечения. Уменьшение площади арматуры при некоторой ширине связано с тем, что прекращается образование трещин (то есть при меньшей ширине сечения на подобранную площадь арматуры влияло не только условие прочности, но и ограничение на ширину раскрытия трещин), а дальнейший рост этого параметра определен тем, что сечение становится слабоармированным и его несущая способность исчерпывается одновременно с образованием трещин в растянутой зоне. Известно, что исчерпание несущей способности элементов одновременно с образованием трещин приводит к хрупкому, внезапному обрушению этих конструкций и поэтому особенно опасно. Согласно п. 1.19 СНиП 2.03.01-84*, площадь сечения продольной растянутой

арматуры следует увеличить по сравнению с требуемой из расчета по прочности не менее чем на 15%.

Поднятые авторами вопросы (их список можно было бы продолжить) во многом связаны с позицией разработчиков программы АРБАТ, которая заключается в стремлении строго следовать указаниям норм, ограничивая класс решаемых задач, когда нормы не рассматривают соответствующий случай. Естественно, что хотелось бы работать с более общими правилами, в то время как СНиП 2.03.01-84* часто ограничивается рассмотрением частных случаев (например, кручение только прямоугольных сечений).

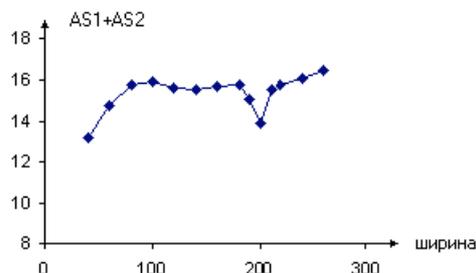
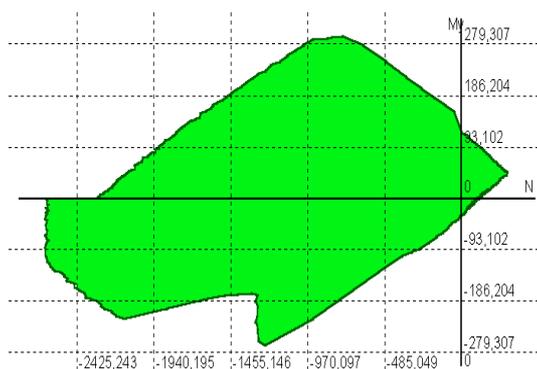


Рис. 5. График изменения суммарной площади арматуры при увеличении ширины сечения

Библиографический список

1. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия / Минстрой России. — М.: ГП ЦПП, 1996. — 44 с.
2. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции / Минстрой России. — М.: ГП ЦПП, 1996. — 77 с.
3. ТСН 102-00. Железобетонные конструкции с арматурой классов А500С и А400С / Территориальные строительные нормы г. Москвы /
4. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры» (к СНиП 2.03.01-84*) / ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. — М.: Стройиздат, 1996. — 188 с.
5. Белокопытова И.А., Криксунов Э.З., Микитаренко М.А., Перельмутер М.А. «АРБАТ» — программа для расчета железобетонных строительных конструкций // CADmaster. — 2001. — №4.