

Ю. А. Шишков,

ООО «Новосибирский государственный проектный институт», Новосибирск

Сейсмостойкие фундаменты уникальных и высотных зданий башенного типа

В помощь проектировщику и заказчику

Проектирование и строительство сейсмостойких зданий повышенной этажности, как показывает практика, представляет собой весьма сложную, но все же, решаемую инженерную задачу.

С ростом этажности зданий усложняются их проектные решения: видоизменяются каркасы и конфигурация зданий в плане и по высоте, используются новейшие достижения в технологии, сверхпрочные строительные материалы и т.п.

С целью снижения негативного влияния ветровых и сейсмических нагрузок высотные здания и сооружения приобретают более плавные очертания - переходя от прямоугольных и квадратных в плане (в том числе с закругленными углами), к круглым, либо в виде трилистника. При значительной высоте зданий, достигающей 200-400 м, вопрос выбора конструктивной схемы здания и особенно фундаментов, как уже было сказано, становится чрезвычайно сложной задачей.

Что же предлагается в качестве фундаментов для таких объектов?

В данной статье рассматриваются технические решения подземных частей здания, включая каркас подземной части, обратную засыпку пазух с наклонными откосами из материалов, поглощающих сейсмические колебания вместо стен подвалов, а также внешний фундамент стаканного типа по контуру котлована. Каркас расположен в многоярусном подвале на плитном автономном фундаменте с элементами универсальной сейсмозащиты на надежном искусственном основании.

Это обеспечивает:

- возможность выполнения СМР в глубоком котловане и защиту от грунтовых вод в ходе строительства и эксплуатации;
- снижение сейсмических воздействий за счёт замены вертикальных стен подвала наклонными стенами-откосами;

- повышение несущей способности и устойчивости при работе на вертикальные и горизонтальные нагрузки за счет включения в работу наклонных стен по контуру котлована (по аналогии с пирамидальным фундаментом);
- снижение величины крена надземной части здания или сооружения от вертикального положения в ходе строительства и при эксплуатации.

Аналогичные технические решения сейсмостойких фундаментов и подземных частей зданий повышенной этажности были изложены ранее автором в ряде публикаций [1-4] и др., в том числе для обычных, а также просадочных и слабых грунтов.

1. Общие принципы и подходы

- Обеспечение несущей способности и надежности надземной части высотных зданий башенного типа напрямую зависит от надежности фундаментов и подземной части здания, ввиду их совместной работы. Иными словами, повышая несущую способность основания и фундаментов, можно достичь усиления надземной части и повысить в целом надежность здания. При использовании систем сейсмоизоляции для высотных зданий с учетом п.4.6 СП 14.13330.2011 (СНиП II-7-81*) предполагается осуществление строительства таких объектов на площадке с благоприятными грунтовыми условиями, соответствующими I-ой категории по сейсмическим свойствам, мощностью более 30 м от планировочной отметки, согласно указанному СП табл.1, примеч. п.4. Очень важно, что при этом условии фоновая сейсмичность района площадки

может быть снижена на 1 балл, что является весьма существенным.

- Если иметь ввиду высокую сейсмичность, можно полагать, что речь идет о горной местности с выходом скальных пород на поверхность, или залегающих, как правило, близко к ней хотя бы на отдельных участках. В этом случае выбор оптимального варианта площадки со скальными грунтами вполне обоснован, что подтверждается, например, опытом строительства первого моста через реку Обь в г.Новосибирске, причем даже в несейсмических условиях и, в основном, на равнинной местности. Как исключение (при конкретном проектировании) в качестве основания могут быть приняты грунты II-й категории по сейсмическим свойствам, при условии улучшения их до соответствия I-ой категории по аналогии с рекомендациями в монографии [5] на стр.349,356-357,427.

Наиболее полный анализ технического решения и геотехнического обоснования высотного строительства, в том числе подземной части, изложен также в трудах Международной конференции в г.С-Петербурге в 2008 году [6].

- Объемное решение сооружения башенного типа, как наиболее оптимальное в виде усеченной пирамиды с наклонными гранями, принято условно (из книги американского конструктора В. Шуллера «Конструкции высотных зданий», стр.107 [7]).

Можно отметить, что аналогичное (или весьма близкое) принципиальное решение башни предполагается для строительства в г. Грозном (судя по фотографии с макета, представленного на презентации в этом городе, опубликованной в сентябре текущего года газетой «Комсомольская правда»).

- Конструкции каркаса надземной части в данной статье не рассматривались. Предполагается, что каркас ее стальной, пространственный с колоннами, ригелями, обвязочными балками и наклонными диагональными связями по наружному периметру.

Причем диагональные связи вместе с колоннами и обвязочными балками не только обеспечивают жесткость при работе каркаса на горизонтальные нагрузки, но и частично работают как наклонные колонны на вертикальные нагрузки. Согласно схеме работы [7], такая система наиболее эффективна для очень высоких зданий. Дополнительно в целях повышения надежности (прочности, жесткости и пожарной безопасности) можно рекомендовать в конкретном проекте пред-

усмотреть обетонировку (с армированием) стальных наружных колонн (по всей высоте здания), а также внутренних колонн подвальных и нижних этажей.

- В рассматриваемом случае, с учетом повышения надежности, предполагается также, что объект при землетрясениях в результате толчков может подвергаться воздействию не только горизонтальных, но также наклонных и значительных вертикальных сейсмических нагрузок в различном сочетании их с короткими промежутками по времени между ними (как это произошло, например, при землетрясении в Ленинке 8 декабря 1988 г.), так как объект расположен условно в эпицентральной зоне с расчетной сейсмичностью 9 баллов [8].

На основе имеющегося опыта проектирования попытаемся сформулировать основные критерии решения поставленной задачи и принципы выбора наиболее оптимальных решений в общем виде, хотя в каждом конкретном случае, конечно, могут возникнуть и дополнительные факторы, требующие уточнения.

Эти критерии и принципы следующие:

- зависимость надежности зданий при землетрясениях от правильности их объемно-планировочных и конструктивных решений, а также мер активной сейсмозащиты на контакте грунтов оснований и подземной части на различные виды сейсмических воздействий (с учетом п.4.6 вышеуказанного СП);
- допущение возможности местных повреждений отдельных конструкций, согласно СП 14.13330.2011 (СНиП II-7-81*) табл.5, что может быть целесообразно экономически, а в отдельных обоснованных случаях и технически. Такое допущение должно быть предусмотрено заранее при проектировании и при условии гарантированного обеспечения безопасности людей, а также несущей способности и устойчивости каркаса здания в целом;
- максимальное заглубление подземной части зданий в грунты оснований является оптимальным, как с целью снижения сейсмических воздействий, так и обеспечения устойчивости надземной части;
- необходимость учета крутящего момента относительно вертикальной оси здания или сооружения согласно п.5.15 вышеуказанного СП.

2. Принятые принципиальные решения

Схема сейсмостойкого здания (сооружения) условно показана на рис.1.

При реальном проектировании необходимо учитывать весь комплекс взаимосвязанных конструктивных решений, изложенных выше, приводящих к снижению сейсмических воздействий.

Основной отличительной особенностью проектных предложений является первоочередное выполнение конструкций котлована с укрепленными откосами в виде наклонных стен по периметру здания.

Подземная часть многоэтажного каркасного здания максимально заглублена ниже нулевой отметки, предположительно на 3-5 этажей, в которых могут размещаться, например, вспомогательные производственные и складские помещения, что является оптимальным с учетом технологических требований и обеспечения устойчивости здания, а также уплотнения городской застройки и высокой стоимости земельных участков. Согласно рекомендациям вышеуказанного СП п.4.7, на нижнем подвальной этаже предусмотрена установка станции наблюдения за динамическим поведением конструкций и грунтов, а также контроля за элементами сейсмоизоляции согласно п.6.17.12.

На рис.2 показан фрагмент подземной части здания, включая конструкции фундамента на катковых шаровых опорах, после его возведения и стабилизации осадок.

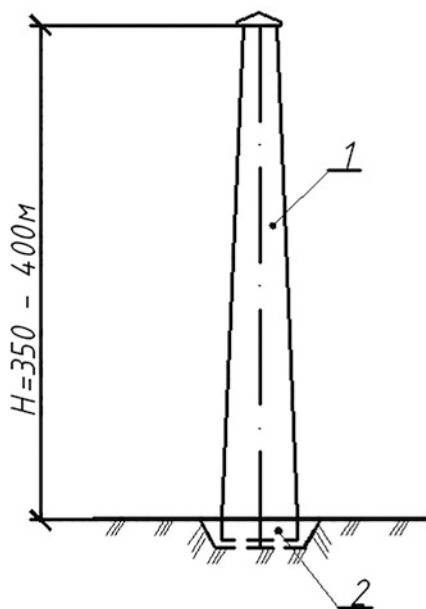


Рис.1. Схема сейсмостойкого высотного здания (сооружения) башенного типа с подвалом

1. Надземная часть
2. Подземная часть (включая подвал и монолитные железобетонные фундаменты по контуру котлована)

3. Рекомендуемый порядок осуществления строительно-монтажных работ

- После выполнения котлована производится отсыпка горизонтальной гравийно-песчаной подушки 1 в основание днища запроектированных фундаментов; выравнивание наклонных откосов обетонированием их поверхностей монолитным железобетоном 2 в виде подготовки повышенной прочности, а затем и по горизонтальной подушке с предварительной укладкой по верху ее герметизирующего материала (не показано) для предохранения от протечки цементного молока при бетонировании.

- После чего выполняется гидроизоляция из геомембраны-экрана, являющейся одновременно сейсмоизоляцией 3 (например, 2-слойной из плоского и гофрированного полимерных листов для создания сминаемого зазора между ними и повышения демпфирования боковых поверхностей стен котлована, а также из 2-х плоских листов в уровне днища, учитывая значительные нагрузки сжатия).

- После бетонирования внутренних стен по периметру котлована и плиты днища пространственного в виде чаши коробчатого фундамента 4 обеспечиваются благоприятные условия для выполнения дальнейших строительных работ. Отметим особо, что принятое решение о строительстве объекта на скальных грунтах максимально повысило надежность оснований и фундаментов, исключило необходимость их усиления и применения традиционных свайных фундаментов, существенно снизило трудоемкость строительства и его стоимость.

- Промежуточная подушка 5 между коробчатым фундаментом 4 и автономным фундаментом 8 выполняется из слабосжимаемого песчано-гравийного грунта с включением в ее составе сборных железобетонных шаровых опор большего 6 и меньшего 7 диаметров, разложенных в толще подушки в особом порядке, как в плане, так и по высоте. Решение защищено патентом СССР № 1774976 [9]. Использовалось при проектировании объектов отрасли Минрадиопрома СССР в 90-х годах прошлого столетия, имеется ряд публикаций по этому вопросу, в том числе за рубежом, причем для различных вариантов решений фундаментов и оснований. Например, статья автора в журнале БСТ № 9 в 1995 году «Сейсмостойкие железобетонные плитные фундаменты на катковых опорах».

При строительстве новых объектов на Алтае после землетрясения там, в 2003 году, институтом Запсибнипиагропром в качестве

варианта шаровых опор были применены каменные валуны двух типоразмеров с демпферными прокладками по верху из двух сплошных полимерных листов ЗАО «Техполимер».

- Основные опоры 6, на которые частично опирается фундаментная плита, и дополнительные, промежуточные опоры 7 меньшего размера, укладывают с таким расчетом, чтобы между ними и низом фундаментной плиты 8 было расстояние, ориентировочно равное ожидаемой осадке плиты после возведения здания (на рис.2 не показано).

По верху крупных опор 6 выполняются упругие прокладки, например, из нескольких слоев полимерных листов. Пространство между опорами заполняется сыпучим материалом (песком) с целью образования условного (снимаемого) зазора для последующей осадки плиты при возведении здания с таким расчетом, чтобы прослойка из сыпучего материала после окончательной стабилизации осадок опор 6 (см. узел А) осталась менее уплотненной, чем под опорами 6. В итоге, нагрузки на основа-

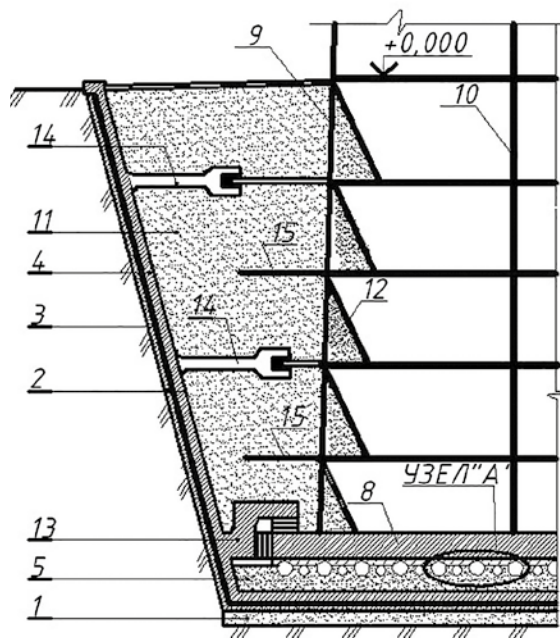
ние под фундаментом 8 воспринимаются в основном в виде равномерно-распределенных под подошвой, а также сосредоточенных под катковыми опорами 6.

- Фундаментная плита 8 состоит из двух слоев разной прочности: нижний слой из бетона на крупном щебне меньшей прочности (класса В10-В15), верхний – из более прочного бетона с усиленным армированием. При конкретном проектировании нижняя зона верхнего слоя плиты в местах опирания шаровых опор 6 может быть усилена сетками косвенного армирования и даже стальными листами.

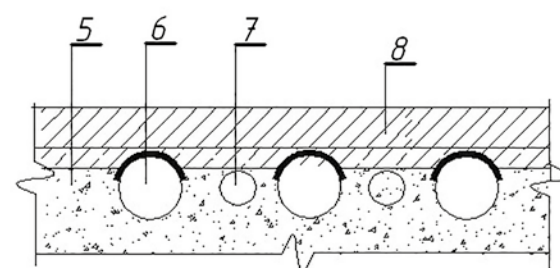
- Обратная засыпка 11 предусмотрена из материала, поглощающего сейсмические колебания. Традиционные стены подвальных этажей здания заменены наклонными откосами 12, расположенными частично на перекрытиях в пределах высоты каждого этажа. С целью повышения сейсмостойкости в составе откосов может быть предусмотрено устройство экранов из геосинтетических материалов. Поверхности откосов облицованы сборными плитами.

Рис.2 Фрагмент поперечного разреза здания, защитного экрана и котлована

1. Гравийно-песчаная подушка
2. Обетонированные поверхности котлована (стен и днища) монолитным железобетоном
3. Сейсмоизоляция боковых поверхностей стен и днища
4. Монолитный железобетонный коробчатый фундамент в виде плиты, жестко соединенной с боковыми наклонными стенами по периметру
5. Промежуточная подушка из слабосжимаемого грунта
6. Основные катковые опоры большого диаметра с демпферными прокладками
7. Промежуточные катковые опоры меньшего диаметра
8. Фундаментная плита из двух слоев разной прочности
9. Наружные наклонные колонны каркаса
10. Внутренние вертикальные колонны каркаса
11. Засыпка из материала, поглощающего сейсмические колебания
12. Наклонные откосы в пределах этажей
13. Упоры с демпферными устройствами
14. Распорки (с демпферами) между наклонными стенами коробчатого фундамента и каркасом подвальной части (показаны условно)
15. Выносные горизонтальные пояса-экраны



УЗЕЛ "А"



4. О работе конструкций подземной части на сейсмические нагрузки

- Распространяемые в грунте колебания встречаются на пути преграду в виде сплошного экрана с наклонными стенами 2 и горизонтальным днищем. Частично колебания отражаются и рассеиваются в окружающем грунте, а частично поглощаются самим экраном 2.

При очень сильных сейсмических воздействиях, в ходе которых экран будет подвергаться горизонтальным и вертикальным смещениям, наклонам и т.п., какая-то часть колебаний передается и на искусственно созданное грунтовое основание внутри экрана со стороны днища и боковых поверхностей, а также на конструкции защищаемого здания.

Значительная часть их будет поглощаться или снижаться в результате предусмотренных конструктивных мероприятий, обеспечивающих демпфирование горизонтальных и вертикальных толчков, уменьшающих тем самым до минимума сейсмические воздействия.

- Благодаря принятому решению, сейсмические волны при землетрясениях не встречаются стен подвала здания, так как наклонные откосы 12 будут выполнять роль "смещающихся поверхностей", в результате чего общая площадь боковой поверхности строительных конструкций стен подвала, воспринимающая горизонтальные сейсмические нагрузки, действующие на подвальную часть, снижается в 10-15 [1] и более раз. Но и это еще не все возможности принятых конструктивных решений по повышению сейсмостойкости и надежности.

- Относительно слабое сейсмическое воздействие на фундаментную плиту 8 гасится дополнительной осадкой катковых шаровых опор 6 в сжимаемом верхнем слое промежуточной подушки 5 и упругостью прокладок, а также проворачиванием или смещением этих опор на менее уплотненном участке подушки из сыпучего материала.

- Работа шаровых опор 6 в рассматриваемом случае отличается от работы традиционных чисто кинематических катковых опор. Шаровые опоры в виде включений в составе подушки (как несущего единого основания) будут выполнять роль шарнирных, обеспечивающих возможность поворота их на небольшой угол в одних случаях при раскатке, в других — возможность смещений при горизонтальных воздействиях.

Принцип работы их заключается в следующем. Вертикальные нагрузки воспринимаются в основном точечными более высоко распо-

ложенными опорами, вдавливаемыми в грунт по мере возведения здания. Засыпка тоже участвует в работе, но остается слабоуплотненной. Промежуточные опоры воспринимают вертикальные нагрузки по-разному, в зависимости от их высоты. В основном они включаются в работу при нарастании вертикальных нагрузок. Их основное предназначение (как мгновенно включающихся и выключающихся связей) «сбить» шаг между основными опорами, изменить жесткость основания и тем самым не допустить резонанса.

В целом, предложенная конструкция обеспечивает саморегулирование нагрузок и осадок.

В конкретном случае могут быть предложены для использования природные местные материалы (каменные валуны, песок), обладающие значительной долговечностью и низкой стоимостью [9]. Высокое качество работ не требуется.

Наоборот, некоторое отличие по размерам валунов (не строго четкое их размещение и т.д.) сбивает шаг между опорами при сильных землетрясениях, что способствует снижению или полному исключению резонанса.

При использовании решений, изложенных в статье, надежность объектов с каждым новым сейсмическим толчком не снижается, а наоборот, может повышаться. Это объясняется тем, что в период длительной эксплуатации в районах с повышенной сейсмической активностью проявляются частые незначительные сейсмические толчки силой, например, 3-5 баллов и происходит поэтапное демпфирование и как бы «постепенное» приспособление конструкций фундамента к восприятию более сильных землетрясений силой 7-9 баллов.

Проблема сейсмозащиты чрезвычайно сложна. Изменение грунтовых условий на контакте фундамента и основания, что веками использовали древние зодчие, а также уровень современных знаний о землетрясениях могут решить эту важную задачу.

При более значительном сейсмическом воздействии на площадке (7-9 баллов) демпфирование фундамента обеспечивается местным смятием бетона нижнего слоя фундаментной плиты в местах опирания опор 6. Промежуточные катковые опоры 7, имеющие меньший диаметр, включаясь в работу периодически, выполняют роль мгновенно изменяемых связей, что позволяет избежать явления резонанса. Кроме того, они могут воспринимать часть вертикальных нагрузок, если осадка основных опор 6 превысит предполагаемую расчетом.

5. Об обеспечении устойчивости зданий (сооружений)

Устойчивость каркаса подземной части здания обеспечивают:

- наличие упора 13 с демпферными устройствами в уровне фундаментной плиты с ограничением возможности смещения ее в горизонтальном и вертикальном направлениях;
- устройство распорок 14 в верхней части подвала в уровне перекрытий при наличии 3-х и более этажей с аналогичными демпферными прокладками;
- выполнение выносных горизонтальных поясов-экранов 15 из плит, шарнирно прикрепленных к плитам перекрытий, и ограничение угла их поворота для обеспечения упора в грунте засыпки 11;
- наличие наклонных стен 2, 4, включающихся в работу при опрокидывании здания.

Наклонные стены 4 могут быть плоскими или ребристыми в зависимости от их высоты. В особых случаях они могут быть раскреплены системой связей (на рис.2 не показано).

При конкретном проектировании устойчивость автономного фундамента 8, имеющего большие габариты, может быть повышена устройством дополнительных сквозных анкерных опор в плите 8 с уширениями в нижней зоне в скальном грунте и консольными уширениями, и демпферами в верхней (над плитой) для гашения вертикальных колебаний.

Предлагаемые решения позволяют не только значительно повысить надежность зданий и сооружений для принятых экстремальных условий, но и обеспечить максимальную их этажность, а также устойчивость.

6. Выводы, предложения и рекомендации

- Снижение расчетной сейсмичности района строительства на 1 балл, благодаря принятым оптимальным геологическим условиям, и дополнительно еще на 1-2 балла, согласно комплексу строительных решений с элементами сейсмозащиты, является большим достижением.

Для особо уникальных объектов, учитывая целесообразность повышения их надежности, рекомендуется принимать расчетную сейсмичность в размере 7 баллов, то есть на 2 балла менее, в сравнении с исходной, условно принятой в размере 9 баллов.

- Указанное снижение балльности приведет к уменьшению сейсмических нагрузок не менее чем в 4 раза. В этом случае более существенными по своему значению при проектировании

станут ветровые нагрузки, условно принятые для V ветрового района.

- Принятая сейсмозащита является универсальной, обеспечивающая защиту от различных видов сейсмических воздействий, в том числе с различных глубин и направлений их, а также по времени между толчками. В ряде случаев принятые решения сейсмозащиты дублируют друг друга, что в целом повышает надежность зданий (сооружений).

- Несущие конструкции подвальной части многоэтажного каркасного здания расположены на автономном фундаменте и искусственном основании (см. начало статьи), являющемся по существу буферной зоной между ними и естественными грунтами по периметру котлована.

При этом разница осадок колонн каркаса подвала и коробчатого фундамента по контуру котлована практически нулевая, что повышает надежность упоров 13 и распорок 14 с демпферными устройствами.

Необходимо особо подчеркнуть, что возможности повышения сейсмостойкости и надежности не определяются только изложенными в статье решениями, так как объем ее ограничен. Возможны и другие варианты при реальном проектировании (например):

- применение катковых шаровых опор, расположенных в круглых выемках в плане по авт. свид. СССР № 1723263, 1992 г.;
- при необходимости повышения жесткости каркаса подземной части могут быть предусмотрены металлические порталные или крестовые связи-энергопоглотители с креплением их на фасонках кольцевого типа для обеспечения эффекта демпфирования;
- устройство экранов в грунте по периметру котлована (на некотором удалении от стен 2) из скважин внутреннего и внешнего рядов, расположенных в шахматном порядке и заполненных сейсмопоглощающим материалом по авт.свид. СССР № 1629416, 1991 г. (данное решение использовалось НГПИ при разработке проектов по объектам отрасли в 80-х годах прошлого столетия, а также институтом Запсибнипиагропром при проектировании и усилении объектов на Алтае после землетрясения там, в 2003 году) и т.д.

- Как ни парадоксально, но по всей вероятности, наиболее сложные и трудно-решаемые проблемы возникнут в надземной части высотных зданий и сооружений из-за повышенных ветровых нагрузок, с учетом требований СП 20.13330.2011 (СНиП 2.01.07-85*). Это касается в первую очередь допустимости

пределных прогибов и перемещений, а также обеспечения несущей способности и долговечности наружных ограждений из стекла. С целью снижения влияния ветровых нагрузок на здание, а также использования его в качестве телебашни, возможен в порядке компромисса альтернативный (комбинированный) вариант объемно-планировочного решения, нижняя часть которого до высоты, определяемой по расчету, представляет здание с перекрытиями и наружным ограждением. Средняя зона – снаружи открытые несущие конструкции без наружного стенового ограждения, без перекрытий с закрытым стволом и перекрытиями для обслуживания лифтов и коммуникаций во внутренней центральной зоне. Верхняя зона – технические этажи, с учетом временного пребывания персонала, с перекрытиями и наружным ограждением по периметру башни. Конечно, это только предложение, которое должно быть обосновано расчетами генпроектировщиком и принято заказчиком.

Пользуясь рекомендациями, изложенными в статье, в принципе можно запроектировать не только высокие сейсмостойкие здания и сооружения, но и с учетом конкретных исходных данных объекты меньшей этажности, с учетом различных инженерно-геологических условий и другой объемной компоновкой их надземной части.

По изложенным в статье вопросам можно обращаться к автору статьи (тел. 8-383-221-60-01; E-mail:ngpi.nsk@mail.ru).

Список литературы:

1. «Сейсмостойкое здание или сооружение». Авторское свидетельство СССР приоритет от 18.12.89 г. (по заявке НГПИ) № 1673722, БИ № 32, 1991
2. Шишков Ю.А. Технические решения фундаментов и подвалов зданий повышенной сейсмостойкости. «Известия вузов». -1998. -10.-с.135-139
3. Шишков Ю.А. Устройство нулевого цикла сейсмостойкого здания в слабых грунтах. «Механизация строительства». -1999. -5.-с.28-30
4. Шишков Ю.А. Технические решения фундаментов и подвалов зданий повышенной сейсмостойкости в просадочных грунтах. (Труды III-го Центрально-Азиатского Международного Геотехнического Симпозиума «Геотехнические проблемы строительства на просадочных грунтах в сейсмических районах») г. Душанбе, 2005 г., том I, с.222-225
5. Ставицер Л.Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов. М., Изд-во АСВ.-2010

6. Геотехническое обоснование высотного и подземного строительства – 14 докладов 39-ти авторов на секции 4 (Труды Международной конференции по геотехнике «Развитие городов и геотехническое строительство») г.С-Петербург, 2008 г., том 4 под ред. проф. Улицкого В.М., с.467-540
7. В.Шуллер. Конструкции высотных зданий. М., Стройиздат, 1979 (Перевод с английского к.т.н. Л.Ш.Килимника под ред. Г.А.Казиной)
8. Шишков Ю.А. «Читая Ваш журнал» (О причинах разрушения зданий в Ленинакане во время землетрясения 7 декабря 1988 г.). «Жилищное строительство». -1996. -6.-с.26
9. «Фундамент сейсмостойкого здания, сооружения». Патент СССР (приоритет от 13.09.90 по заявке НГПИ) № 1774976, БИ № 41, 1992
10. Шишков Ю.А. Сейсмостойкие фундаменты на катковых опорах. «Жилищное строительство». -1997. -2.-с.10-11