



## АВТОРЫ



### ШМУКЛЕР В.С.

Докт. техн. наук,  
заведующий кафедрой  
Харьковского национального  
университета городского  
хозяйства  
им. А.Н. Бекетова



### БУГАЕВСКИЙ С.А.

Канд. техн. наук,  
доцент Харьковского  
национального  
автомобильно-  
дорожного  
университета



### ЗАДОРОЖНЫЙ А.А.

Канд. техн. наук,  
доцент Харьковского  
национального  
университета  
строительства и  
архитектуры

## ПРИМЕНЕНИЕ ТОРКРЕТ-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

УДК 693.5

### АННОТАЦИЯ

*На основе мирового опыта строительства обозначена область применения торкрет-бетона. Проанализированы основные компоненты торкрет-бетонной смеси и дана оценка их влияния на различные свойства и характеристики торкрет-бетона для набрызга мокрым способом.*

*On the basis of world experience in civil engineering, the application area of shotcrete is designated. The main components of sprayed concrete mix are analyzed and their impact on the various properties and characteristics of the shotcrete spray-wet method are assessed.*

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

торкрет-бетон, набрызг мокрым способом, добавки

### ВВЕДЕНИЕ

Торкрет-бетон играет существенную роль в современном гражданском строительстве и горнодобывающей промышленности. Это универсальный материал, который может быть легко и быстро применен для обеспечения экономической эффективности процесса строительства. Торкрет-бетон является удобным способом укладки бетона и подходит для широкого спектра применения и, в частности, в туннелестроении, при устройстве подземных хранилищ, для шахтной проходки, при возведении элементов зданий и сооружений сложной геометрической формы, при укреплении откосов и вертикальных стен, для восстановления и усиления элементов конструкций и т.д. [1].

В последнее время в развитых странах набрызг торкрет-бетона мокрым способом находит более широкое применение, по сравнению с сухим способом,



особенно в связи с возросшими требованиями к безопасности производственного процесса и окружающей среды [2]. При этом отдельные страны, например, такие, как Норвегия, полностью перешли на применение только мокрого способа [3].

Отсутствие в Украине современных технологических условий для подбора состава торкрет-бетонной смеси и торкрет-оборудования, норм на технологию ее приготовления и нанесения, а также методов контроля характеристик торкрет-бетона тормозит широкое применение торкрет-технологий для строительства и ремонта зданий и сооружений.

### АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОДБОРА СОСТАВА ТОРКРЕТ-БЕТОНОЙ СМЕСИ И ВЛИЯНИЕ ЕЕ КОМПОНЕНТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОРКРЕТ-БЕТОНА

Для получения качественного торкрет-бетона, набрызгиваемого с использованием мокрого способа, необходимы следующие составляющие [2]: цемент, минеральные добавки, инертные заполнители, различные химические добавки с обязательным применением жидких безщелочных ускорителей твердения, фибра (волокна). Не менее важны такие атрибуты, как специальное торкрет-оборудование, соблюдение технологии набрызга и уход за бетоном после набрызга.

Тип цемента должен быть выбран с учетом установленных требований к прочности бетона и долговечности. Расход цемента в составе торкрет-бетона рекомендуется в пределах от 400 до 500 кг/м<sup>3</sup> для набрызга мокрым способом [4]. Однако существуют рекомендации, предопределяющие расход цемента, в зависимости от формы и размера заполнителя (табл. 1).

Минеральные добавки (микронаполнители) значительно отличаются по своим характеристикам, их используют в составе торкрет-бетона для:

- увеличения пластичности смеси и снижения ее сегрегации;
- понижения износа деталей и шлангов торкрет-оборудования;
- увеличения толщины наносимого слоя и сцепления с различными поверхностями;
- увеличения ранней и конечной прочности торкрет-бетона;

- снижения величины отскока;
- повышения сульфатостойкости и т.д.

Важным фактором при выборе микронаполнителей является их эффективность применения (табл. 2, 3).

Основным требованием для всех видов минеральных добавок является величина размера частиц –  $\leq 0,125$  мм, однако, желательно, чтобы не менее 70% их проходило через сито с размером отверстия 0,063 мм.

Для торкрет-бетона качество заполнителей очень важно, как для бетонной смеси, так и для затвердевшего бетона, особенно – гранулометрический состав, т.е. распределение заполнителя по разным фракциям [6].

Для получения торкрет-бетона следует использовать фракции заполнителя с гладкой округленной поверхностью. Заполнители должны быть хо-

Таблица 1. Расход цемента на 1 м<sup>3</sup> торкрет-бетона [5].

Форма заполнителя	Фракция заполнителя	
	0-8 мм	0-16 мм
круглый	500 кг/м <sup>3</sup>	450 кг/м <sup>3</sup>
дробленный	525 кг/м <sup>3</sup>	475 кг/м <sup>3</sup>

Таблица 2. Эффективность применения минеральных добавок для торкрет-бетона [5].

Эффект	Вид микронаполнителя	Влияние на свойства торкрет-бетона
Скрыто гидравлический	Доменный шлак	Замедление нарастания ранней прочности и увеличение долговечности
Пуццолановый	Микрокремнезем Зола-уноса	Повышение долговечности, увеличение сил сцепления, а также прочностных свойств торкрет-бетона Введение ограничения на количество применения в связи со снижением значения pH бетона
Инертный	Минеральный порошок	Не увеличивают прочность, но улучшают гранулометрический состав

Таблица 3. Влияние цемента и минеральных добавок на свойства торкрет-бетона [5].

Характеристика	Цемент	Микрокремнезем	Зола-уноса	Доменный шлак	Минеральный порошок
Свежеуложенная бетонная смесь					
Прокачиваемость	++	++	+++	+	+++
Водоудерживание	++	+++	+	+	+++
Набор прочности					
Очень ранняя прочность (до 4 ч)	+++	+	-	-	+/-
Ранняя прочность (до 12 ч)	++	+++	++	+++	+/-
Конечная прочность (28 сут.)					
Долговечность					
Водонепроницаемость	++	+++	++	++	+
Сульфатостойкость	-	++	+/-	+++	+/-
Сопротивление внешним воздействиям	-	+/-	+/-	+++	+/-



рошо отсортированы, и ни одна из фракций на ситах не должна превышать 30% от общего объема.

Содержание дробленого и некубического материала (лещадного) не должно превышать 10%. Модуль крупности песка – не менее 2, использование песка с модулем крупности менее 2 допускается после лабораторных испытаний. Улучшение гранулометрического состава для природного песка с использованием дробленых материалов (гранотсев) часто приводит к увеличению воды затворения, а также к ухудшению прокачиваемости смеси бетононасосом.

При набрызге торкрет-бетона мокрым способом необходимо придер-живаться следующих правил:

- максимальный размер заполнителя не должен превышать 8...10 мм из-за ограничений, обусловленных использованием оборудования для набрызга и во избежание слишком больших потерь вследствие отскока;
- содержание мелких частиц на сите размером 0,125 мм должно быть в интервале от 4...5% до 8...9% [2].

При недостатке мелкого заполнителя происходит разделение (сегрегация) смеси, что ведет к повышению износа оборудования и возможным пробкам в трубопроводах и шлангах, а также к ухудшению качества бетона. Если мелкой фракции заполнителя недостаточно, то при подборе состава торкрет-бетона компенсировать это можно только увеличением количества цемента и минеральной добавки.

При слишком большом объеме мелких фракций, за счет применения песков с модулем крупности меньше 2, в состав торкрет-бетона требуется вводить большее количество добавки суперпластификатора для снижения водоцементного отношения.

Основным требованием к воде затворения для торкрет-бетонной смеси является отсутствие содержания примесей, замедляющих или ускоряющих гидратацию цемента (масла и смазки, сахар, хлориды, соли, сульфаты). Критерии оценивания пригодности применения воды для торкрет-бетона приведены в табл. 1 норм [4].

Химические добавки для торкрет-бетона используются для улучшения и / или изменения свойств бетона, которыми нельзя правильно управлять с помощью цемента, заполнителя и воды затворения. В основном их вводят в процессе приготовления бетонной смеси для набрызга мокрым способом. Исключение составляют добавки, ускоряющие схватывание и твердение, которые могут подаваться непосредственно в сопло торкрет-оборудования в процессе набрызга.

Мировые производители предлагают широкий ассортимент добавок для торкрет-бетона и рекомендации по их применению (табл. 4, 5).

Химические добавки в торкрет-бетон оценивают в процентах от объема цемента, в диапазоне приблизительно от 0,5% до 6,0%, что составляет количество от 2 кг/м<sup>3</sup> до 30 кг/м<sup>3</sup>. Все используемые добавки подают в бетон в процессе его производства на смесительную установку после начального учета воды. Основное исключение составляет ускоритель схватывания, который сразу же добавляют перед набрызгом.

В наибольшей степени механические свойства торкрет-бетона определяются водоцементным отношением (0,46...0,55), содержанием микро-наполнителя и других добавок, таких, как ускорители твердения, улучшающих условия твердения. Основная причина использования стальных фибр в составе торкрет-бетона – повышение упругости материала. Поскольку высокая прочность на изгиб и растяжение не свойственны бетону, повысить эти свойства можно введением стальной фибры, от вида и количества которой будут зависеть указанные свойства. Предпочтительнее использовать длинные волокна (> 25 мм) в достаточных дозировках (40...70 кг/м<sup>3</sup>) [2]. Нормы [4] предлагают волокна в диапазоне длин 25...35 мм, но не более 50 мм, при этом более короткие лучше смешиваются в торкрет-бетонной смеси и обеспечивают меньший отскок при набрызге.

Основные рекомендации для подбора состава торкрет-фибробетона:

- торкрет-фибробетонная смесь должна обладать большей подвижностью для возможности ее прокачивания по шлангам и трубопроводам;
- длина фибры должна быть в два раза больше размера самого крупного заполнителя;

Таблица 4. Химические добавки для торкрет-бетона мировых производителей.

Тип добавки	Sika	BASF	MC-Bauchemie
Ускорители схватывания	Sigunite 49AF Sigunite-L53AF	MasterRoc SA 160 MasterRoc SA 167 MasterRoc SA 411 MasterRoc SA 545	Centrament Rapid 651 Centrament Rapid 652
Замедлители схватывания	SikaTard 930	MasterRoc HCA 10	Centrament Retard 390
Суперпластификаторы	Sika ViscoCrete SC-305	MasterGlenium T 803 MasterRheobuild T1	MC Muraplast FK 88 MC-Techniflow
Модификаторы вязкости	Sika Stabilizer 4R Sika Pump	MasterRoc TCC 780	Centrament Stabi 520
Сухая минеральная добавка или водная суспензия	Sikacrete PP1 SikaFume HR	MasterRoc MS 610	Centrilit Fume S Centrilit NC
Неметаллическая фибра	-	MasterFiber 150	-





Таблица 5. Область применения химических добавок и неметаллической фибры.

Свойства торкрет-бетонной смеси и торкрет-бетона	Ускоритель схватывания	Замедлитель схватывания	Супер-пластификатор	Модификатор вязкости	Сухой микрокремнезем или водная суспензия	Неметаллическая фибра
Улучшение прокачиваемости бетонной смеси			+	+	+	
Повышение подвижности бетонной смеси			+	+	+	
Снижение влияния нестабильности гранулометрического состава на качество бетонной смеси				+	+	
Увеличение срока сохранения подвижности бетонной смеси		+	+	+		
Устойчивость бетона к агрессивным средам					+	
Увеличение толщины наносимого слоя за один проход	+			+	+	+
Снижение отскока бетонной смеси	+			+	+	+
Ранний набор прочности бетоном	+		+			

- длина фибры не должна превышать 50...60% диаметра сопла;
- из-за большей поверхности, требующей смазки при прокачивании, а также когезионной прочности, необходимо увеличить содержание связующего вещества;
- когезионная прочность улучшается за счет использования микро-кремнезёма;
- момент для добавления волокон зависит от типа волокна и может быть изменен, если возникают проблемы с перемешиванием бетонной смеси (можно добавлять до, после или во время перемешивания);
- металлические волокна также теряются при отскоке и, следовательно, необходимо учитывать фактическое содержание фибры в торкрет-бетоне, а не теоретическую дозировку стальной фибры.

Неметаллические волокна вводят в состав торкрет-бетона в пределах 0,75...1,0 кг/м<sup>3</sup> для снижения усадки, а также отскока при набрызге мокрым способом [4]. Применение для набрызга бетонной смеси с большим содержанием волокон приводит к образованию комков при перемешивании и плохому уплотнению на набрызгиваемую поверхность.

Современные поколения неметаллических волокон, разработанные в США, позволи-

ли создать новый вид фибры из высококачественных материалов длиной 30 и 50 мм, по своей форме схожей со стальной. Проведенные испытания прочности на растяжение торкрет-фибробетона в Австралии и Европе показали результаты, сопоставимые с применением стальной фибры при меньшей дозировке синтетической фибры в пределах 10...13 кг/м<sup>3</sup> [2].

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТОРКРЕТ-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Главная цель нанесения торкрет-бетона – получение компактного, плотного и прочно прилипшего бетонного слоя с минимально возможной потерей на отскок. Отскок зависит от целого ряда факторов, таких как прочность соударения и угол струи. Так как скорость материала, выходящего из сопла, как правило, не изменяется, прочность удара зависит от расстояния между соплом и поверхностью, на которую набрызгивается торкрет-бетон, а также от угла падения. Если это расстояние слишком короткое, то нет возможности создать слой на поверхности, так как осажденный материал будет смыт набрызгивающей струей. Если расстояние слишком велико, прочность удара будет слишком мала, чтобы обеспечить надлежащее сцепление и уплотнение бетона. В любом случае, величина отскока будет чрезмерной, так как мало материала будет прилипать к набрызгиваемой поверхности.

И наоборот, отскок будет сведен к минимуму, если расстояние между соплом и поверхностью подложки находится в надлежащем отношении к скорости выхода материала из сопла. Этот параметр напрямую зависит от квалификации спловщика и обычно находится в пределах 0,5...1,0 м для набрызга мокрым способом [4].

Угол отскока смеси с набрызгиваемой поверхностью такой же, как угол, при котором она попадает на него. Чем более остр угол соударения струи, тем больше материала будет потеряно. Следовательно, сопло должно всегда находиться под прямым углом к набрызгиваемой поверхности, за исключением тех случаев, когда необходимо заполнить бетонной смесью пространство за арматурными стержнями или сетками.

Для обеспечения надежного сцепления торкрет-бетона с набрызгиваемой поверхностью необходимо выполнение следующих условий: очистка



набрызгиваемой поверхности, смачивание подложки и направление струи торкрет-бетонной смеси перпендикулярно набрызгиваемой поверхности. Очистка и смачивание поверхности должна быть выполнена непосредственно перед набрызгом, для предотвращения образования изолирующего слоя, формирующегося сразу за счет оседания пыли. Торкрет-сопло является одним из наиболее важных элементов торкрет-оборудования и отвечает за качество процесса набрызга. Тщательное перемешивание воздуха, бетонной смеси и ускорителя твердения происходит внутри сопла. Торкрет-сопло концентрирует струю и отвечает за конфигурацию набрызга. Современные конструкции сопел спроектированы так, чтобы вся бетонная

смесь набрызгивалась на поверхность без потерь с равно-мерным распределением по поперечному сечению струи [5-7].

### МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРКРЕТ-БЕТОНА

Наиболее важной характеристикой для определения эффективности нанесения торкрет-бетона является определение ранней прочности на месте выполнения работ. Для этого в мировой практике применяется несколько методов [5-10]. Для определения ранней прочности торкрет-бетона (от 0 до 1Н/мм<sup>2</sup>) используется пенетрометр Проктора. Этот метод измеряет прочность, необходимую для вдавливания стальной иглы с определенными размера-



**Рис.1.** Современные технологии возведения криволинейных конструкций: а – несъемная опалубка из водостойкой фанеры [11]; б – изогнутые стены музея [11]; в) – арматурный каркас для акустических оболочек [12]; г – изготовление опалубки из пенополистирола [13]





ми в торкрет-бетон.

Для определения прочности сжатия в диапазоне от 2 до 10 Н/мм<sup>2</sup> хорошо себя зарекомендовали следующие методы [8-10]:

- метод Кайндла-Мейко (Kaindl/Meuco) – по усилию извлечения болтов;
- метод Хилти (Dr. Kusterle) – по глубине забивки и усилию извлечения дюбелей, забиваемых монтажным пистолетом HILTI DX 450L;
- упрощенный метод Хилти (HILTI (Dr. G. Bracher, Sika) – по глубине забивки дюбелей, забиваемых монтажным пистолетом HILTI DX 450L.

При прочности на сжатие более 10Н/мм<sup>2</sup> испытывают на прессе образцы (керны), высверленные непосредственно из торкрет-бетона. Этот метод используется, в основном, для проверки требуемой конечной прочности на 28 сутки.

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПАЛУБКИ ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ЗДАНИЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОРКРЕТ-ТЕХНОЛОГИЙ

В последнее время во всем мире наметилась тенденция создания сложных по геометрии систем с применением торкрет-технологий (architectural shotcrete). Одной из главных задач является изготовление и снижение стоимости опалубки для возведения таких конструкций.

Для создания зданий или сооружений криволинейной формы с применением торкрет-технологий используют несъемную опалубку из водостойкой фанеры [11]. Для возведения изогнутой стены в Варшавском музее истории польских евреев применен остов из металлических труб, к которому в виде экрана прикреплены криволинейные листы из водостойкой фанеры, усиленные специальными арматурными сетками (рис. 1, а). Арматурные сетки в своей конструкции имеют с шагом 0,8 м стальные пластины с центральным отверстием для крепежной детали и дополнительное радиальное армирование в месте расположения пластины. Следует подчеркнуть, что стена – не просто декоративный элемент, а произведение искусства, служащее при этом в качестве перегородки между пешеходным маршрутом для посетителей музея и техническими и офисными помещениями. Поверхность криволинейных стен после набрызга двухслойного торкрет-бетона сухим способом показана на рис. 1, б.

Вторым вариантом является применение самонесущего металлического остова, созданного по цифровой модели и повторяющего форму будущего сооружения с последующим набрызгом с двух сторон торкрет-бетона (рис. 1, в). По этой технологии в Великобритании созданы конструкции акустических оболочек, являющихся сценой и укрытием при этом в живописных местах [12].

В Датском технологическом институте с помощью специального программного обеспечения и роботизированных манипуляторов выпили-вают объемную внешнюю опалубку из пенополистирольных блоков (рис. 1, г). Для лучшего отделения опалубки от забетонированной конструкции предложена силиконовая мембрана толщиной 0,5 мм [13].

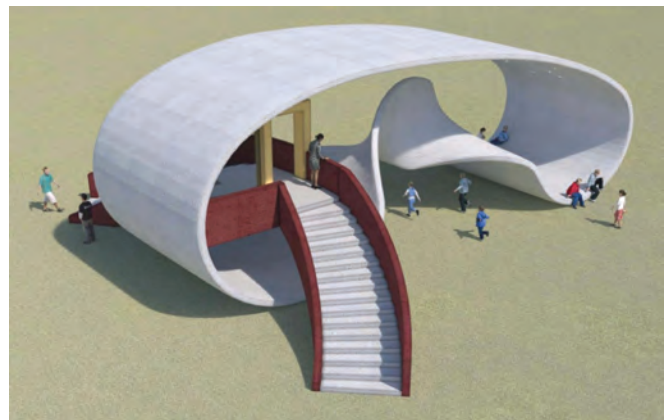


Рис.2. Архитектурные формы, возводимые без применения опалубки: а) самонесущий остов с вкладышами из пенополистирола; б) сложная архитектурная форма для многоцелевого использования.

Авторами данной статьи разработана архитектурно-строительная система «Монофант» [14], предназначенная для эффективного возведения зданий и сооружений криволинейной формы путем набрызга мокрым способом торкрет-бетона на самонесущий остов. Конструкция остова в данном случае состоит из пространственного криволинейного арматурного каркаса и неизвлекаемых вкладышей-пустотообразователей из пенополистирола или минеральной ваты, формирующих заданную геометрию конструкции и являющихся экраном, на который с двух сторон набрызгивается мокрым способом торкрет-бетонная смесь (рис. 2).

За счет применения пространственной конструкции арматурного каркаса, представляющего собой внешние оболочки и систему плоских ре-



бер, соединяющих их, обеспечивается необходимая жесткость и несущая способность для набрызга торкрет-бетона.

## ВЫВОДЫ

Возведение сложных архитектурных форм зависит от эффективности процесса набрызга бетонной смеси при формировании конструкции, что включает в себя правильность подбора состава торкрет-бетона и технологии торкретирования. Конструкция предложенного самонесущего остова, состоящего из пространственного криволинейного арматурного каркаса и неизвлекаемых вкладышей-пустотообразователей, позволяет возводить облегченные конструкции с применением торкрет-технологии для безопалубочного бетонирования. Применение внутренней несъемной опалубки обеспечивает снижение веса конструкции со сложной геометрической поверхностью и повышение несущей способности возводимого здания или сооружения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Shotcreting in Australia. Recommended Practice. Edited by Dr. Stefan Bernard. (2010). Second Edition, September, 2010, 84 p.
2. Tom Melbye, Ross Dimmock, Knut F. Garshol. (2006). Sprayed Concrete for Rock Support. 11th edition, December, 2006, 280 p.
3. Austin, S.A. (1999). European Developments in Sprayed Concrete. Sydney, Australia, May, 38-46.
4. EFNARC. (1999). European specification for sprayed concrete. Guidelines for specifiers and contractors. 31 p.
5. Jürgen Höfler, Jürg Schlumpf. (2004). Shotcrete in Tunnel Construction. Introduction to the basic technology of sprayed concrete. March, 2004, 71 p.
6. Austin, S.A., Robins, P.J., Coodier, C.I. (2002). Construction and repair with wet-process sprayed concrete and mortar. American Shotcrete Association, 2002, 59 p.
7. Rispin, M., Howard, D., Kleven, O. B., Garshol, K., Gelson, J. (2009). Safer, deeper, faster: sprayed concrete – an integral component of development mining. SRDM 2009, Perth, Australia, 69-81.
8. Справочник по бетонам Sika / [Т. Хирши, Х. Кнаубер, М. Ланц и др.]; пер. на русский язык под общей ред. А.Г. Синякина. – 156 с.
9. Benedikt Lindlar, Markus Jahn. (2003). Method Statement Strength Measurement of Shotcrete (Instruction for use). Sika AG, 10/03/10, Version 2, 16 p.

10. Abbas Mohajerani, Daniel Rodrigues, Christian Ricciuti, Christopher Wilson. (2015). Review Article. Early-Age Strength Measurement of Shotcrete. Hindawi Publishing Corporation, Journal of Materials, Article ID 470160 – 10 p.
11. Jozef Jasiczak, Włodzimierz Majchrzak, Włodzimierz Czajka. (2015). Construction of undulating walls using dry-mix shotcrete. Expansive concrete surface creates the main spatial element inside the Museum of the History of Polish Jews in Warsaw, Poland. Concrete international, V. 37, No. 6, 31-35.
12. Jason Flanagan. (2015). Acoustic Shells. Shotcrete, V. 17, No. 1, 16-19.
13. Thomas Juul Andersen, Wilson Ricardo Leal da Silva, Lars Nyholm. (2016). Lessons from the Tailor Crete Project. Innovative industrial methods for future digital concrete architecture. Concrete international, V. 38, No. 3, 54-61.
14. Babaev, V., Shmukler, V., Bugayevskiy, S., Nikulin, V. (2016). Cast Reinforced Concrete Frame of Buildings and Methods of Its Erection. Journal of Civil Engineering and Construction. V. 5. No 2, 143-156.

## REFERENCES

8. Directory on concretes Sika. T. Hirshi, H. Knauber, M. Lanc, J. Schlumpf, J. Shrabak, K. Shpirig, U. Vjeber; translate on Russia under a general release Sinyakina A.G. – 156 p.