

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 544.774.2:699.86

ПРЕИМУЩЕСТВА АЭРОГЕЛЯ НАД СУЩЕСТВУЮЩИМИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

И.А. ДАВЫДЕНКО

(Представлено: **Е.С. НЕКРАСОВА**)

Постоянное совершенствование технологий способствует стремительному развитию разработки и производства новых материалов, среди которых инновационный материал – аэрогель. В данной работе исходя из его физических свойств, выявлены его достоинства перед другими теплоизоляционными материалами.

Беларусь – страна мощной химической промышленности. Это обуславливает возможность производства налаживания производства аэрогеля на территории нашей страны, что должно значительно уменьшить его стоимость на территории государства. На территории страны отсутствуют богатые запасы полезных ископаемых, поэтому приоритетом становится развитие высоких технологий и получения статуса технологичной державы в мировом сообществе, с приоритетным развитием высоких технологий.

Аэрогели – класс материалов, представляющих собой гель, в котором жидкая фаза полностью замещена газообразной. Такие материалы обладают рекордно низкой плотностью и демонстрируют ряд уникальных свойств: твёрдость, прозрачность, жаропрочность, чрезвычайно низкую теплопроводность и т.д. Известны аэрогели на основе аморфных оксидов: диоксида кремния SiO_2 , оксида алюминия Al_2O_3 , оксидов Cr, Sn, W, Fe, Li, Na, Ca, Mg, Ba, Sb, Te, Ni, Ge, Zn, Mn и других элементов. Также получены аэрогели на основе углеродных нанотрубок (в начале 1990-х получены первые образцы аэрогеля на основе углерода). Аэрогель на основе SiO_2 представляет собой разветвленный трехмерный кластер, напоминающий древовидную сеть из наночастиц размером около 4 нм. Поры между кластерами заполнены воздухом, характерный размер пор ~100 нм, в десятки раз превышающий размер кластеров, что и позволяет получать очень легкий материал (рис. 1) [1].

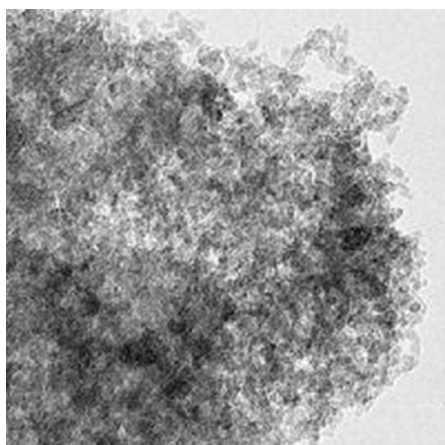


Рис. 1. Разветвленная трехмерная сеткааэрогеля на основе SiO_2 из наночастиц размером около 4 нм

Благодаря своей структуре аэрогели обладают набором уникальных свойств. При сильной нагрузке аэрогель трескается, но в целом это весьма прочный материал – образец аэрогеля может выдержать нагрузку в 2000...4000 раз больше собственного веса, она намного выше, чем у железобетона или даже титановых сплавов, применявшихся в некоторых советских самолётах и подлодках. Аэрогели, как и гели, могут производиться из разных материалов. Самые перспективные создаются на основе углеродных нанотрубок длиной около 1 мкм. Чтобы преодолеть проблемы с неэластичностью, американские материаловеды наносили на образцы такого аэрогеля от одного до пяти слоёв графена. Полученный материал легко перенёс до 1 000 000 циклов сжатия-восстановления без малейших следов изменения формы или объёма после удаления деформирующей нагрузки. Хотя их прочность приближается к прочности твердых тел, по плотности они близки к газам.

Плотность различных аэрогелей обычно варьируется в пределах от 0,001 до 0,5 г/см³ (чаще всего порядка 0,02 г/см³), а плотность воздуха – 0,001225 г/см³ [2].

Наиболее распространены кварцевые аэрогели, по плотности среди твердых тел они уступают лишь металлическим микрорешёткам, чья плотность может достигать – 0,9 кг/м³, что на одну десятую меньше лучших показателей плотности аэрогелей – 1 кг/м³. В воздушной среде при нормальных условиях плотность такой металлической микрорешётки равна 1,9 кг/м³ за счёт внутривещного воздуха. Это в 500 раз меньше плотности воды и всего в 1,5 раза больше плотности воздуха [3].

Аэрогели обладают и крайне малой теплопроводностью, поскольку теплу нужно пройти сложный путь по разветвленной сети из очень тонких цепочек наночастиц. При этом перенос тепла по воздушной фазе также затруднен из-за того, что эти же цепочки делают невозможной конвекцию, без которой теплопроводность воздуха очень низка.

Аэрогели, в особенности кварцевые, не только хорошие теплоизоляторы. Они также очень гигроскопичны. Благодаря чрезвычайно низкой теплопроводности ~0,017 Вт/(м·°C) (табл. 1) в воздухе при атмосферном давлении, меньшей, чем теплопроводность воздуха 0,024 Вт/(м·°C), именно они обладают потенциалом применения в строительстве в качестве теплоизолирующих и теплоудерживающих материалов. Кроме этих уникальных свойств температура плавления кварцевого аэрогеля составляет 1200 °C [4].

Таблица 1

Сводная таблица свойств, полученных при температуре 37 °C (теплопроводность, плотность, температура применения) для разновидностей аэрогелягибкой теплоизоляции, предоставленной компанией ASPEN AEROGELS (USA)

Тип аэрогеля	Коэффициент теплопроводности, т/(м·°C)	Плотность, кг/м ³	Температура применения, °C
Pyrogel XT-E	0,021	200	-40...650
Pyrogel XTF	0,021	180	-40...650
Pyrogel XT	0,021	180	-40...650
Cryogel Z	0,014	130	-265...125
Cryogel X201	0,014	130	-200...200
Pyrogel 2250	0,016	170	200 max
Pyrogel 6650	0,014	110	650 max
Spaceloft	0,014	150	-100...200
SpaceloftSubsea	0,014	160	-100...200

Как видно из вышеуказанной таблицы, коэффициент теплопроводности теплоизолирующего материала в разы ниже, чем используемых строительных материалов (табл. 2) [5].

Таблица 2

Теплотехнические показатели строительных материалов согласно ТКП 45-2.04-43-2006 (02250)

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C)	Плотность ρ , кг/м ³	Температура применения, °C
Маты минераловатные прошивные	0,044	125	-180...+450
	0,041	50	
Плиты пенополистирольные	0,041	50	-200...+85
	0,043	15	
Пенополиуретан	0,041	80	-150...+220
	0,029	40	
Плиты из резольнофенолформальдегидного пенопласта	0,047	100	-180...+150
	0,038	40	

Таким образом, исходя из физических свойств можно выявить ряд преимуществ нового наноматериала: - изоляция из этого материала чрезвычайно устойчива к воздействию огненной стихии. Она становится серьезным препятствием на пути распространения огня и дыма, существенно увеличивая временной интервал для организации и проведения мероприятий по тушению пожара;

- высокая степень влагонепроницаемости позволяет не только сохранить теплоизоляционные свойства аэрогеля в условиях повышенной влажности, но и надежно защитить изолируемые объекты от вредного воздействия атмосферных осадков и коррозионных процессов;

- высокая прочность, гибкость и эластичность обеспечивают длительный срок службы без заметного снижения полезных свойств аэрогеля. Даже под влиянием сильного механического воздействия они не разрушаются и вновь принимают свою первоначальную форму. При этом, в отличие от традиционных утеплителей, герметичность защитного слоя не нарушается, и уровень теплоизоляции сохраняется прежним;

- легкий вес и возможность рулонного варианта исполнения облегчает и транспортировку материала, и процесс монтажа, значительно сокращая сроки на его проведение. При этом нагрузка на изолируемые объекты практически не изменяется, как это происходит в случае применения других видов теплоизоляции. Изоляционный слой при этом не требует много места, что очень важно в стесненных условиях производственных помещений;

- состоящие из кварцевого материала, являющегося, по сути, песком, эти утеплители совершенно безвредны, как для человеческого здоровья, так и для окружающей среды. Процесс утилизации отходов облегчен тем, что отходы аэрогелевых утеплителей занимают очень малый объем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Почтман, Ю.М. Техника Без Опасности. Эффективность потребления ресурсов. Технология устойчивого развития / Ю.М. Почтман, В.А. Бараненко. – М.: Стройиздат, 2010. – № 5.
2. Aerogels/Ed.J. Fricke. – Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: SpringerVerlag, 1986. – 205 p
3. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Наука-Физматлит, 2007. – 416 с.
4. [Электронный ресурс] Таблица_1. – Режим доступа: http://thermalinfo.ru/publ/tverdye_veshhestva/stroitelnye_materialy/teplofizicheskie_svoystva_teploprovodnost_plotnost_temperatura_primeneniya_gibkoj_teploizoljacji_na_osnove_aehrogelja/6-1-0-363.
5. Строительная теплотехника: ТКП 45-2.04-43-2006. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2007. – 24 с.

УДК 544.774.2

ПРОИЗВОДСТВО АЭРОГЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

И.А. ДАВЫДЕНКО

(Представлено: Е.С. НЕКРАСОВА)

Достижения в области науки приводят к совершенствованию технологий. Представлено исследование аэрогеля AlOON, который может синтезироваться с применением нового оригинального метода – селективного управляемого окисления водяным паром алюминия, растворенного в расплаве галлия (свинца, висмута и др.).

Аэрогель начал производиться еще в 1940-х годах, но в 1970-х производство было остановлено вследствие слишком высокой стоимости и опасности производства.

С каждым годом ученые прилагают усилия по развитию технологии производства. Основными направлениями изучения для осуществления широкой коммерциализации аэрогелей являются снижение затрат на его производство, а также повышение качества продукта.

Существуют следующие способы производства аэрогелей:

- «золь-гель» – технология с применением сверхкритического (либо сублимационного) высушивания;
- метод плазменного гидролиза;
- жидкометаллическая технология [1].

Метод сверхкритической сушки применяется в тех случаях, когда необходимо избежать повреждения поверхностей исследуемых объектов за счёт капиллярных эффектов. При обычном высушивании на воздухе или в вакууме во всех впадинах образцов возникают большие стягивающие силы, связанные с большим поверхностным натяжением на границе раздела «жидкость – газ». Действие этих сил в процессе сушки приводит к деформации областей действия данных сил, а иногда к полному схлопыванию впадин на поверхности. Чтобы этого избежать, можно проводить сушку в системе, в которой отсутствует

граница раздела фаз и, как следствие, поверхностное натяжение. Такой системой может служить сверхкритический флюид как гомогенная среда, в которой есть только одна фаза.

Сверхкритический CO_2 также может быть использован вместо спирта для осушения жидких гелей. Отсутствие поверхностного напряжения в сверхкритических флюидах позволяет осушать гели с минимальным уменьшением объема, сохраняя матричную структуру геля практически неизменной. В результате, аэрогели, сформированные методом сверхкритической сушки, имеют большую площадь поверхности, меньшую плотность, большие размеры пор и объем пор.

Способ очистки сверхкритическим флюидом от остаточного растворителя является ключевой стадией в фармацевтической и пищевой промышленности. Традиционные методы очистки чрезвычайно энергоемки. Технологии сверхкритической сушки, разработанные TharProcess, позволяют эффективно убирать остаточный растворитель из продукции.

Аэрогели, выпускаемые немецкими и американскими производителями, используют в основном «золь-гель» технологии (Кистлер, 1931 г.) с применением сверхкритического (реже сублимационного) высушивания, или метод плазменного гидролиза.

В отличие от указанных технологий, жидкометаллическая технология не использует вредные и агрессивные жидкости. Нет необходимости создавать высокие давления, что существенно снижает уровень затрат на оборудование, упрощает технологические схемы и снижает стоимость продукта.

Государственный научный центр Российской Федерации «Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» разрабатывает производство наноструктурного аэрогеля AlOON для создания нового поколения сенсорной и конструкционной керамик, сорбентов, резинотехнических изделий, тепловой изоляции.

Способ получения аморфного мезопористого аэрогеля гидроксида алюминия со слоисто-волоконистой микроструктурой включает проведение реакции синтеза аморфного гидроксида алюминия в герметичной емкости путем обработки галлий-алюминиевого расплава газовой смесью на основе инертного или малоактивного газа с водяным паром с содержанием пара 1–30 об. % при температуре 50...150 °С [2].

Для синтеза ультрапористого оксигидроксида алюминия со слоисто-волоконистой наноструктурой используется специализированная установка (рис. 1).

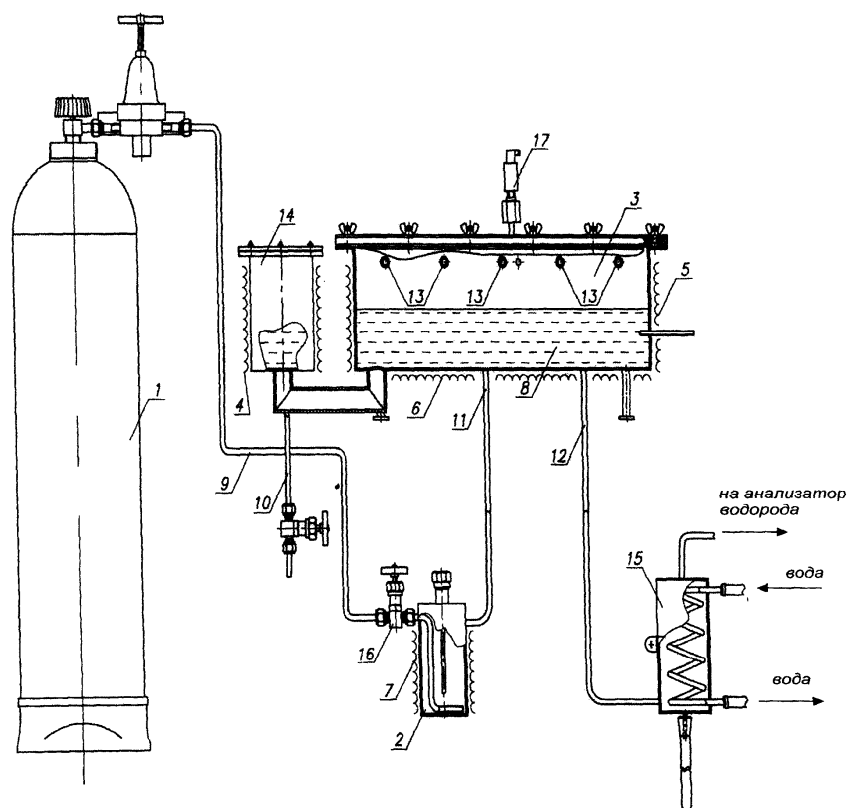
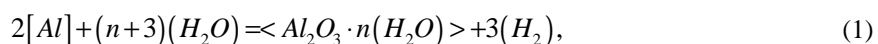


Рис. 1. Конструкция установки:

- 1 – источник инертного газа; 2 – увлажнитель; 3 – реакционная емкость; 4, 5, 6, 7 – электронагреватели; 8 – расплав галлия; 9, 10, 11, 12 – трубопроводы; 13 – впускной коллектор; 14 – бак для ввода алюминия; 15 – конденсатор влаги отработанного газа; 16 – регулировочный вентиль; 17 – манометр

Установка работает следующим образом. Увлажнитель 2 заполняют дистиллированной водой. Реакционную емкость 3 заполняют расплавом галлия так, чтобы его уровень находился ниже впускного коллектора 13, бак для ввода алюминия 14 позволяет производить непрерывную подпитку расплава галлия алюминием. При включенных электронагревателях 4, 5, 6 и 7 организуют подачу инертного газа, например, аргона из его источника (баллона) 1, через регулировочный вентиль 16 с необходимым расходом на вход увлажнителя 2. Попадая в увлажнитель 2, аргон выходит через отверстия в барботажной трубке, находящейся под уровнем воды, проходит в пузырьковом режиме слой дистиллированной воды и выходит в газовую полость увлажнителя, насыщаясь при этом парами воды. При этом степень насыщения парами воды регулируется температурой воды в увлажнителе 2 и расходом газа. Полученная паро-аргоновая смесь (с заданным паросодержанием) поступает по газовым линиям во впускной коллектор 13, а затем в газовый объем реакционной емкости 3, заполненной расплавом галлия 8. Реакционная емкость 3 сообщается с баком для ввода алюминия 14 по расплаву галлия. Это позволяет непрерывно подпитывать расплав галлия в реакционной емкости 3 алюминием до необходимого содержания, растворяя необходимое количество алюминиевой стружки в баке для ввода алюминия 14.

При контакте с поверхностью расплава в реакционной емкости водяной пар, находящийся в окислительной смеси $\text{Ar-H}_2\text{O}$, вступает в химическую реакцию с растворенным в галлии алюминием. В силу того, что сродство к кислороду у алюминия больше, чем у галлия, растворенный алюминий селективно окисляется, взаимодействуя с водяным паром. Галлий при этом не расходуется, а является своеобразной матрицей – средой для подготовки алюминия к окислению. В итоге по общей (результатирующей) реакции (1) образуются легкие белые «хлопья» – ультрапористый оксигидроксид алюминия со слоисто-волоконистой наноструктурой:



где вид скобок характеризует состояние реагентов и продуктов реакции: «[]» – растворенное; «()» – газообразное; «<>» – твердое (аморфное).

Последующий отжиг синтезированного материала при температурах до 800 °С позволяет удалить часть физически и химически связанной воды и получить материал, соответствующий формуле $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ или AlOOH . При этом его слоисто-волоконистая наноструктура сохраняется. Следует заметить, что в отличие от изотропного аэрогеля SiO_2 , у которого нановолокна переплетены между собой случайным образом, а аэрогель AlOOH обладает анизотропной структурой, т.е. нановолокна ориентированы преимущественно в одном направлении (рис. 2).

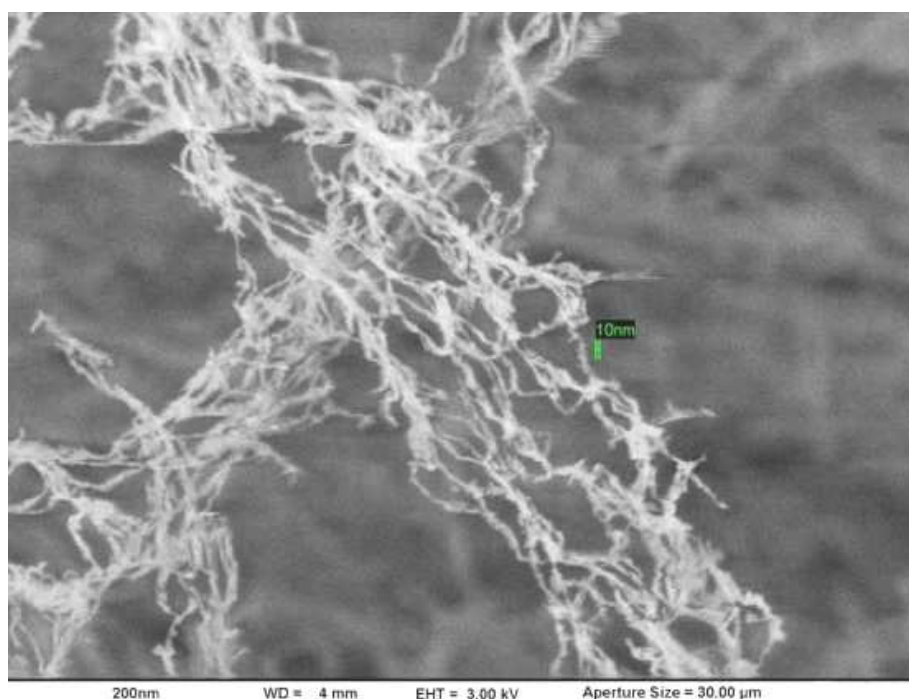


Рис. 2. Характерные размеры нановолокна аэрогеля AlOOH (Ga-Al)

Отработавшая паро-водородо-аргоновая смесь через выходной патрубок реакционной емкости направляется на вход в конденсатор влаги отработавшего газа 15 (см. рис. 1). Конденсатор влаги отработавшего газа 15 (конденсатор) является теплообменным устройством, представляющим собой цилиндрическую емкость, оборудованную змеевиком и конденсаторприемником. Конденсатор служит для удаления не прореагировавшего водяного пара из отработавшей паро-водородо-аргоновой смеси перед ее подачей на анализатор водорода (на схеме не показан). В анализаторе водорода измеряется содержание водорода в отработавшей паро-водородо-аргоновой газовой смеси. Анализатор водорода служит средством оперативного контроля за реакцией (1), протекающей в реакционной емкости 3 [3].

Основным преимуществом этой технологии, по сравнению с альтернативными способами производства, является отсутствие применения при производстве автоклавов, характеризующихся большим энергопотреблением, работой при высоких давлениях и температурах. Кроме этого, не требуются кислоты, солевые растворы и другие агрессивные реагенты, усложняющие технологию. Это позволяет существенно упростить техпроцесс производства и на порядок снизить стоимость конечного продукта, при этом по основным характеристикам аэрогель AlOON не хуже своих аналогов, получаемых методом сверхкритической сушки (таблица) [4].

Сравнительные характеристики различных видов аэрогелей

Свойство	Аэрогель AlOON	Аэрогель SiO ₂
Плотность, г/см ³	0,005... 0,10	0,0011...0,65
Пористость, %	90... 99	90...99
Удельная пористость, м ² /г	до 300...800	до 500...950
Толщина волокон, нм	5...10	2...3
Теплопроводность, Вт/(м·°C)	0,01...0,02	0,016...0,03

Таким образом, по каталитическим и сорбционным возможностям аэрогель AlOON не уступает свойствам лучших отечественных и зарубежных сорбентов и катализаторов, а в ряде случаев значительно их превосходит. При этом технологию определяют:

- отсутствие органических растворителей и других вредных химических веществ;
- недорогое оборудование, в частности отсутствие автоклавов высокого давления;
- технология исключает сверхкритические давления и высокие температуры.

Все это существенно упрощает технологический процесс и снижает стоимость конечного продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hunt Arlon. History of silica aerogels / A. Hunt [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. – Беркли: [б.и.], 2002. – Режим доступа: <http://energy.lbl.gov/ecs/aerogels/>.
2. Способ получения аморфного мезопористого аэрогеля гидроксида алюминия со слоисто-волоконистой микроструктурой: пат. 2305659 Рос. Федерация, МПК C01F7/02, B01D12/00 / Асхадуллин Р.Ш., Мартынов П.Н., Юдинцев П.А.; заявитель и патентообладатель Асхадуллин Р.Ш., Мартынов П.Н., Юдинцев П.А.; заявл. 30.08.05; опубл. 10.03.07 // Бюл. № 23 (II ч.). – С. 1–3 .
3. Способ получения аморфного мезопористого аэрогеля гидроксида алюминия со слоисто-волоконистой микроструктурой: пол. мод. 81490 Рос. Федерация, МПК C01F7/02, B01D12/00 / Асхадуллин Р.Ш., Мартынов П.Н., Юдинцев П.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Обнинский центр науки и технологий».
4. Askhadullin, R.Sh. Liquid metal based technology of synthesis of nanostructured materials / R.Sh. Askhadullin, P.N. Martynov, A.A. Osipov // J. Phys.: Conf. Ser. – № 8. – С. 1–2.
5. Мартынов, П.Н. Наноматериалы / П.Н. Мартынов // Новые промышленные технологии. – 2004. – № 3. – С. 3–5.
6. Р.Ш. Асхадуллин, П.Н. Мартынов, П.А. Юдинцев, И.С. Курина // Нанотехника. – 2005. – № 2. – С. 15.

УДК 666.965

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА

Р.В. ПУЗИКОВ, С.А. КОНОВАЛОВ, Д.Ю. ГРЕК
(Представлено: канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ)

Рассматриваются деформативные характеристики бетона и их применение в строительстве автомобильных дорог. Это является важным фактором при проектировании автомобильных дорог, так как проблема больших деформаций бетона на сегодняшний день актуальна. Для доскональной оценки деформативных характеристик бетона необходимо углубиться в сам состав монолита, в его упаковку, а также рассмотреть межпоровые каналы.

Бетон как материал для железобетонных конструкций должен обладать вполне определенными, наперед заданными физико-механическими свойствами: необходимой деформативностью, хорошим сцеплением с арматурой, достаточной плотностью (непроницаемостью) для защиты арматуры от коррозии.

В зависимости от эксплуатационных дорожных условий (горизонтальные участки, прямолинейные в плане, участки с продольным уклоном, участки на кривых в плане, участки на кривых в продольном профиле и др.), а также от режима движения (равномерное движение с постоянной скоростью, ускоренное или замедленное движение и др.) в процессе движения автомобиля по дороге на дорожную «одежду» действуют различные силы взаимодействия между колесами автомобиля и дорожной конструкцией.

К ним относятся силы, нормальные к поверхности проезжей части, и силы, касательные к поверхности проезжей части, которые в свою очередь подразделяются на силы, направленные вдоль траектории движения колес, или продольные, и силы, направленные перпендикулярно к траектории движения колес, или поперечные.

Нормальная сила давления колеса (от веса автомобиля), воздействующая на дорожную одежду, является основной расчетной нагрузкой для ее проектирования и расчета на прочность.

Под деформативностью твердых тел понимают их свойство изменять размер и форму под влиянием силовых воздействий и несиловых факторов. В соответствии с этим деформации твердых тел разделяют на силовые и несиловые. Под *несиловыми* понимают деформации, проявляющиеся вследствие нарушения гигрометрического баланса парового давления, изменения температур. Несиловые деформации (усадка, набухание, температурные воздействия) являются объемными и развиваются одинаково во всех направлениях. Свободное несиловое деформирование не сопровождается изменением напряженного состояния твердого тела. Стесненные несиловые деформации приводят к возникновению напряжений, называемых собственными напряжениями твердого тела. Эти напряжения могут служить причиной разрушения материала.

Под *силовыми* понимают деформации, проявляющиеся под воздействием внешних сил. Силовые деформации твердых тел развиваются преимущественно вдоль направления действия внутренних усилий. Они проявляются в виде сжатия, растяжения, сдвига. Одновременно с ними, как следствие продольного деформирования, возникают поперечные деформации. Деформативность твердых тел обусловлена их физической природой, поэтому разделение деформаций на силовые и несиловые, предполагающее их взаимнезависимость, является условным. В действительности силовые и несиловые деформации взаимосвязаны. Например, изменения влажности или температуры образцов приводят к изменению их механических характеристик (модуль упругости, меры ползучести) и тем самым влияют на проявление силовых деформаций.

По временной связи с напряжениями силовые деформации бывают мгновенные и запаздывающие. Мгновенные деформации фиксируют при неизменных во времени напряжениях; они развиваются одновременно с изменением напряжения, проявляются со скоростью, близкой к скорости звука, и прекращаются мгновенно, как только стабилизируются напряжения. Величина их зависит от упругопластических свойств материала, поэтому их часто называют упругопластическими деформациями.

В литературе часто при рассмотрении мгновенного деформирования материала имеют в виду однократное изменение формы и размеров тела при нагружении кратковременной нагрузкой. На самом деле всякое нагружение осуществляется во времени, поэтому неправильно сопоставлять экспериментальные результаты, полученные разными исследователями. Под мгновенным (в статическом понимании) понимают загрузку образцов с немедленным автоматическим отсчетом деформаций. Для получения запаздывающих деформаций (ползучести) необходимо одновременно испытывать серию образцов-близнецов: у одних образцов замерять общие силовые деформации, а у других – мгновенные силовые деформации. Разность между ними даст значение деформации ползучести материала. Запаздывающие деформации развиваются и при постоянных напряжениях; теоретически они стабилизируются лишь в бесконечной отдаленности, если напряжения не превышают длительной прочности материала.

В литературе принято силовые деформации условно разделять на линейные и нелинейные. Под *линейными* понимают деформации, которые пропорциональны напряжению. Линейные мгновенные деформации являются упругими. При этом должно соблюдаться требование одинаковой меры ползучести при сжатии и растяжении, загрузении и разгрузении. Под *нелинейными* понимают мгновенные пластические и запаздывающие деформации; они непропорциональны напряжениям. Под непропорциональностью связи между напряжениями и деформациями понимают следующее: если несколько образцов-близнецов нагрузить разными силами, то запаздывающие деформации, накопленные образцами за равные промежутки времени, не пропорциональны этим силам. Нелинейность деформирования твердых тел связывают с их структурными и возрастными изменениями.

С ростом прочности материала и уплотнении структуры за счет предшествующих стационарных или многократно переменных силовых воздействий условный порог нелинейности деформирования материала сдвигается в сторону нагружения. В этом одно из проявлений влияния предшествующего характера деформирования на сопротивление материала силовым нагружениям. Разгрузка материала происходит практически линейно, так как определяется упругой частью мгновенных деформаций и упругим последствием запаздывания. Деформации нагружения всегда больше, чем деформации разгрузки. Разница между ними представляет собой остаточные деформации. Доля остаточных деформаций растет с ростом уровня нагружения и падает по мере старения материала, с увеличением его прочности, после активного силового предшествующего воздействия, например, после многократно переменного нагружения.

Взаимосвязь между напряжениями, временем и деформациями, а также другими факторами, определяющими механическое состояние материалов, описывают с помощью так называемых физических уравнений. Уравнения механического состояния материалов, используемые в механике твердого тела, являются феноменологическими, т.е. построенными на базе экспериментальных данных с помощью некоторых рабочих гипотез. Как правило, эксперименты проводят над простейшими образцами при эталонных напряженных состояниях и режимах нагружения. Рабочие гипотезы представляют собой обобщение опыта и связаны с фундаментальными исследованиями естественных наук.

Бетон является материалом с ярко выраженными упругопластическими свойствами. Уже при небольших напряжениях в нем, кроме упругих (восстанавливающихся) деформаций, развиваются пластические (остаточные), зависящие от характера приложения и длительности действия нагрузки, возраста бетона и режима нагружения. Чем бетон старше, тем выше его сопротивление деформированию. Для бетона силовые деформации подразделяют на три вида: при однократном нагружении кратковременной нагрузкой, при длительном действии нагрузки, при многократно повторяющейся нагрузке.

Динамическое деформирование бетона имеет дополнительную специфику. Мгновенные деформации бетона (упругие и пластические) не связаны режимом и длительностью нагружения; они определяются лишь конечными напряжениями. Деформации ползучести бетона как запаздывающие всегда связаны режимом и длительностью приложения нагрузки; их величина уменьшается по мере увеличения возраста бетона к моменту начала нагружения.

При силовых воздействиях твердые тела деформируются. В теории деформаций бетона рассматривают относительные деформации, равные отношению абсолютного удлинения (укорочения, поворота сечения) элемента к его первоначальному размеру, измеряемому до наблюдения. Здесь вместо термина относительные деформации употребляется слово «деформации». Мерой деформаций твердых тел являются удельные деформации. В общем случае сопротивление деформированию твердых тел уменьшается с приближением действующих напряжений к пределу прочности материала, а удельные деформации растут. Удельные деформации, таким образом, являются функциями напряжений. В этом проявляется нелинейность деформирования, и это определяет нелинейную постановку задачи в теории железобетона. В частных случаях сопротивление деформированию твердых тел усредняется на всем возможном диапазоне изменения напряжений – от нулевых значений до предела прочности. Тогда считается, что удельные деформации не зависят от величины действующих напряжений. В этом – приближенная, линейная постановка задачи теории железобетона.

У материалов, чьи механические свойства меняются со временем, в частности у стареющих бетонов, мгновенные деформации, как и деформации ползучести, зависят от режима нагружения. У материалов со стабильными механическими свойствами, в частности у так называемых старых бетонов, от режима нагружения зависят лишь деформации ползучести. Подавляющее большинство строительных конструкций находятся в условиях неоднородного напряженного состояния (изгиб, внецентренное сжатие или растяжение) и величины напряжений в разных их сечениях и даже точках по сечениям неодинаковы; например, у простой балки, опирающейся на две шарнирные опоры, при равномерной нагрузке наибольшие моменты и наибольшие фибровые напряжения будут посередине пролета, а наименьшие – у опор; одновременно по высоте каждого сечения на нулевой оси напряжения равны нулю и имеют экстремальные значения вблизи границы сечения (на фибровом волокне). Прямой учет многочисленной изменчивости деформативных характеристик бетона с помощью признанных методов строительной механики становится неоправданно трудоемким и поэтому не используется. На практике применяются более простые инженерные способы.

Как показывают опыты и практика эксплуатации зданий, при продолжительном действии постоянной нагрузки деформации каменных, бетонных и железобетонных конструкций не остаются неизменными, а увеличиваются во времени. Процесс деформирования остается неравновесным весьма длительное, а теоретически – неограниченное время; развитие деформаций, следуя за напряжениями, запаздывает во времени. Конечные полные деформации конструкций могут за 3–4 года в несколько раз превышать мгновенные деформации.

Ползучестью называют свойство бетона, характеризующееся нарастанием неупругих деформаций при длительном действии нагрузки. Деформации ползучести бетона обусловлены его структурными несовершенствами; абсолютная величина деформаций ползучести зависит от возраста, прочности бетона и материалов его составляющих, влажности среды и предыстории деформирования; она уменьшается по мере старения бетона, увеличения его прочности в момент нагружения и уплотнения после предшествующего многократного знакопеременного деформирования. Являясь силовой деформацией, деформации ползучести бетона тем больше, чем выше уровень напряжений. При этом скорость деформаций ползучести бетона затухает во времени, асимптотически приближаясь к нулевому значению. Наибольшую интенсивность нарастания деформаций ползучести бетона наблюдают в первые 3–4 месяца.

При стеснении деформации ползучести напряженное состояние сечения бетонного образца меняется. Доля упругих деформаций и, следовательно, величина напряжений уменьшаются, а доля деформаций ползучести бетона возрастает. Происходит замещение одних деформаций другими. Ползучесть бетона увеличивается с уменьшением размеров испытываемого образца и уменьшается с понижением водоцементного отношения, увеличением влажности окружающей среды. На деформации ползучести бетона оказывают также непосредственное влияние зерновой состав бетона, вид цемента, крупных и мелких заполнителей, технологические и многие другие факторы.

Бетоны на пористых заполнителях обладают большей ползучестью по сравнению с тяжелыми бетонами. Нелинейная ползучесть бетона обуславливает перераспределение напряжений по высоте бетонных сечений и в статически неопределимых железобетонных конструкциях. При проектировании предварительно напряженных железобетонных конструкций нормы учитывают быстроснатекающую ползучесть, под которой понимают ползучесть бетона, проявляющуюся непосредственно после нагружения бетона.

Релаксацией напряжения бетона называют процесс снижения напряжения при стеснении его деформаций. Если деформации бетона нарастают свободно, напряжения в сечениях элементов остаются постоянными. В железобетоне ненапрягаемая арматура стесняет свободное развитие деформаций ползучести бетона, поэтому напряжения в бетоне не будут оставаться постоянными. Они будут снижаться, но мере ползучести бетона, а в арматуре в связи с самоуравновешиванием – увеличиваться. Ползучесть и релаксация напряжений бетона имеют общую физико-механическую основу. Математически они взаимосвязаны и оказывают существенное влияние на работу железобетонных конструкций, испытывающих воздействие длительной нагрузки. Ползучесть бетона и релаксация напряжений (реологические свойства бетона) обуславливают рост прогибов железобетонных конструкций с течением времени, снижают предварительные напряжения в арматуре, способствуют перераспределению усилий в железобетонных статически неопределимых системах. Многократно повторные нагрузки могут иметь как статический, так и динамический характер. Статическими многократно повторными нагрузками являются такие, возрастание и снижение которых происходит медленно, а силы инерции не оказывают влияния на результаты расчета.

К динамическим многократно повторным нагрузкам относят меняющиеся во времени нагрузки, при которых нельзя пренебречь влиянием инерционных сил на напряженно-деформированное состояние элементов конструкций или конструкций в целом.

К статическим многократно повторяемым можно отнести нагрузки от периодически освобождаемых хранилищ, к динамическим – нагрузки от вибрационных машин. Площадь петли означает энергию, необратимо рассеянную единицей объема тела за один цикл нагружения – разгрузки за счет несовершенства деформативных свойств материала. При повторении циклов нагрузка – разгрузка происходит постепенная выборка неупругих деформаций; при этом площадь петли гистерезиса постепенно уменьшается, достигая в пределе стабильной величины. Если при загрузке образца напряжения не превосходят предел выносливости бетона, деформации, постепенно затухая, достигают предельной величины, а стабильная зависимость между напряжениями и деформациями сохраняется при неограниченно большом числе циклов загрузки.

Снижение длительной прочности и виброползучести бетона проявляется резче с ростом уровня напряжений, асимметрии циклов и частоты колебаний и смягчаются с увеличением исходных возраста и класса бетона. Указанные изменения механических свойств бетона существенно влияют на несущую способность и деформативность железобетонных конструкций, поэтому их учитывают при расчетах.

Под предельными деформациями бетона при растяжении (или сжатии) понимают относительные средние удлинения (или укорочения) в момент разрушения центрально-растянутых (центрально-сжатых) образцов, испытанных по государственному стандарту. Предельная растяжимость бетона 0,1...0,2 мм/м длины образца. Предельная растяжимость увеличивается при влажном хранении (примерно вдвое) с уве-

личением длительности приложения нагрузки и уменьшается с повышением прочности и плотности бетона. От предельной растяжимости бетона зависит сопротивляемость растянутых зон сечений железобетонных элементов образованию трещин.

Предельное относительное укорочение бетона в 10...20 раз больше его предельного относительного удлинения и составляет 0,8...4 мм/м длины образца. Предельная сжимаемость бетона в сжатой зоне изгибаемых железобетонных элементов достигает 0,003...0,005. При уменьшении ширины сечения к низу, особенно в тавровых сечениях с полкой в сжатой зоне, уменьшается, а при уменьшении высоты сжатой зоны сечения – увеличивается.

У бетонов на пористых заполнителях предельная сжимаемость и растяжимость бетона примерно в два раза выше, чем у тяжелых бетонов тех же марок. Предельные поперечные деформации бетона при сжатии и растяжении определяют соответственно по предельным продольным относительным деформациям сжатия и растяжения посредством коэффициента поперечной деформации (коэффициента Пуассона) $\nu = 0,2$. Рост поперечных деформаций как при сжатии, так и при растяжении способствует образованию в бетоне микротрещин. Это отрицательно сказывается на морозо- и коррозионности бетона.

Процедура получения полной диаграммы деформирования бетона при сжатии (рис. 1) на первый взгляд выглядит несложной. Для этого опытный бетонный образец, оснащенный измерительными приборами для регистрации продольных деформаций необходимо поместить в испытательную машину, создающую осевую нагрузку. Измерение продольных деформаций в процессе нагружения производят, например, при помощи индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм, устанавливаемых на базовой длине l_0 . В качестве материала упругой полоски выбрана алюминиевая фольга А1 0.10 * 450 ГОСТ 618-62 (толщина 0,1 мм), изготовленная из технического алюминия марки АД по ГОСТ 4784-49 тип М – мягкая, отожженная, модуль упругости $7,1 \cdot 10^5$ кг/см² (Алюминиевая фольга ГОСТ 618-62). После исследования физико-механических характеристик фольги на нее наклеивались восемь тензодатчиков: четыре с базой 200 мм и сопротивлением 200 Ом типа ПКБ-20-200 и четыре тензодатчика того же типа, но с базой в 100 мм и сопротивлением 100 Ом. Наклейка датчиков на фольгу производилась по типовой технологии.

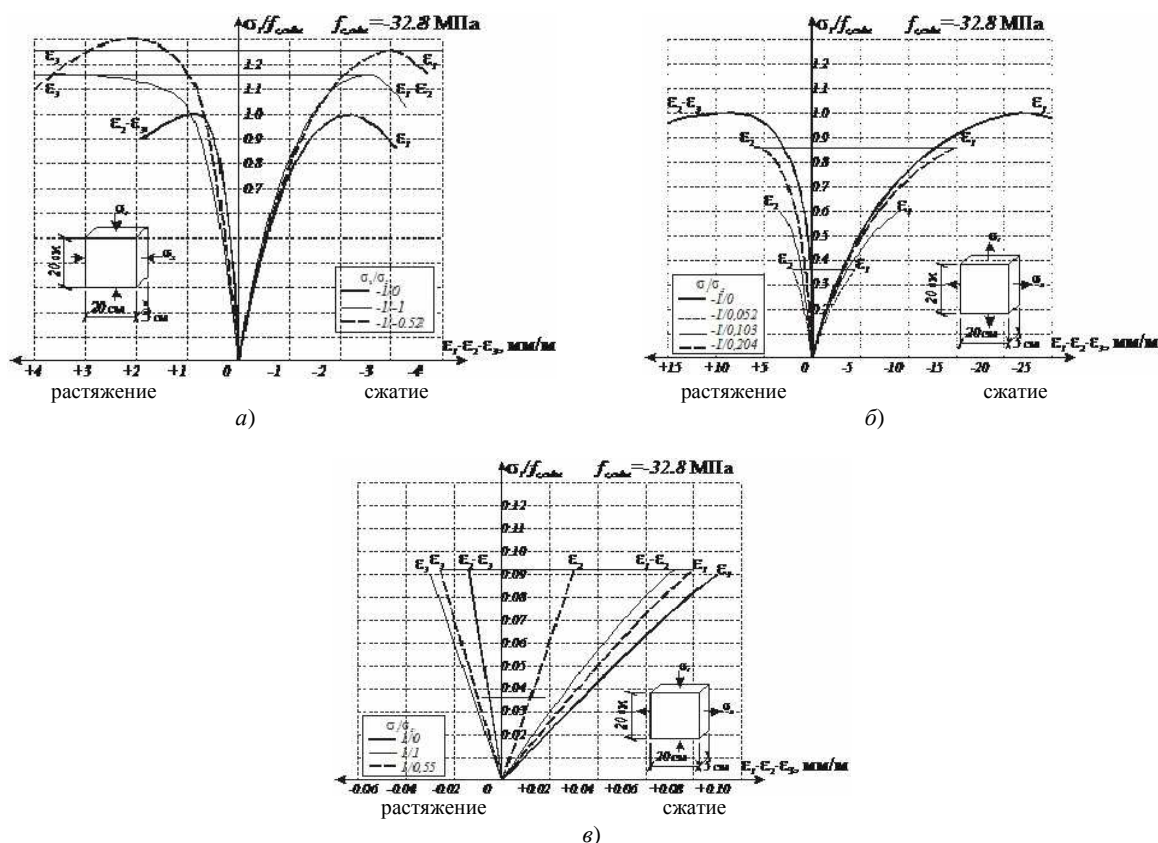


Рис. 1. Зависимости «напряжения – относительные деформации»:
 а – в условиях двухосного сжатия; б – в условиях двухосного растяжения;
 в – в условиях комбинации напряжений сжатия растяжения

В соответствии с положениями норм по проектированию железобетонных конструкций диаграмму деформирования (состояния) бетона, устанавливающую связь между напряжениями и продольными от-

носительными деформациями бетона при кратковременном действии однократно приложенной нагрузки вплоть до установленных ее предельных значений, отвечающих разрушению бетона при однородном напряженном состоянии, следует рассматривать в качестве обобщенной характеристики механических свойств бетона (рис. 2).

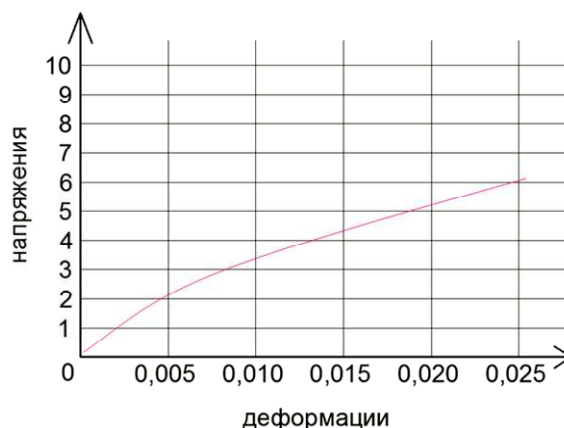


Рис. 2. Зависимость напряжений от деформаций

Источник: собственная разработка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Салль, А.О. Возможности и пути повышения качества щебеночных оснований / А.О. Салль [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://library.stroit.ru/articles/sheben/>. – Дата доступа: 29.10.2013.
2. Кейльман, В.А. Из опыта комплексных экспериментальных исследований и испытаний элементов дорожных сооружений на прочность и долговечность в условиях Юга РСФСР / В.А. Кейльман, А.С. Недодаев // Экспериментальные исследования инженерных сооружений. – Новочеркасск, 1969. – С. 171–173.
3. Мурзенко, Ю.Н. Экспериментальные исследования инженерных сооружений / Ю.Н. Мурзенко // Основные принципы моделирования совместной работы фундаментов и песчаного основания / Ю.Н. Мурзенко. – Новочеркасск, 1969 – С. 85–93.
4. Технология строительного производства: учебник для вузов / Л.Д. Акимова [и др.]; под ред. Г.М. Бадьина, А.В. Мещанинова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1987.
5. Соломатов, В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов // Новые композиционные материалы в строительстве: науч. тр. / Саратов. политехн. ин-т; под ред. В.И. Соломатова. – Саратов, 1981. – С. 5–9.
6. Рыбьев, И.А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ (искусственные строительные конгломераты) / И.А. Рыбьев: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 309 с.
7. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В.А. Вознесенский [и др.]. – Киев: Будівельник, 1983. – С. 3–143.
8. Тулаев, А.Я. К проблеме уплотнения зернистых материалов / А.Я. Тулаев // Строительство и архитектура. Серия 1 / Новосиб. инженерно-строительный ин-т им. В.В. Куйбышева, 1980. – С. 81–86.
9. Bartos, M.I. Конструкции из армированного грунта / M.I. Bartos // Строительство и архитектура. Серия 8, Строительные конструкции. Строительная физика: науч.-техн. рефератив. сб. / под ред. О.М. Попковой. – М., 1979. – № 9. – С. 47–52.
10. Синюков, А.Д. Прочность и жесткость заделки полособых анкеров в бетоне / А.Д. Синюков // Совершенствование технологии и расчета железобетонных конструкций: сб. науч. тр. / НИИЖБ. – М.; б. и., 1984. – С. 89–100.
11. Определение прочности образцов армированного грунта / Экспресс-информация. Серия 8, Строительные конструкции (отечественный опыт). – М., 1985. – Вып. 1. – С. 13–16.
12. К вопросу об устройстве анкерных систем в толще грунта // Intern. Construction, 1985. – Vol. 24, № 6. – С. 18–19.
13. Методы исследования структуры высокодисперсных и пористых тел / под ред. М.Л. Дубинина. – М.: Изд. АН СССР, 1958. – 296 с.
14. Пористые порошковые материалы и изделия из них / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Высш. шк., 1987. – 164 с.

УДК69.034.93

К ВОПРОСУ О ДИНАМИКЕ ПРОЦЕССА ЗАГРУЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Р.В. ПУЗИКОВ, С.А. КОНОВАЛОВ, Д.Ю. ГРЕК
(Представлено: кан. тех. наук Д.Н. ШАБАНОВ)

Рассмотрены способы, позволяющие повысить прочность грунтов, применяемых в качестве оснований как естественных, так и искусственных, а также в качестве материала для грунтовых сооружений (плотин, дамб, насыпей).

Грунты с существенной неоднородностью гранулометрического состава широко применяются в качестве оснований как естественных, так и искусственных, а также в качестве материала для грунтовых сооружений. При проектировании оснований и конструкций из неоднородных грунтов в настоящее время используется математический аппарат механики грунтов как однородных сред, что может привести к ошибочным результатам, а порой и к аварийным ситуациям. В действительности грунтовая среда является гетерогенной средой, состоящей из многих компонентов (твердых, жидких, газообразных), в которой распределение напряжений и деформаций неоднородное. В связи с этим представительный объем эквивалентной однородной среды во многом зависит от минералогического и гранулометрического состава и строения грунтовой среды, от соотношений объемов, занимаемых твердой, жидкой и газообразной составляющими. В зависимости от их соотношений физико-механические свойства меняются в широких пределах. Тем не менее представление о грунте как о однородной среде позволило решить многие практические задачи прикладной механики грунтов. Если рассмотреть любое сечение грунтовой среды, то очевидно, что распределение напряжений в нем неоднородное. Осредненное значение напряжений по этому сечению позволяет описать напряженно-деформированное состояние (НДС) в представительном объеме грунта с обобщенными эквивалентными характеристиками деформируемости и прочности грунта в целом. С решением таких задач приходится сталкиваться при проектировании искусственных оснований, грунтовых сооружений, а также при определении прочностных и деформационных характеристик грунтов с существенной неравномерностью гранулометрического состава в естественном состоянии.

В настоящее время теоретическая и прикладная механика грунтов при описании НДС массивов грунтов, взаимодействующих с инженерными конструкциями, использует теорию линейно-деформируемой сплошной однородной изотропной среды. Теория линейного деформирования грунта базируется на предположении о линейном деформировании при однократном нагружении (или разгрузке) в небольшом диапазоне напряжений. Кроме того, при нагружении рассматривается лишь общая деформация грунта без разделения ее на упругую и пластическую составляющие.

Применение методов теории упругости позволило получить точные математические решения для многих упрощенных задач, таких как задача о действии сосредоточенной силы и распределенной нагрузки на полуплоскость и полупространство и др.

В данной работе возникновение цепочек частиц было продемонстрировано с помощью метода фотоупругости в плоском лотке, заполненном фотоупругими дисками. На рисунке 1 представлены фотографии в поляризованном свете.

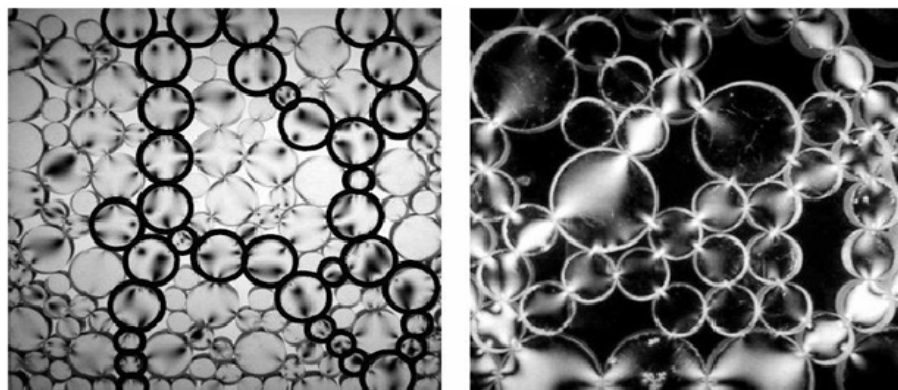


Рис. 1. Распределение напряжений в скелете (фотоупругие элементы)

При этом возникает концентрация нормальных и касательных напряжений на контактах между частицами и вблизи них как при сдвиговом нагружении, так и при всестороннем сжатии, что приводит к

развитию пластических деформаций в условиях компрессии. Это предположение косвенно подтверждает наличие связи между прочностными и деформационными характеристиками грунта.

В зависимости от дорожных условий (горизонтальные участки, прямолинейные в плане, участки с продольным уклоном, участки на кривых в плане, участки на кривых в продольном профиле и др.), а также от режима движения (равномерное движение с постоянной скоростью, ускоренное или замедленное движение и др.) в процессе движения автомобиля по дороге на дорожную одежду действуют различные силы взаимодействия между колесами автомобиля и дорожной конструкцией. К ним относятся силы, нормальные к поверхности проезжей части, и силы, касательные к поверхности проезжей части, которые, в свою очередь, подразделяют на силы, направленные вдоль траектории движения колес, или продольные, и силы, направленные перпендикулярно к траектории движения колес, или поперечные.

Нормальная сила давления колеса (от веса автомобиля), воздействующая на дорожную одежду, является основной расчетной нагрузкой для ее проектирования и расчета на прочность (рис. 2).

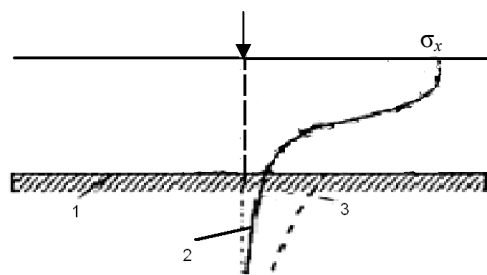


Рис. 2 Напряжения в многослойной дорожной одежде:
эпюра вертикальных напряжений σ_v ;

1 – подстилающий грунт; 2 – напряжения в дорожной одежде; 3 – напряжения в однородном грунте

Статические и динамические вертикальные (нормальные) и касательные (тангенциальные) силы, передаваемые колёсами транспортных средств через дорожную одежду на земляное полотно, вызывают напряжения и деформации в его теле, вследствие чего земляное полотно изнашивается и разрушается.

При достижении недопустимых напряжений в грунте земляного полотна возникают существенные деформации в виде осадок, расползания насыпей, сползания откосов и т.д. Величина допустимых напряжений в грунте зависит от его физико-механических свойств, которые, в свою очередь, зависят от типа грунта, степени его уплотнения и влажности. Кроме того, под действием природно-климатических факторов могут возникать деформации и разрушения земляного полотна, которые в начальной стадии не оказывают влияния на состояние дорожной одежды. Это различные формы размывов земляного полотна, выдувание обочин и др. Однако эти деформации и повреждения должны быть немедленно устранены, поскольку при дальнейшем их развитии разрушение дороги примет общий характер.

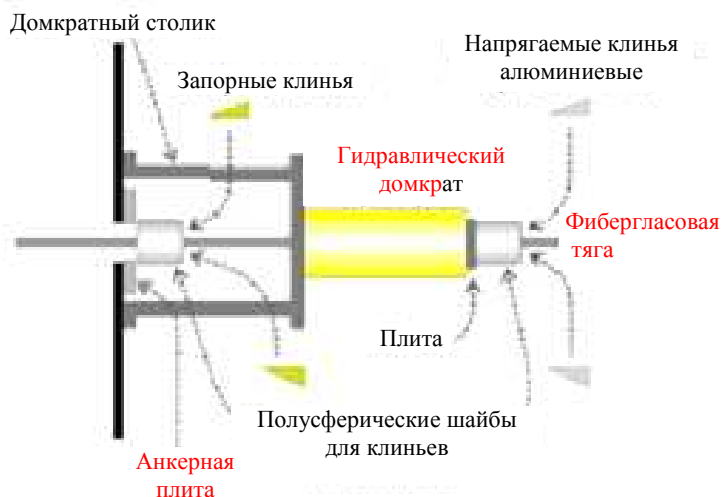
Под деформацией понимают изменение размеров или формы тела без уменьшения его массы и без потери сплошности. Разрушение – это изменение размеров и формы тела с изменением (уменьшением) массы тела или потерей сплошности. В практической деятельности все виды деформаций и разрушений часто относят к дефектам состояния дороги, которые включают в себя также отступления от проектных решений или нормативных требований по геометрическим параметрам, инженерному оборудованию и обустройству дорог, организации и безопасности движения, эксплуатационному состоянию дорог и др.

Причиной возникающих деформаций могут быть проектные ошибки и строительные недостатки, недостатки в содержании и ремонте, условия эксплуатации дорог, природно-климатические факторы. Чаще всего причиной возникновения деформаций является сочетание нескольких из перечисленных факторов, действующих одновременно. На правильно спроектированной, построенной и эксплуатируемой дороге в пределах межремонтных сроков службы дорожных одежд и покрытий не должно быть разрушений (кроме износа покрытий), но могут быть деформации в допустимых пределах. Существуют способы повышения прочностных характеристик естественных грунтов под автомобильными дорогами. Одним из способов является возведение подпорных стенок. Подпорные стены, бетонизируемые на месте строительства, возводят из бетона или с минимальным количеством конструктивной арматуры, а также из железобетона. В ряде случаев возводят подпорные стены комбинированной конструкции, сочетающие монолитную массивную часть со сборными железобетонными элементами. Так, например, в массив стенки можно заделать железобетонные консольные плиты или анкерные элементы. Эти элементы служат одной цели – созданию в стене моментов, обратных по направлению тем, что появляются от давления засыпки. Однако при этом усложняется производство работ. Чтобы предохранить подпорные стены от проникновения в них влаги, со стороны засыпки устраивают дренаж. Кроме того, поверхность под-

порных стен, соприкасающуюся с грунтом, покрывают защитным слоем гидроизоляции из битумной обмазки, наносимой холодным или горячим способом. Прилегающая к стене засыпка должна состоять из крупнозернистого песка или гравия. Изделия из стекловолокна нашли широкое применение в строительстве в качестве арматуры с последующем её преднапряжением. Для этого обязательным условием является наличие концевых захватов. Прототипом может служить фиброгласовый анкер, а методику его установки можно использовать и для стеклопластиковой арматуры (рис. 3, а, б).



а)



б)

Рис. 3. Повышение устойчивости грунтов (а), схема установки (б)

Рассмотрим два вида разрушения подпорных стен: сдвиговое и разрывное. При сдвиговом разрушении предполагается нарушение сцепления армирующих элементов с грунтом и их выдергивание из грунта. Разрывное разрушение наступает от разрыва армирующих элементов при их растяжении.

Нами были найдены величина шага и длина армирующих элементов в зависимости от величины давления грунта на наружную оболочку стенки. Выявлено, что выдергивание армирующих элементов можно предотвратить правильно рассчитанной нагрузкой от собственного веса грунта, а также оптимальным набором сечений и прочностных характеристик армирующих элементов.

Экспериментальные исследования были проведены на моделях подпорной стенки (рис. 4), находящихся под воздействием статической и динамической нагрузок. Место приложения нагрузок и высота

подпорной стенки были величинами постоянными, в то время как длина армирующих элементов и величины нагрузок принимались переменными.

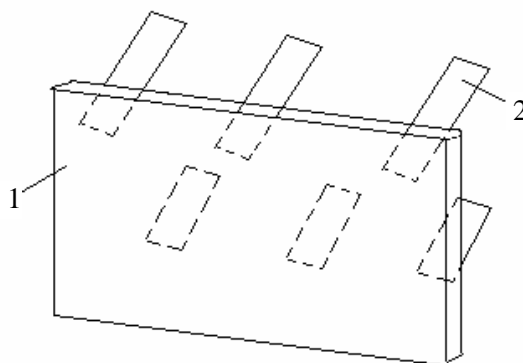


Рис. 4. Схема модели подпорной стенки из армированного грунта (1 – наружная оболочка; 2 – армирующие элементы)

Зависимость между напряжениями и деформациями хрупких материалов можно выразить через формулу:

$$e = \frac{1}{E} (\rho + b_1 \rho^2 + b_2 \rho^3 + \dots),$$

где E – постоянный модуль упругости, b_1, b_2 – опытные коэффициенты.

Эта формула носит название «параболического закона». При малых значениях напряжений ρ , когда членами, содержащими квадрат и более высокие степени напряжений, можно пренебречь, параболический закон переходит в закон Гука. По данным Тимошенко, формула параболического закона удовлетворяет условиям напряжений для хрупких материалов. Наблюдая деформации хрупких материалов под нагрузкой, можно установить следующие виды деформаций:

- почти мгновенно наступающая обратимая деформация (деформация, подчиняющаяся закону Гука);
- медленно наступающая обратимая деформация, скорость которой уменьшается во времени и которая медленно, но полностью восстанавливается (упруго-вязкое перемещение);
- медленно идущая необратимая деформация, скорость которой уменьшается со временем (вязкое перемещение).

Величину деформаций тела под нагрузкой можно определить по следующей формуле:

$$e = f(\rho) + f_1(\rho, t),$$

где e – величина общей деформации; $f(\rho)$ – упругая деформация, совершающаяся почти мгновенно и зависящая только от величины нагрузки ρ ; $f_1(\rho, t)$ – остаточная деформация, зависящая как от величины нагрузки ρ , так и от продолжительности действия этой нагрузки t .

Продолжительность действия нагрузки имеет большое значение при учете величины деформации тела. По данным Д.С. Ростовцева, деформирование образцов бетона при нормальном давлении продолжается в течение длительного времени. В тесной связи с действием времени находится явление релаксации хрупких материалов, т.е. исчезновение у них способности к сопротивлению к действующим на них нагрузкам, что приводит к явлениям ползучести. Момент перехода твердого тела в пластичное состояние отмечается появлением на поверхности образца так называемых линий Людерса (пластическое состояние тела можно представить себе как скольжение слоев тела по определенным кристаллографическим плоскостям), свидетельствующих о нарушении сил сцепления в теле и о том, что свойства в этот момент будут определяться наличием внутреннего трения, показателем которого является угол внутреннего трения. Для определения этого угла рассмотрим механическую сторону разрушения образца под влиянием сжимающей нагрузки. Возьмем твердое тело с поперечным сечением 1 см^2 .

Представим себе, что данное тело подвергается действию сжимающих сил ρ .

Сила, действующая в плоскости площадки и стремящаяся сдвинуть одну часть тела относительно к другой, равна

$$\rho_1 = \rho \cdot \sin \theta.$$

Этому сдвигу сопротивляются две силы:

- внутренняя тангенциальная сила, являющаяся следствием сцепления части тела, равная $\frac{C}{\cos\theta}$,

где C – сила сцепления на 1 квадратную единицу поперечного сечения тела;

- тангенциальная сила трения, равная $f \cdot p \cdot \cos\theta$, где f – коэффициент трения.

Для интерпретации моделей используется методика, согласно которой изменение свойств внутри одного смесового треугольника (W) отображается в базовых точках (центроидах) другого треугольника (V). Элементом процедуры является построение треугольной диаграммы, «состав – свойство» в каждой базовой точке. Модель «состав – свойство», отображаемая на такой диаграмме, следует из модели «состав – состав – свойство» при постановке в нее фиксированных значений соответствующей группы смесевых факторов.

Таким образом, величина насыпной плотности смешанного вяжущего зависит от межчастичных контактных взаимодействий, поэтому анализ смесей порошков должен производиться с обязательным учетом соотношения сил сцепления между частицами и их массой, что достигается при правильном решении задачи оптимизации фракционного состава дисперсных смесей

ЛИТЕРАТУРА

1. Амелина, Е.А. Изучение некоторых закономерностей формирования контактов в пористых дисперсных структурах / Е.А. Амелина, Е.Д. Шукин // Коллоидн. журн. – 1970. – Т. 32, № 6. – С. 795–800.
2. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. – М.: Высш. школа. 1961. – 537 с.
3. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов. – М.: Высш. шк., 1978.
4. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1971. – 367 с.
5. Денисов, Н.Я. Инженерная геология / Н.Я. Денисов. – М.: Госстройиздат, 1960.
6. Друккер, Д. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование / Д. Друккер, Б. Прагер // Определяющие законы механики грунтов / под ред. Николаевского. – М., 1975. – С. 166–167.

УДК 666.972.164

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНОЙ ПОДВИЖНОСТИ БЕТОННОЙ СМЕСИ

В.А. ЛЕОНОВИЧ

(Представлено: канд. техн. наук, доц. А.П. ШВЕДОВ)

Исследуется проблема проектирования состава бетонной смеси с обеспечением заданной подвижности в момент её укладки в опалубку. Рассмотрен вариант обеспечения заданной подвижности путём увеличения сохраняемости удобоукладываемости на основе применения химических добавок в бетонные смеси.

Ориентировочно исходная подвижность бетонных смесей с добавкой суперпластификатора может быть определена [1, с. 41] по формуле:

$$OK_{исх} = OK \cdot K_T \cdot K_{II}, \quad (1)$$

где OK – заданная подвижность смеси при её укладке в конструкцию, см; K_T, K_{II} – коэффициенты, учитывающие влияние соответственно способов транспортирования и подачи смеси на изменение её подвижности.

Необходимое количество автотранспортных средств для транспортировки бетонных смесей может быть определено из следующего выражения:

$$N = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5}{T_6} + 1, \quad (2)$$

где T_1 – продолжительность загрузки автотранспортных средств, мин; T_2 – время нахождения автотранспортных средств в пути от завода товарного бетона до стройплощадки и обратно, мин; T_3 – время маневрирования автотранспорта, мин; T_4 – время выгрузки бетонной смеси из автотранспортных

средств, мин; T_5 – время перемешивания бетонной смеси в барабане автобетоносмесителя после введения добавки на объекте, мин; T_6 – интервал доставки бетонной смеси на строительный объект.

Анализ выражений (2) показал, что на исходную подвижность будет влиять не только время транспортирования и подачи бетонной смеси, но и время выгрузки бетонной смеси из автотранспортного средства. Однако такой коэффициент в формуле (1) отсутствует, а по техническим характеристикам (таблица) темп выгрузки величина непостоянная.

Технические характеристики автобетоносмесителей

Показатель	Автобетоносмесители						
	СБ-172-1	СБ-211	СБ-214	СБ-230	СБ-234	СБ-239	581470
Геометрический объем смесительного барабана, м ³	10	14	10	7,5	14	14	12
Ёмкость смесительного барабана по выходу готовой бетонной смеси, м ³ (при объемной массе смеси, т/м ³)	5,4...5,9 (2...2,15)	8 (2)	5...6 (2...2,4)	4 (1,63)	8 (2,1)	8 (1,8)	7 (1,8)
Темп выгрузки, м ³ /мин	0,5...2	0,5...2	0,5...2	0,5...2	0,5...2	0,5...2,2	0,5...2,2

Основываясь на данных, представленных в таблице, можно предположить, что продолжительность выгрузки может составлять до 16 мин. Для сохраняемости подвижности бетонных смесей это довольно большой промежуток времени.

Недостаток применяемых суперпластификаторов – небольшая сохраняемость. Устранить этот недостаток могут добавки, обеспечивающие повышенную сохраняемость бетонных смесей.

Исследования, выполненные в лаборатории ПГУ, показали возможность синтеза добавки в бетонные смеси на основе сульфирования тяжёлых смол пиролиза и алкилбензолов. Эти добавки повышают сохранность подвижности бетонных смесей по сравнению со смесями с добавкой суперпластификатора С-3, на 15...20 мин. Использование данной добавки позволит проводить расчёты, по подбору состава бетонных смесей, используя формулу (1), и не учитывать время выгрузки бетонной смеси из автобетоносмесителя.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Рекомендации по применению добавок суперпластификаторов в производстве сборного и монолитного железобетона. – М.: НИИЖБ, 1987.

УДК 666.972.164

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ВЫГРУЗКИ БЕТОННОЙ СМЕСИ ИЗ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В.А. ЛЕОНОВИЧ

(Представлено: канд. техн. наук, доц. А.П. ШВЕДОВ)

Рассматривается вопрос, касающийся необходимости нормирования времени выгрузки бетонной смеси из автотранспортных средств, так как на сегодняшний день отсутствует нормативная литература, в которой указывалась бы данная характеристика в зависимости от модификации транспортных средств и конкретных условий производства бетонных работ.

Важное свойство бетонных смесей – сохраняемость удобоукладываемости в течение определённого (технологией производства работ) промежутка времени. Сохраняемость подвижности бетонной смеси определяется длительностью перевозки смеси, темпом арматурных и опалубочных работ, временем укладки бетонной смеси. Показатель сохраняемости удобоукладываемости бетонной смеси указывается в документе о качестве на бетонную смесь.

Бетонные работы включают следующие операции: приготовление и транспортировку бетонной смеси, укладку бетона и уход за бетоном в период его твердения.

Транспортирование бетонной смеси, как правило, осуществляется в два этапа: от бетонного завода к строящемуся объекту; от места приемки бетона на стройплощадке непосредственно в бетонируемую конструкцию.

Под транспортировкой бетонной смеси подразумевают её доставку горизонтальным транспортом от места изготовления к строительному объекту и подачу на место её укладки с перегрузкой на другие транспортные средства или без неё. Все средства, предназначенные для транспортировки бетонной смеси, должны обеспечивать сохранение товарных свойств бетона и требуемые темпы бетонирования.

Транспортирование бетонной смеси – довольно непростое мероприятие, которое может существенно сказаться на качестве бетонной смеси. Основное технологическое условие при перевозке бетонной смеси – сохранение ее однородности и обеспечение требуемой для укладки подвижности. Правильно осуществленное транспортирование бетонной смеси в значительной мере определяет качество смеси к моменту ее укладки в конструкцию.

Основные требования при транспортировании бетонной смеси:

- предотвращение расслаивания бетонной смеси;
- сохранение ее качества;
- обеспечение срока доставки до момента ее схватывания.

Оценка сохраняемости удобоукладываемости бетонной смеси заключается в получении и оценке данных об изменении свойства в течение определенного промежутка времени. Сохраняемость удобоукладываемости бетонной смеси является важным показателем в режиме реального времени при известном времени транспортирования бетонной смеси, времени выгрузки, температурных и других условиях доставки бетонной смеси.

Необходимое количество автотранспортных средств для транспортировки бетонных смесей может быть определено из выражения:

$$N = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5}{T_6} + 1,$$

где T_1 – продолжительность загрузки автотранспортных средств, мин; T_2 – время нахождения автотранспортных средств в пути от завода товарного бетона до стройплощадки и обратно, мин; T_3 – время маневрирования автотранспорта, мин; T_4 – время выгрузки бетонной смеси из автотранспортных средств, мин; T_5 – время перемешивания бетонной смеси в барабане автобетоносмесителя после введения добавки на объекте, мин; T_6 – интервал доставки бетонной смеси на строительный объект.

Для определения количества автотранспортных средств, при условии обеспечения заданной подвижности бетонной смеси и при её укладке в конструкцию, необходимо точно знать параметр T_4 .

В соответствии со справочной литературой [1] этот показатель необходимо определять из условия, что темп выгрузки составляет 0,5...2 м³/мин, т.е. время выгрузки бетонной смеси находится в пределах 16 мин. Однако в других источниках [2] нормативное время разгрузки миксера от 40 до 60 мин. Поэтому на отдельно строящихся объектах был выполнен хронометраж с целью определения величины изменения данного параметра.

Результаты проделанной работы показали широкий разброс, зависящий от объективных и субъективных факторов, во времени. Величина данного показателя может достигать 60 мин. Для сохранения удобоукладываемости бетонной смеси во времени это очень большой временной интервал.

Для уменьшения параметра T_4 необходимо в технологической карте на производство бетонных работ предусматривать мероприятия по сокращению потерь времени при выгрузке бетонной смеси из автобетоносмесителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://dorkomteh.ru/excapedia/technic/abs-7-01_69343-012.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: beton-nn.com/Доставка_бетона/.

УДК 622.232

СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Д.В. КЛЮЧНИК

(Представлено: д-р техн. наук, проф. С.Г. ЕХИЛЕВСКИЙ, Е.П. ПОТАПЕНКО)

Задача динамики сорбции вредной примеси лежит в основе многих химических и природоохраных технологий, связанных с очисткой, переработкой и утилизацией сточных вод, шламов, в частности с регенерацией воздуха строительных производств.

При создании математических моделей регенерации атмосферы используемых в строительном производстве необходим развитый теоретико-вероятностный подход к моделированию. Обычно для моделирования этого процесса используют уравнения математической физики. В частности, в области Генри после формирования квазистационарного распределения концентрации вредной примеси доля проскочивших молекул может быть найдена как решение интегро-дифференциального уравнения

$$-\omega'_\xi = e^{-\tau} \left(e^{-\xi} + \int_0^\tau e^\tau d_\tau \omega \right), \quad (1)$$

в котором ω – приведенная концентрация сорбтива; ξ и τ – соответственно безразмерные координата и время [1].

В [1] развит теоретико-вероятностный подход к моделированию динамической сорбционной активности, отличающийся от идеологии уравнений математической физики с их полным детерминизмом при наличии соответствующих граничных и начальных условий. В его рамках $1 - \omega(\xi, \tau)$ – вероятность поглощения молекулы слоем сорбента толщины ξ , а

$$f(\xi, \tau) = \frac{\partial(1 - \omega(\xi, \tau))}{\partial \xi} = -\omega'_\xi(\xi, \tau) \quad (2)$$

– дифференциальная функция распределения координаты элементарного акта сорбции, являющейся, очевидно, случайной величиной. С помощью (1), не решая самого уравнения, можно найти начальные моменты произвольных порядков (см. (13) в [1]):

$$v_n(\tau) = n! \sum_{k=0}^n (-1)^k \tau^k \frac{1}{k!} \sum_{l=0}^k C_{n+1}^l (-1)^l, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

где C_n^l – числа сочетаний. Из теории вероятностей известно, что знание всех моментов эквивалентно знанию закона распределения случайной величины. Опираясь на это обстоятельство, в [1] получено, что при $\tau \geq 18$ случайная величина ξ распределена по закону, близкому к нормальному. Установлена зависимость от времени его параметров

$$m(\tau) = 1 + \tau, \quad \sigma^2(\tau) = 1 + 2\tau, \quad (4)$$

и найдены поправки к $f(\xi, \tau)$, обусловленные асимметрией и эксцессом распределения.

Выполним аналогичное исследование при малых временах. Согласно (4) при $\tau = 0$ математическое ожидание $m(\tau)$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma(\tau)$ совпадают $m(0) = \sigma(0) = 1$. Таким свойством обладает экспоненциальное распределение

$$f(\xi, 0) = e^{-\xi}. \quad (5)$$

С помощью (1), (2) в справедливости (5) легко убедиться непосредственно.

Имея в виду асимптотику (5), плотность вероятности $f(\xi, \tau)$ при отличных от нуля временах будем искать в виде

$$f(\xi, \tau) = e^{-\xi} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\tau^n}{n!} R_n(\xi) \right), \quad (6)$$

где $R_n(\xi)$ – неизвестные функции, подлежащие дальнейшему определению. Для этого воспользуемся (3) и определением начальных моментов

$$v_n(\tau) = \int_0^{\infty} \xi^n f(\xi, \tau) d\xi. \quad (7)$$

Подставив (3) и (6) в (7) получим

$$n! \sum_{k=0}^n (-1)^k \tau^k \frac{1}{k!} \sum_{l=0}^k C_{n+1}^l (-1)^l = \int_0^{\infty} \xi^n e^{-\xi} \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\tau^k}{k!} R_k(\xi) \right) d\xi. \quad (8)$$

Приняв во внимание, что

$$\int_0^{\infty} \xi^n e^{-\xi} d\xi = n!, \tag{9}$$

упростим (8)

$$n! \sum_{k=1}^n (-1)^k \tau^k \frac{1}{k!} \sum_{l=0}^k C_{n+1}^l (-1)^l = \sum_{k=1}^n \frac{\tau^k}{k!} \int_0^{\infty} \xi^n e^{-\xi} R_k(\xi) d\xi. \tag{10}$$

Пусть

$$R_k(\xi) = \sum_{l=0}^k R_{kl} \xi^l, \tag{11}$$

где R_{kl} – искомые коэффициенты.

Подставив (11) в (10), получим с учетом (9)

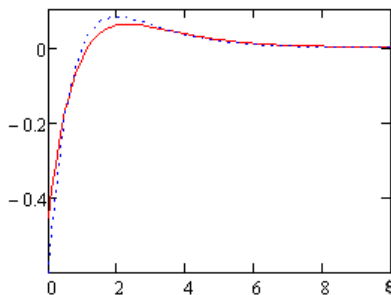
$$n! \sum_{k=1}^n (-1)^k \tau^k \frac{1}{k!} \sum_{l=0}^k C_{n+1}^l (-1)^l = \sum_{k=1}^n \frac{\tau^k}{k!} \sum_{l=0}^k R_{kl} (n+l)! \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \tag{12}$$

Система (12) позволяет вычислить все R_{kl} для какого угодно k . Для этого нужно выписать любые $k+1$ уравнений, содержащих τ^k , и приравнять в них коэффициенты при τ^k . В результате получим определенную систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов k -го полинома. Решив ее, завершим определение $R_k(\xi)$.

Проиллюстрируем предлагаемый алгоритм примерами. Пусть $k=1$, то есть нам потребуется два уравнения (12), содержащие τ в первой степени, так как у $R_1(\xi)$, согласно (11), два неизвестных коэффициента. Положим в (12) $n=1$ и $n=2$ и приравняем в полученных уравнениях коэффициенты при τ :

$$\begin{aligned} -\sum_{l=0}^1 C_2^l (-1)^l &= 1 = \sum_{l=0}^1 R_{1l} (1+l)! = R_{10} + 2R_{11}; \\ -2\sum_{l=0}^1 C_3^l (-1)^l &= 4 = \sum_{l=0}^1 R_{1l} (2+l)! = 2R_{10} + 6R_{11}. \end{aligned}$$

Полученная система имеет единственное решение $R_{10} = -1$, $R_{11} = 1$. Рисунок показывает, как при



$\tau=0,6$ поправка первого порядка (пунктир) аппроксимирует отличие (сплошная) между плотностью вероятности $f(\xi, \tau)$ и ее пределом (5).

Остальные уравнения относительно коэффициентов $R_1(\xi)$, получаемые из (12) при других n , являются линейно зависимыми, то есть удовлетворяются тем же набором чисел. В частности, для $n=3$ из (12) следует

$$-6\sum_{l=0}^1 C_4^l (-1)^l = 18 = \sum_{l=0}^1 R_{1l} (3+l)! = 6R_{10} + 24R_{11},$$

и легко видеть, что иллюстрируемое утверждение имеет место.

Это значит, что k – старшая степень ξ в $R_k(\xi)$. Попытки формально добавить к правой части (11) слагаемые более высоких степеней приведут к тому, что коэффициенты при добавленных слагаемых окажутся равными нулю. Например, полагая, что

$$R_1(\xi) = \sum_{l=0}^2 R_{1l} \xi^l,$$

для определения коэффициентов R_{1l} вместо приведенной выше получим систему, дополненную третьим уравнением, отвечающим $n=3$

$$\begin{aligned} 1 &= R_{10} + 2R_{11} + 6R_{12}; \\ 4 &= 2R_{10} + 6R_{11} + 24R_{12}; \\ 18 &= 6R_{10} + 24R_{11} + 120R_{12}. \end{aligned}$$

Необходимый для вычисления R_{12} вспомогательный определитель имеет вид

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 6 & 4 \\ 6 & 24 & 18 \end{vmatrix}.$$

Умножив первый столбец на найденное выше значение $R_{10} = -1$ и прибавив результат ко второму, умноженному на $R_{11} = 1$, получим третий столбец, так как каждая из трех строк образована коэффициентами и свободными членами решенных выше уравнений. Таким образом, исходя из теоремы Крамера и свойств определителей $R_{12} = \Delta_2 / \Delta = 0$.

Получим теперь $R_2(\xi)$. Так как у этого полинома три коэффициента, потребуется три уравнения (12), содержащие τ^2 . Поэтому положим последовательно $n = 2$, $n = 3$ и $n = 4$ и приравняем в полученных уравнения коэффициенты при τ^2 :

$$\begin{aligned} 2 \sum_{l=0}^2 C_3^l (-1)^l &= 2 = \sum_{l=0}^2 R_{2l} (2+l)! = 2R_{20} + 6R_{21} + 24R_{22}, \\ 6 \sum_{l=0}^2 C_4^l (-1)^l &= 18 = \sum_{l=0}^2 R_{2l} (3+l)! = 6R_{20} + 24R_{21} + 120R_{22}, \\ 24 \sum_{l=0}^2 C_5^l (-1)^l &= 144 = \sum_{l=0}^2 R_{2l} (4+l)! = 24R_{20} + 120R_{21} + 720R_{22}. \end{aligned}$$

Решив полученную систему, найдем $R_{20} = 1$, $R_{21} = -2$, $R_{22} = 1/2$. Аналогично (выписав уравнения с $n = 3$, $n = 4$, $n = 5$ и $n = 6$, приравняв в них коэффициенты при τ^3 и решив полученную систему линейных алгебраических уравнений) найдем $R_{30} = -1$, $R_{31} = 3$, $R_{32} = -3/2$, $R_{33} = 1/6$.

Действуя так и далее, можно убедиться, что найденные коэффициенты являются частными проявлениями общей закономерности

$$R_{kl} = (-1)^{k-l} C_k^l / l!. \quad (l = 0, 1, \dots, k). \quad (13)$$

Заметим, что в нее укладывается и случай $k = 0$. Для него $R_{00} = 1$, что позволяет включить фигурирующую в (6) и отвечающую нулевому приближению единицу под знак суммы, поменяв в ней нижний предел суммирования на ноль.

$$f(\xi, \tau) = e^{-\xi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\tau^k}{k!} \sum_{l=0}^k \xi^l (-1)^{k-l} C_k^l / l! = e^{-\xi} \sum_{k=0}^{\infty} \tau^k \sum_{l=0}^k \frac{(-1)^{k-l} \xi^l}{(k-l)! (l!)^2}. \quad (14)$$

При малых временах двойной ряд (14) быстро сходится к $f(\xi, \tau)$. Это позволяет с высокой точностью численно экспериментировать при создании установок регенерации атмосферы строительных производств и индивидуальных средств защиты дыхания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ехилевский, С.Г. Метод моментов в моделировании динамической сорбционной активности / С.Г. Ехилевский, Д.В. Пяткин // Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий: материалы республ. науч.-техн. семинара, Минск, 6–7 дек. 2011 г. – Минск, 2011. – С. 150–153.

УДК 543.42; 517.518.45

ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Д.В. КЛЮЧНИК

(Представлено: д-р техн. наук, проф. С.Г. ЕХИЛЕВСКИЙ; Е.П. ПОТАПЕНКО)

Предложена новая идеология поиска и исследования решений уравнений математической физики. Исходя из сути решаемой задачи вводится квазистационарная плотность вероятности некоторой случайной величины, связанной с искомой функцией. Асимптотика дифференциальной функции распределения устанавливается вариационно (из условия экстремальности энтропии). При этом параметры распределения получают методом моментов с помощью самого уравнения, а также связанных с ним начальных (граничных) условий.

При создании установок по регенерации атмосферы промышленных предприятий и производств строительной отрасли используются уравнения математической физики. Данные уравнения, описывающие явления переноса (вещества, энергии, импульса и т.п.) получаются на основе рассуждений, учитывающих молекулярную природу моделируемых процессов. Однако распространенные методы их решения эту природу игнорируют и сводятся к реализации абстрактного математического формализма (метода

разделения переменных Фурье, операционного исчисления и т.п.). Такой подход существенно обедняет арсенал методов поиска и исследования решений, не позволяет применить аппарат, адекватный задаче.

Проиллюстрируем изложенное на примере уравнения диффузии. Ограничившись для простоты одномерным случаем, запишем последнее в виде

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $n(x,t)$ – объемная концентрация переносимой субстанции (примеси); t – время; x – координата; D – коэффициент диффузии. При наличии начального условия

$$n(x,0) = n_0(x) \quad (2)$$

существует единственное решение задачи (1), (2) (см. [1]), которое позволяет достоверно предсказать значение концентрации $n(x,t)$ в любом месте в любой момент времени. Однако, несмотря на детерминизм задачи (1), (2), все молекулы примеси в результате броуновского движения «забывают» о своих начальных условиях. Это позволяет, соответствующим образом нормировав $n(x,t)$, ввести дифференциальную функцию распределения частиц примеси по координатам

$$f(x,t) = \frac{n(x,t)S}{N}, \quad (3)$$

где

$$N = S \int_{-\infty}^{\infty} n(x,t) dx, \quad (4)$$

равно общему числу диффундирующих молекул в тонкой трубке, параллельной оси OX с площадью поперечного сечения S . Заметим, что размерность $[f(x,t)] = \text{м}^{-1}$, как это и должно быть.

Введенная вместо $n(x,t)$ новая неизвестная функция $f(x,t)$ вероятностно характеризует положение в момент времени t каждой отдельной молекулы примеси. И только их огромное количество, в соответствии с законом больших чисел, приводит к достоверному прогнозу эволюции $n(x,t)$, что находит свое формальное отражение в справедливости теорем существования и единственности решения задачи (1), (2).

Интерпретация $f(x,t)$ как плотности вероятности позволяет подключить дополнительный мощный ресурс в виде основных теорем теории вероятностей. В частности, асимптотика $f(x,t)$ и поправки к ней могут быть установлены с помощью начальных и центральных моментов случайной координаты отдельной молекулы примеси. Покажем, как это делается.

Подставив (3) в (1), получим уравнение относительно плотности вероятности $f(x,t)$

$$\frac{\partial f(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 f(x,t)}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Вначале рассмотрим задачу о расплывании однородного концентрационного пятна шириной l

$$f(x,0) = \begin{cases} 1/l, & x \in [-l/2, l/2], \\ 0, & x \notin [-l/2, l/2]. \end{cases} \quad (6)$$

Зависимость (6) описывает равновесное состояние, ибо максимуму энтропии на отрезке отвечает равномерное распределение случайной величины [2]. Поэтому использование (6) в качестве начального условия вполне естественно.

Для дальнейшего удобно перейти к безразмерным времени τ и координате ξ :

$$\tau = \frac{Dt}{l^2}, \quad \xi = \frac{x}{l}. \quad (7)$$

В новых переменных соотношения (5), (6) соответственно примут вид

$$\frac{\partial f(\xi,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 f(\xi,\tau)}{\partial \xi^2}, \quad (8)$$

$$f(\xi,0) = \begin{cases} 1, & \xi \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right] \\ 0, & \xi \notin \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right] \end{cases}. \quad (9)$$

Вычисим начальные $\nu_{2n+1}(\tau)$ и центральные $\mu_{2n}(\tau)$ моменты распределения обезразмеренной координаты отдельной частицы примеси ξ , являющейся случайной величиной с плотностью вероятности $f(\xi, \tau)$. В силу симметрии задачи (8), (9) имеют место равенства:

$$\nu_{2n+1}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \xi^{2n+1} f(\xi, \tau) d\xi = 0, \quad (10)$$

$$\mu_{2n}(\tau) = \nu_{2n}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \xi^{2n} f(\xi, \tau) d\xi, \quad n = 0, 1, \dots \quad (11)$$

Из условия нормировки

$$\mu_0(\tau) = 1, \quad (12)$$

а для остальных номеров n дифференцированием (11) по τ получим с помощью (8)

$$\mu_{2n}'(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \xi^{2n} \frac{\partial f(\xi, \tau)}{\partial \tau} d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} \xi^{2n} \frac{\partial^2 f(\xi, \tau)}{\partial \xi^2} d\xi. \quad (13)$$

Очевидно, что при любых конечных временах $f(\pm\infty, \tau) \equiv 0$. С учетом этого обстоятельства дважды проинтегрируем правую часть (13) по частям

$$\int_{-\infty}^{\infty} \xi^{2n} \frac{\partial^2 f(\xi, \tau)}{\partial \xi^2} d\xi = 2n(2n-1) \mu_{2n-2}(\tau). \quad (14)$$

Из (13), (14) следует искомое соотношение для определения $\mu_{2n}(\tau)$:

$$\mu_{2n}'(\tau) = 2n(2n-1) \mu_{2n-2}(\tau). \quad (15)$$

С помощью (15) и условия нормировки (12) можно развить рекуррентную процедуру последовательного вычисления моментов любых четных порядков. В частности, для $n=1$ получим

$$\mu_2'(\tau) = 2(2-1) \mu_0(\tau) = 2, \quad (16)$$

Откуда, с учетом вытекающего из (11), (9) начального условия

$$\mu_2(0) = \int_{-1/2}^{1/2} \xi^2 d\xi = \frac{1}{12}, \quad (17)$$

следует

$$\mu_2(\tau) = 2\tau + 1/12 = \sigma^2(\tau), \quad (18)$$

где $\sigma(\tau)$ – среднеквадратическое отклонение обезразмеренной координаты молекулы примеси ξ .

Аналогично для $n=2$ из (15) получим с учетом (18)

$$\mu_4'(\tau) = 4(4-1) \mu_2(\tau) = 24\tau + 1. \quad (19)$$

Дополнив (19) вытекающим из (11), (9) начальным условием

$$\mu_4(0) = \int_{-1/2}^{1/2} \xi^4 d\xi = \frac{1}{80}, \quad (20)$$

найдем

$$\mu_4(\tau) = 12\tau^2 + \tau + 1/80. \quad (21)$$

Найденных моментов достаточно для определения асимптотики $f(\xi, \tau)$ при больших временах. С этой целью вычислим эксцесс ξ

$$E(\tau) = \frac{\mu_4(\tau)}{\sigma(\tau)^4} - 3 = \frac{12\tau^2 + \tau + 1/80}{(2\tau + 1/12)^2} - 3 = -\frac{1}{120\sigma^4(\tau)} \xrightarrow{\tau \rightarrow \infty} 0. \quad (22)$$

Отсутствие эксцесса при больших временах означает, что в результате диффузионного перемешивания частицы примеси все дальше выходят за пределы отрезка $[-l/2, l/2]$ и первоначальное распределение (9) постепенно эволюционирует в нормальное

$$f(\xi, \tau) \xrightarrow{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(\tau)}} e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma(\tau)^2}}, \quad (23)$$

обеспечивающее максимум энтропии в новых условиях (на всей числовой оси) [2].

Возвращаясь к размерным переменным (см. (7), вместо (18), (21)–(23) получим

$$\sigma_x(t)^2 = 2Dt + l^2/12, \quad (24)$$

$$E_x(t) = -l^4/120\sigma(t)^4. \quad (25)$$

Согласно (7) при $l=0$ времена сразу становятся бесконечными.

Видно (см. (24), (25)), что $E(t)$ тем меньше, чем сильнее неравенство $t \gg l^2/D$. Если $l=0$ распределение становится нормальным сразу

$$n(x, t) = \frac{N/S}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} \equiv \varphi(x, t) N/S. \quad (26)$$

Чтобы N при этом отличалось от нуля, $n(x, 0)$ в соответствии с (3), (4), (6) должна обращаться в бесконечность при $x=0$, что согласуется с одним из представлений для δ -функции Дирака [3].

$$n(x, 0) = \lim_{t \rightarrow 0} n(x, t) = \delta(x) N/S. \quad (27)$$

Используем (26) для решения (1), (2) в общем виде (не конкретизируя $n_0(x)$). Рассмотрим участок $[l, l+dl]$ на числовой оси. В начальный момент ему (внутри упомянутой трубки) принадлежит

$$dN(l) = n(l, 0) S dl$$

молекул примеси. Заменяв в (26) N на dN и x на $x-l$, запишем под знаком интеграла вклад в $n(x, t)$ рассматриваемого участка

$$n(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{n(l, 0)}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{(x-l)^2}{4Dt}} dl. \quad (28)$$

Решение (28) с точностью до замены $\xi = l - x$ совпадает с полученным в [1] методом Фурье. Формально такая замена ничего не меняет, но вуалирует теоретико-вероятностный смысл подынтегрального выражения.

Таким образом, в работе предложена новая идеология поиска и исследования решений уравнений математической физики. Исходя из сути решаемой задачи, неизвестная функция заменяется плотностью вероятности некоторой случайной величины. Параметры ее распределения получаются методом моментов с помощью самого уравнения, а также связанных с ним начальных (граничных) условий. В качестве примера рассмотрена диффузия в бесконечной трубке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бугров, Я.С. Высшая математика / Я.С. Бугров, С.М. Никольский. – М.: Наука, 1989. – 464 с.
2. Ехилевский, С.Г. Динамика сорбции активированными углями и закон возрастания энтропии / С.Г. Ехилевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2006. – № 10. – С. 182 – 188.
3. Владимиров, В.С. Обобщенные функции в математической физике / В.С. Владимиров. – М.: Наука, 1979.

УДК 624.05:519.863

ГРАНИЦЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КЛАССИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОЧЕРЕДНОСТИ ВОЗВЕДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

А.Ю. ГЕРЕЦ

(Представлено: С.А. ОЛЬШАННИКОВ)

Рассматривается важная задача оптимизации при проектировании организационной части строительного производства. Решение сложной оптимизационной задачи с множеством переменных невозможно без использования программных средств. В данной работе задача решается путём линейного пересчёта затрат общего времени на всех возможных комбинациях последовательностей объектов и нахождении минимального времени выполнения работы. Если этому времени будут соответствовать несколько комбинаций объектов, то программа должна будет выдать все эти комбинации, чтобы рабочие могли воспользоваться той, которая будет наиболее удобной.

Строительное производство складывается из процессов, конечным результатом выполнения которых является строительная продукция, под которой следует подразумевать как отдельные части строящихся и реконструируемых объектов, так и законченные здания и сооружения. Строительная продукция включает в себя введенные в эксплуатацию промышленные предприятия и цехи, жилые дома, здания общественного назначения и другие, вновь построенные и реконструированные объекты.

Поточным методом называют такой метод организации строительства, который обеспечивает планомерный, ритмичный выпуск готовой строительной продукции (законченных зданий, сооружений, видов работ и т.п.) на основе непрерывной и равномерной работы трудовых коллективов неизменного состава, снабженных современной и комплектной поставкой всех необходимых материально-технических ресурсов [1].

Наиболее подходящий для календарного планирования с использованием поточного метода производства работ является неритмичный поток.

При возведении нескольких объектов (или производства работ на нескольких захватках) необходимо знать минимальное время производства работ. Это достигается решением задачи по оптимизации и определению рациональной очередности строительства. Эта задача относится к классу комбинаторных задач программирования. Оптимальное решение может быть найдено непосредственными расчетами продолжительности выполнения работ при каждом возможном варианте очередности перехода бригад с захватки на захватку, с объекта на объект. Однако для точного решения этой задачи необходим расчет продолжительности всех возможных потоков, отличием которых между собой является последовательность включения захваток в поток.

На первый взгляд состава задачи нет, как и нет трудностей по решению данного вопроса. Однако если рассмотреть реальные объекты, количество захваток в которых идет на десятки, то станет ясно, что «подручными» средствами эту задачу не решить. Слишком много вариантов формирования потока необходимо рассмотреть. Например, если захваток 8, то необходимо рассмотреть 40320 вариантов.

Вместе с тем в различных источниках приведены сомнительные способы решения данной задачи [2]. Большинство способов пытаются обойти сложность данного вопроса, путем подмены смысла задачи. Очевидно одно, что без применения программных средств адекватного и быстрого решения задачи не отыскать.

С использованием программных средств задача решается путём линейного пересчёта затрат общего времени на всех возможных комбинациях последовательностей объектов и нахождении минимального времени выполнения работы. Если этому времени будут соответствовать несколько комбинаций объектов, то программа должна будет выдать все эти комбинации, чтобы рабочие могли воспользоваться той, которая, по их мнению, будет наиболее удобной.

Нам удалось реализовать данную программу, и она работает следующим образом: вводится количество объектов и количество производимых работ на объекте (рис. 1).

Далее заполняется матрица, в ячейки которой вписывается время, которое будет затрачено на определённом объекте на соответствующий процесс. Причём время может указываться как целым числом, так и дробным с точностью до двух знаков (рис. 2).

В результате работы программа выдаёт отчёт, в котором сформированы таблицы с наилучшими очередностями объектов, для выполнения работ и указанием времени начала и конца каждого процесса (рис. 3).

Выберите количество захваток: 3 ▾
 Захватки — количество объектов на которых будут проводиться работы.

Выберите количество процессов: 4 ▾
 Процессы — последовательность проводимых работ на объекте.

Далее

Рис. 1. Ввод количества объектов и работ

x/y	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
x ₁	1	4.13	8	0.11
x ₂	5	11	7.42	9
x ₃	4	6	4.58	3

Назад Очистить поля Далее

Рис. 2. Заполнение матрицы времени

0	5	16	24
5	11	23.42	33
4	6	4.58	3
9	1	4.13	0.11

Рис. 3. Результаты работы программы

На данный момент ведутся работы по созданию сайта <http://calcproc.com/> и увеличению функционала программы, а именно возможности вводить название объектов и процессов, а также название самого проекта работы. Добавляется возможность регистрации на сайте программы по уникальному ключу, который в индивидуальном порядке смогут получить строительные компании для того, чтобы иметь возможность сохранить отчёт к себе в профиль на сайте и получать к нему доступ из любого места, всего лишь при наличии входа в интернет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дикман, Л.Г. Организация строительного производства / Л.Г. Дикман. – М.: Изд-во Ассоциация строительных вузов, 2006. – 608 с.
2. Шведов, А.П. Организация строительного производства: учеб.-метод. компл. / А.П. Шведов, И.П. Шведов. – Новополоцк: УО Полоцкий гос. ун-т, 2011. – 168 с.