

УДК: 621.643.25.002.2

## ФИЗИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ И БЕТОНА В ПРОЦЕССЕ ВИБРОУДАРНОГО ПРЕССОВАНИЯ

**Б.Б.Хасанов – д.т.н., профессор, М.З.Раджабов – ассистент,**  
 “Национальный исследовательский университет” Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства.

### Аннотация

Многочисленными исследованиями установлено, что физико-механические свойства бетона, кроме активности цемента, вида заполнителей и др. определяются величиной В/Ц бетонной смеси. Зависимость прочности и водонепроницаемости бетона от В/Ц вытекает из физической сущности формирования структуры бетона. Изучение процесса гидратации цемента показало, что цемент, в зависимости от качества и срока твердения, связывает всего 15–25% воды от своей массы. В течение первого месяца связывается не менее 20% воды от массы цемента. Вместе с тем, для придания бетонной смеси пластичности, улучшения условий гидратации вяжущего, вводится значительно большее количество воды, так как при  $(В/Ц)_{нач} = 0,20$  бетонная смесь остается практически сухой и ее невозможно качественно уложить, отформовать и уплотнить. Избыточная вода, не вступая в химические реакции с цементом, остается в бетоне в виде водяных пор и капилляров или испаряется, оставляя воздушные поры. Несомненно это является основной причиной снижения прочности и водонепроницаемости бетона.

**Ключевые слова:** модификация, гидратация, удобоукладываемость, бетонная смесь, структура, свойства, прочность, водонепроницаемость, пористость, плотность, обезвоживание, фильтрация, центрифугирование, вакуумирование, вибропрессование виброударное прессование.

## ВИБРОЗАРБАЛИ ПРЕССЛАШ ЖАРАЁНИДА БЕТОН АРАЛАШ-МАСИ ВА БЕТОННИНГ ФИЗИК МОДИФИКАЦИЯСИ

**Б. Б. Хасанов – д.т.н., профессор, М.З.Раджабов – ассистент,**  
 Тошкент ирригация ва қишлоқ ҳўжалигини механизациялаш муҳандислари институти, “Миллий тадқиқот университети”

### Аннотация

Кўплаб тадқиқотлар шуни кўрсатдики, бетоннинг физик-механик хусусиятлари, цемент фаоллигидан ташқари, агрегатлар тури ва бошқалар бетон аралашмасининг В/С қиймати билан белгиланади. Бетоннинг кучи ва сув ўтказувчанлигининг В/С га боғлиқлиги бетон тузилишини шакллантиришининг жисмоний моҳиятидан келиб чиқади. Цементнинг гидратация жараёнини ўрганиш шуни кўрсатдики, цемент, қаттиқлашув сифати ва муддатига қараб, атиги 15 та боғланиш ҳосил қилади. Унинг массасидан 25 фоизи сув. Биринчи ой давомида цемент массасининг камида 20% сув буғланади. Шу билан бирга, бетон аралашманинг пластиклигини бериш, бириктирувчи гидратация шароитларини яхшилаш учун сезиларли даражада кўпроқ сув киритилади, чунки  $(В/С)_{бошланғич} = 0,20$  да бетон аралашмаси деярли қуруқ бўлиб қолади ва уни сифатли ётқизиш, шакллантириш ва сиқиш мумкин эмас. Цемент билан кимёвий реакцияларга кирмасдан ортиқча сув бетонда сув тешиклари ва капиллярлар сифатида қолади ёки буғланади ва ҳаво тешиқларини қолдиради. Шубҳасиз, бу бетоннинг мустаҳкамлиги ва сувга чидамлилиги пасайишининг асосий сабабидир.

**Таянч сўзлар:** модификация, гидратация, ишлов бериш қобилияти, бетон аралашмаси, тузилиши, хусусиятлари, мустаҳкамлиги, сувга чидамлилиги, ғовақлилиги, зичлиги, сувсизланиши, филтрлаш, сантрифўжлаш, вакуум, тебраниш бо-сими вибро-зарба босиш.

## PHYSICAL MODIFICATION OF CONCRETE MIX AND CONCRETE IN THE PROCESS OF VIBRO-IMPACT PRESSING

**B.B.Khasanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, M.Z.Rajabov – Assistant, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers National Research University.**

### Abstract

Numerous studies have established that the physical and mechanical properties of concrete, in addition to the activity of cement, the type of aggregates, etc. are determined by the value  $I_n / C$  of the concrete mixture. The dependence of the strength and water resistance of concrete on the  $I / C$  follows from the physical essence of the formation of the concrete structure. The study of the cement hydration process showed that cement, depending on the quality and hardening period, binds only 15...25% of water from its mass. During the first month, at least 20% of the water from the cement mass binds. At the same time, to give the concrete mixture plasticity, to improve the conditions of hydration of the binder, a much larger amount of water is introduced, since at  $(V / C) n = 0.20$ , the concrete mixture remains practically dry and it is impossible to lay, mold and compact it qualitatively. Excess water, without entering into chemical reactions with cement, remains in concrete in the form of water pores and capillaries or evaporates, leaving air pores. Undoubtedly, this is the main reason for the decrease in the strength and water resistance of concrete.

**Key words:** modification, hydration, workability, concrete mix, structure, properties, strength, water resistance, porosity, density, dehydration, filtration, centrifugation, vacuuming, vibropressing, vibration impact pressing.

**Введение.** Для образования смеси заданной удобоукладываемости и оптимальных условий гидратации вяжущего необходимо применение бетонных смесей с повышенным влагосодержанием. Образование оптимальной бетонной смеси возможно на основе при-

менения цементного теста разжиженного водой, относительно теста нормальной густоты. [1]

Величина разжижения  $Z$  определяется из зависимости:

$$Z = \frac{1}{[B/C]} - \frac{1}{(B/C)_{\text{нач}}} \quad (1)$$

Где:  $[B/C]$  - водоцементный фактор цементного теста нормальной густоты;

$(B/C)_{\text{нач}}$  - начальное водоцементное отношение данного цементного теста или бетонной смеси. В этом случае создаются благоприятные условия гидратации вяжущего, оптимизируется структурообразование и, в частности снижается объем воздушных пор.

Однако, для оптимизации свойств бетона, получения предельной прочности необходимо удалить избыточную воду затворения. Физико-механические показатели бетона при этом будут находиться в прямой зависимости от количества остаточной воды затворения [2]. Если бетонная смесь будет уплотняться за счет отжатия определенного количества свободной воды, то прочность бетона будет находиться в обратной функциональной зависимости от остаточного В/Ц, так как именно она определяет пористость цементного камня и бетона. Поэтому, с целью получения бетона предельно высокой прочности и плотности, предварительно уложенная смесь должна дополнительно уплотняться в условиях максимального обезвоживания бетона.

Для предварительного выявления факторов, влияющих на обезвоживание, рассмотрен процесс уплотнения бетонной смеси, уложенной в форму, представляющую цилиндр со сплошной стенкой. Смесь подвергается сжатию нормальным давлением, приложенным к поршню. Если объем цементного раствора  $V_{\text{ц.р.}}$ , имеющегося в бетонной смеси, окажется меньше объема пор  $V_{\text{пор}}$  между зернами крупного заполнителя, то нормальное давление будет воспринято только крупными заполнителем, а цементный раствор не воспримет в этом случае никакого давления. Влияние виброударного прессования в этих случаях, вероятно, будет отрицательным, так как под действием нормальной силы возможны случаи раздробления отдельных зерен крупной фракции, который приводит к снижению прочности бетона.

Если  $V_{\text{ц.р.}} = V_{\text{пор}}$  между зернами крупного заполнителя, то нормальное давление будет воспринято зернами всех компонентов бетонной смеси. В этих условиях эффект виброударного прессования будет иметь неустойчивый характер. Если  $V_{\text{ц.р.}}$  будет на определенную величину больше  $V_{\text{пор}}$ , то нормальное давление будет воспринято только цементным раствором, и эффект виброударно-перистальтического прессования будет зависеть от способности цементно-песчаного раствора деформироваться. Раствор будет деформироваться, если количество цементного теста будет больше объема пор мелкого заполнителя. В этих условиях вся нагрузка должна быть воспринята цементным тестом. При избыточном количестве воды в цементном тесте вся нагрузка будет воспринята водой.

Таким образом, для повышения эффективности уплотнения виброударным прессованием необходимо, чтобы цементное тесто являлось средой, в которой располагались бы зерна крупного и мелкого заполнителей. При полной герметичности формы смесь уплотняется только за счет некоторого уменьшения объема вовлеченного воздуха, т. е. эффект виброударного прессования будет незначительным, он будет увеличиваться с увеличением водопроницаемой способности стенок формы, т.к. при наличии фильтрационных отверстий свободная вода под действием разности напора внутри формы и за

его пределами начнет перемещаться в сторону фильтрационных отверстий.

Итак, в процессе удаления избыточной воды и вовлеченного воздуха частицы цемента начнут сближаться между собой, что, в свою очередь, приведет к сближению зерен крупного и мелкого заполнителей. Нормальное давление, передающееся на воду и вызывающее ее удаление, будет способствовать сближению частиц до тех пор, пока внешнее давление полностью воспримется дисперсной фазой.

#### Анализ современного состояния проблемы

Из гидродинамики жидкости известно, что в движущемся потоке падение давления прямо пропорционально его скорости. Очевидно, что при фильтрации излишней воды затворения из бетонной смеси, в ней давление также должно снижаться под действием внешней нормальной нагрузки, и надо полагать, что при движении излишней воды в пространстве между сольватированными частицами цемента в пограничных диффузных слоях будет создаваться разность давлений.

Молекулы воды в диффузных слоях испытывают действие сил, направленных к поверхности твердой фазы, которые убывают с увеличением расстояния от поверхности частиц. При определенной скорости фильтрации в потоке может возникнуть отрицательное давление такой величины, когда равнодействующая сил, одна из которых притягивает молекулы воды к твердой поверхности, а другая втягивает ее в движущую струю, окажется направленной от твердой поверхности. В этом случае ориентированные молекулы воды в диффузном слое выйдут из сферы влияния сил притяжения и будут вовлечены в движущийся поток.

При восприятии внешней сжимаемой нагрузки системой нейтральных давлений в воде, заполняющей поры бетонной смеси, возникает гидростатическое давление, которое сразу же передается на прилегающие зерна заполнителя и по мере сжатия смеси у стенки конусного сердечника распространяется на следующие слои смеси. В связи с этим гидростатическое давление в смеси уменьшается на величину соответственно той части полного давления, которое испытывают зерна заполнителя, расположенные на определенной глубине от поверхности конусной части вибросердечника.

При виброударном действии перистальтических волн на бетонную смесь в ней возбуждаются собственные колебания зерен заполнителей, которые, в свою очередь, приводят к определенному разжижению цементного теста и перераспределению в нем жидкости. В вязкопластичном цементном тесте смеси возникает турбулентный гидродинамический процесс, который под влиянием перистальтического волнового давления сопровождается отжатием воды из ближе расположенных к сердечнику слоев смеси, что приводит к уплотнению бетона. В этих случаях образуются направленные к наружной форме фильтрационные каналы, по которым под действием перистальтического прессования фильтруется излишняя вода. Наружная форма, в свою очередь, имеет многочисленные специально устроенные фильтрующие конусные отверстия [3]. Весь процесс начального виброуплотнения, отжим воды и водовоздушной фазы, а также последующего гиперуплотнения бетона можно представить как комплексный трехступенчатый процесс. Этот процесс носит сложный характер и состоит из трех различных по механизму действия стадий: Стадия переукладки составляющих (первая стадия уплотнения). Она

заключается в разрушении и перестройке под влиянием вибрирования неустойчивой структуры скелета заполнителей бетонной смеси. Образующие ее зерна в момент разрушения структуры под влиянием собственной массы стремятся занять наиболее низкое положение, меняют взаимную ориентацию и образуют новую устойчивую структуру. В ней зерна заполнителей размещены уже не случайно, а наиболее выгодно по условию получения минимума объема скелета. Одновременно с перестройкой скелета удаляется основная масса воздуха, в основном, через фильтрационные отверстия перфорированной формы. После окончания первой стадии воздуха остается не более 3–4% от общего объема бетонной смеси. Рассматривая особенности поведения бетонной смеси на первой стадии виброуплотнения, можно заметить, что переукладка составляющих интенсивно протекает лишь при отсутствии значительных статических нагрузок на смесь. Это создает условия оптимальной переукладки составляющих бетонной смеси. Как показывают опыты, время, необходимое для завершения первой стадии уплотнения в активных ("виброкипящих") слоях бетонной смеси, относительно невелика и даже для жестких смесей не превышает 20–30 с.

Стадия сближения составляющих (вторая стадия уплотнения). Она начинается тогда, когда перестройка структуры бетонной смеси закончилась и после этого изменения в ней порядка расположения зерен заполнителей обычными средствами практически неосуществимо. В проведенных опытах сближения, раздвижки относительно сдвиги частиц заполнителей происходят в результате перераспределения по объему растворной составляющей и цементного теста из-за удаления остаточной части воздуха, а также избыточной воды затворения через фильтрационные отверстия перфорированной наружной формы. В отличие от первой, вторая стадия уплотнения интенсивно протекает в предельно стесненных условиях, под действием приложенного комбинированного виброударно-перистальтических воздействий. Для завершения второй стадии необходимо более длительное время, чем для первой. Продолжительность этой стадии зависит от жесткости бетонной смеси, толщины стенки бетонируемой конструкции, режима виброударно-перистальтического прессования, фильтрационной способности формы и начального значения В/Ц. Например, при изготовлении неармированных бетонных труб (диаметром 1000 мм, длиной 1500 мм и толщиной стенки 150 мм) из умеренно жестких смесей стадия сближения составляющих продолжалась 3–5 мин., т.е. почти на два порядка больше первой стадии. Завершение второй стадии четко определяется окончанием значительных деформаций бетонной смеси, после чего структура свежего бетона может считаться сложившейся. Дальнейшее вибрирование практически не повышает плотности и прочности бетона, а также не улучшает качество его поверхности.

Стадия комплексного уплотнения бетонной смеси (третья стадия уплотнения). Опыты показывают, что после окончания второй стадии уплотнения еще можно достигнуть некоторого дополнительного (компрессионного) обжатия путем сочетания интенсивного перистальтического давления со сдвиговым возвратно-поступательным перемещением наружной перфорированной формы относительно вибросердечника. Так как эта мера осуществляется без прекращения виброударного воздействия, то полезный эффект в виде повышения проч-

ности и плотности бетона достигается за сравнительно короткое время (до 1–3 мин.). Рассматриваемый эффект достигается в результате отжатия остаточной части избыточной воды затворения с растворенным в ней воздухом, а также гиперуплотнения контактов между зернами заполнителей.

Из изложенного видно, что процесс уплотнения бетонной смеси на разных стадиях подчиняется различным закономерностям. На первой стадии бетонная смесь ведет себя как вязко-сыпучая среда, подвергаемая вибрационным перемещениям. На второй стадии, сопротивляясь сплочению составляющих и отжиму водовоздушной фазы, смесь реагирует на внешнее уплотняющее воздействие, как вязко-упруго-пластичное тело, характеризующееся определенным модулем деформации. На третьей стадии решающее значение приобретает оптимальное сочетание фильтрационных свойств бетонной смеси и перфорированной формы. В этом случае свежесформованная смесь деформируется по законам динамики многокомпонентных сред.

Следует обратить внимание на качественное различие виброуплотнения бетонной смеси и гиперуплотнения бетона в рассматриваемом случае. Обычное одностадийное уплотнение заменяется высокоинтенсивным трехстадийным гиперуплотнением, в результате которого коэффициент уплотнения  $K_u$  приближается к теоретически возможному значению, равному единице. Трехстадийное гиперуплотнение будет особенно эффективным при получении бетонной смеси оптимальной вибровязкости, упругости и способности поглощать энергию в процессе виброударных колебаний. Этот важный вывод определяет необходимость разработки надежного метода назначения составов бетона, отвечающих заданным условиям. При этом, используя исследования О.А. Савинова и Е.В. Лавриновича [3], бетонную смесь можно представить как вязкую жидкость с постоянным коэффициентом вязкости.

#### Постановка задачи и методы решения

Продолжительность виброударно-перистальтического прессования бетонной смеси до требуемой плотности, при переменной величине нормального давления, зависит от количества и водопроницаемой способности фильтрационных отверстий, с увеличением которых продолжительность уплотнения смеси будет снижаться [4].

Вышеизложенное позволяет предположить, что наиболее эффективное уплотнение бетонной смеси виброударно-перистальтическим прессованием будет достигнуто при следующих условиях:

- а) абсолютный объем раствора в бетонной смеси должен превышать объем пор межзернового пространства крупного заполнителя в среднем на 20–30% [5]. Это будет способствовать устранению образования несжимаемого жесткого крупнозернистого скелета;
- б) объем цементного теста в бетонной смеси должен превышать объем пор межзернового пространства мелкого заполнителя на 30–40%, что исключает передачу нагрузки от одних зерен песка непосредственно на другие;
- в) фильтрационная способность стенок форм, внутри которых бетонная смесь уплотняется виброударно-перистальтическим прессованием, должна отвечать требованиям максимального обезвоживания за сравнительно короткий срок уплотнения.

В соответствии с изложенным, эффективность уплотнения бетонной смеси виброударно-перистальтическим прессованием зависит от ее состава, от фильтрационной

способности стенок форм, внутри которых осуществляется уплотнение, а также уровня и режима гиперуплотнения.

В результате анализа современных технологий установлено, что физическая модификация возможна путем удаления излишка воды затворения, добавляемой в бетонную смесь для придания ей необходимой текучести и удобоукладываемости.

Как показано выше, удаление свободной воды в процессе уплотнения смеси увеличивает использование потенциальных свойств цемента для повышения плотности, водонепроницаемости и прочности бетона. В настоящее время в технологии сложных элементов известно несколько способов обезвоживания бетонной смеси: центрифугирование, прессование, вакуумирование, вибропрессование и др. Одним из наиболее эффективных следует считать способ виброударно-перистальтического прессования, так как при этом могут быть созданы необходимые условия для максимального обезвоживания бетонной смеси.

Исходя из изложенного можно предположить, что высокопрочный бетон, применяемый, в частности, для изготовления малонапорных и безнапорных труб может быть получен за счет уплотнения смеси виброударным прессованием с интенсивным обезвоживанием.

В производстве труб выдавливание свободной воды затворения из бетонной смеси осуществлялось через перфорированную поверхность наружной формы, покрытую специальной фильтровальной тканью [6].

Основной недостаток использования таких фильтров - высокий расход ручного труда. Поэтому задача настоящих исследований состоит в изыскании таких фильтров, которые бы имели простую, легкодоступную в производственных условиях конструкцию, и отжимали из бетонной смеси свободную воду за сравнительно небольшой отрезок времени. Для этой цели исследованы сквозные конические отверстия, устроенные на поверхностях используемых форм [7]. Оптимальность этих фильтрационных отверстий оценивалась путем сравнения их работоспособности, т.е. максимально пропускать свободную воду при низкой потере цементного теста. Геометрия, плотность и форма отверстий требуют специального исследования.

Процесс отжима жидкой и газообразной фазы из формуемого материала является основным процессом структурообразования и модификации свойств бетона. Причиной удаления жидкости и газа из бетона является перепад давления по толщине стенки формуемой трубы по направлению к перфорированной поверхности опалубочной формы. Удаление жидкой и газообразной сред бетонной смеси является процессом эксфильтрации, т.е. удаления жидких и газообразных флюидов из материала в окружающую среду [8].

Основную роль в формировании особоплотной структуры бетона играет процесс обезвоживания бетона. Отжим излишней воды затворения из бетонной смеси под действием приложенного нормального давления является фильтрационным процессом [9]. Большую роль в нем играют разность химических потенциалов взаимодействующих фаз и различные градиенты, возникающие в системе в зависимости от вида источника энергии, под влиянием которой перемещается свободная вода. Перемещение свободной воды под действием градиента влажности происходит в сторону менее увлажненных пор до полного выравнивания влажности.

Следовательно, для удаления свободной воды затворения из бетонной смеси под действием давления необходимо совершить работу (расход энергии) на преодоление сил связи воды с частицами цемента и на перемещение ее в системе. Естественно, что основная задача исследования переноса излишней воды затворения из бетонной смеси заключается в определении зависимости параметров виброударно-перистальтического воздействия и скорости фильтрации от различных технологических параметров и величины нормального давления.

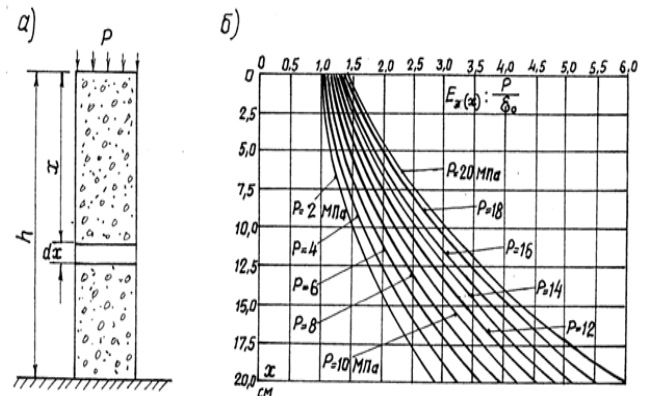
**Анализ результатов и примеры**

Кроме определения оптимального состава бетона необходимо определить также физико-механические свойства бетонной смеси и бетона. Наиболее просто определяется интегральная характеристика деформативности бетона или эффективный модуль деформации бетонной смеси. Для этого рассмотрена описанная выше первая стадия уплотнения бетонной смеси.

Рассмотрена осевая деформация столба бетонной смеси, содержащей пузырьки воздуха находящейся в первой стадии уплотнения (рис. 1). Исходным при заполнении формы бетонной смесью является (на единицу высоты) объем воздуха  $V_0$ . Указанному выше характеру распределения пор в изделии это условие не противоречит. В таком случае на первой стадии уплотнения смеси содержание воздуха изменяется по высоте, и на некотором расстоянии  $x$  от поверхности составит :

$$V_x = 1 / (1 + \rho \cdot x / P_{атм}) \tag{2}$$

где:  $P_{атм}$  - атмосферное давление,  $\rho$  - плотность смеси.



а) - исходная расчетная схема; б) - кривые зависимости  $E_e(x) : P/\epsilon_0$  от  $x$ .

Рис.1 Вспомогательный график для определения эффективного модуля упругости  $E_e$ .

Приложив к поверхности столба бетонной смеси некоторое дополнительное давление  $P$ , тогда, на основании физического закона Бойля-Мариотта, имеем:

$$\frac{(\rho \cdot x + P_{атм}) \cdot V_0 / (1 + \rho \cdot x / P_{атм})}{(\rho \cdot x + P_{атм} + P) \cdot V_0 \cdot 1 / (1 + \rho \cdot x / P_{атм} - V)} = \tag{3}$$

где:  $V$  - величина, на которую уменьшается объем воздушных включений при приложении давления  $P$ . Из (3) получена зависимость между  $P$  и  $V$ :

$$V = \frac{P \cdot V_0}{(\rho \cdot x + P_{атм} + P)} \cdot \frac{1}{(1 + \rho \cdot x / P_{атм})} \tag{4}$$

При  $P \ll \rho \cdot x + P_{атм}$  выражение (4) можно заменить приближенной зависимостью:

Таблица 1

Опытные данные определения модуля  $E_3$  для различных бетонных смесей

| Тип смеси | Характеристика смеси                         | $E_3^*$ МПа | $\epsilon_0$ | $\epsilon_k$ |
|-----------|--|-------------|--------------|--------------|
| I         | Мелкозернистые бетоны                        | 1...2       | 0,12...0,09  | -            |
| II        | Мелкозернистые бетоны ( $d_{max} = 10$ мм)   | 2...4       | 0,11...0,08  | -            |
| III       | Тяжелые бетоны ( $d_{max} = 20$ мм)          | 3...6       | 0,10...0,06  | -            |
| IV        | Гиперуплотненные бетоны ( $d_{max} = 10$ мм) | 3...6       | 0,09...0,06  | 0,03...0,05  |
| V         | Гиперуплотненные бетоны ( $d_{max} = 20$ мм) | 4...7       | 0,04...0,03  | 0,02...0,04  |

$$V \sim P \cdot V_0 / P_{атм} \cdot 1 / (1 + \rho \cdot x / P_{атм})^2 \quad (5)$$

Таким образом, при загрузке столба бетонной смеси, находящейся в условиях одномерной деформации, например, уложенной в форму постоянного сечения, и равномерно распределенной осевой нагрузке можно рассматривать смесь как квазиупругое тело с некоторым эффективным модулем нормальной упругости  $E_{3(x)}$ . Сравнивая (5) с известной формулой для определения изменения упругого стержня под влиянием осевой нагрузки (т.е. закон Гука  $E_{ге}$ ), получим формула для определения эффективного модуля упругости  $E_{3(x)}$  бетонной смеси на расстоянии  $x$  от верха столба:

$$E_{3(x)} = \frac{P_{атм}(1 + \rho \cdot x)^2}{\epsilon_0} \quad (6)$$

где  $E_0 = V_0 / V_c$  - отношение начального объема воздуха, вовлеченного при укладке бетонной смеси, к полному объему  $V_c$  вибрируемого изделия.

В результате аналитического исследования находится усредненное значение  $E_3^*$ :

$$E_3^* = 1/h \int_0^h E_{3(x)} \cdot dx =$$

$$P_{атм} / h \cdot \epsilon_0 \cdot \int_0^h (1 + \rho \cdot x / P_{атм})^2 dx = v \cdot P_{атм} / \epsilon_0 \quad (7)$$

где:

$$v = 1 + \rho \cdot h / P_{атм} + 1/3 (\rho \cdot h / P_{атм})^2 \quad (8)$$

Для вычисления коэффициента  $v$  можно использовать выражение

$$v_p = (1 + \rho / P_{атм})^2 + (1 + P / P_{атм}) \cdot \rho \cdot h / P_{атм} + 1/3 (\rho \cdot h / P_{атм})^2 \quad (9)$$

График определения коэффициента  $v$ , входящего в выражение (7) представлен на рис. 2.

В таблице 1 приведены опытные данные деформативности различных типов бетонной смеси и величина эффективного модуля нормальной упругости  $E_3^*$ . Из приведенных данных видна тенденция к росту модуля упругости с увеличением крупности заполнителя, что объясняется различной способностью смесей вовлекать и удерживать воздух.

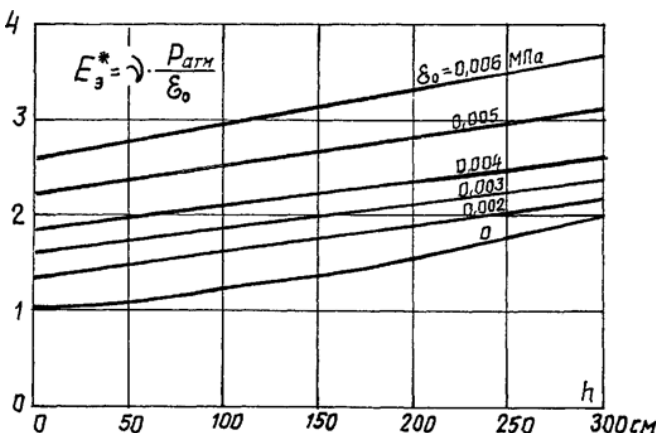


Рис. 2. График для определения коэффициента  $v$

Для гиперуплотненных смесей большое значение имеет также способность бетонной смеси поглощать энергию при виброударно-перистальтических воздействиях. Раскрытие этой закономерности позволяет прогнозировать технологические параметры уплотнения. Однако, в настоящее время эта способность изучена недостаточно, что обуславливается сложностью механизма деформирования рассматриваемой среды, сопровождающегося внутренним трением зерен заполнителя, течением цементного теста и потерями энергии в результате объемных деформаций воздушных включений.

**Выводы.** Анализируя данные различных экспериментальных исследований, сделан вывод, что на современном этапе исследований при определении напряжений уплотнения можно пользоваться упруго-вязкой моделью бетона:

$$\delta = E_3^* \cdot \epsilon + K_0 \cdot \frac{d\epsilon}{dt} \quad (10)$$

где:  $K_0$  - коэффициент вязкого сопротивления, определяемый опытным путем.

Для гиперуплотненного бетона упругая часть напряжений ( $E_3^* \cdot \epsilon$ ) значительно превосходит вязко-пластичную компоненту напряжений. По окончании уплотнения гиперуплотненной модифицированный бетон ведет себя как твердое тело.

| №  | Литература  | References  |
|----|---|---|
| 1  | Ахвердов И.Н, Основы физики бетона. – М.: Строй издат., 1981. – 464 с.  | Akhverdov I.N., <i>Osnovy fiziki betona</i> , – М.: Strojizdat 1981. 464 s, [Fundamentals of concrete physics, – М.: Stroyizdat 1981. 464 p.] (in Russian)  |
| 2  | Ахвердов И.Н. Высокопрочный бетон. – М.: Строй издат., 1961. – 163 с.   | Akhverdov I.N. <i>Vysokoprochnyj beton</i> . – М.: Strojizdat, 1961. - 163 s. [High-strength concrete. – М.: Stroyizdat, 1961. - 163 p.] (in Russian)   |
| 3  | Баженов Ю.М. Высокопрочный мелкозернистый бетон для армоцементных конструкций. – М.: Строй издат., 1983. – 128 с.   | Bazhenov Yu.M. <i>Vysokoprochnyj melkozern-istyj beton dlja armocementnyh konstrukcij</i> . – М.: Strojizdat, 1983. - 128 s. [High-strength finegrained concrete for reinforced cement structures. – М.: Stroyizdat, 1983. - 128 p.] (in Russian)   |
| 4  | Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: Строй издат., 1978. – 455 с.  | Bazhenov Yu.M. <i>Tehnologija betona</i> . Strojizdat, 1978. - 455 [Technology of concrete. – М.: Stroyizdat, 1978. - 455 p.] (in Russian)  |
| 5  | Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. – М.: Строй издат., 1974. – 95 с.   | Berg O.Ya. <i>Fizicheskie osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona</i> . – М.: Strojizdat, 1974, - 95 s. [Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete. – М.: Stroyizdat, 1974, - 95 p.] (in Russian)  |
| 6  | Горчаков Г.И. Состав, структура и свойства цементных бетонов. – М.: Строй издат., 1976. – 145 с.  | Gorchakov G., I. <i>Sostav, struktura i svojstva cementnyh betonov</i> . – М.: Strojizdat, 1976. - 145 s. [Composition, structure and properties of cement concretes. – М.: Stroyizdat, 1976. - 145 p.] (in Russian)  |
| 7  | Митрац Л. В. Экономия цемента за счет совершенствования испытания бетона // Бетон и железобетон. – Москва, 1976. – № 12. – С. 32-33.  | Mitrats L. V. <i>Jekonomija cementsa za schet sovershenstvovaniya ispytaniya betona</i> // Beton i zhelezobeton. – 1976. N 12. - S. 32-33. [Saving cement by improving concrete testing // Concrete and reinforced concrete. – 1976. N 12. - pp. 32-33] (in Russian)  |
| 8  | Макаров А.С. Центрифугирование бетонных смесей в сплошных и перфорированных формах // - В кн.: Расчет и технология изготовления железобетонных напорных труб. – М.: Строй издат., 1969. – С. 56-71. | Makarov A.S. <i>Centrifugirovanie betonnyh smesej v sploshnyh i perforirovannyh formah</i> // - V kn.: Raschet i tehnologija izgotovlenija zhelezobetonnyh napornyh trub. – М.: Strojizdat, 1969. S. 56-71. [Centrifugation of concrete mixtures in solid and perforated forms // - In the book: Calculation and manufacturing technology of reinforced concrete pressure pipes. – М.: Stroyizdat, 1969. pp. 56-71]. (in Russian) |
| 9  | Пунагин В.Н. Технология бетона в условиях сухого жаркого климата. - Ташкент: Фан, 1977. – 223 с.  | Punagin V.N. <i>Tehnologija betona v uslovijah suhogo zharkogo klimata</i> , - Tashkent: Fan, 1977.- 223 s. [Technology of concrete in conditions of dry hot climate, - Tashkent: Fan, 1977.- 223 p.] (in Russian)  |
| 10 | Руденко И.Ф. Формование изделий поверхностными виброустройствами. – М.: Строй издат., 1972. – 150 с.  | Rudenko I.F. <i>Formovanie izdelij poverhnostnyimi vib-roustrojstvami</i> . М.: Strojizdat, 1972. - 150 s. [Molding of products by surface vibration devices. М.: Stroyizdat, 1972. - 150 p.] (in Russian)  |
| 11 | Чеховский Е.Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. – М.: Строй издат., 1970. – 97 с.   | Chekhov E.G. <i>Laboratornye raboty po gruntovedeniju i mehanike gruntov</i> . – М.: Strojizdat, 1970. - 97 s. [Laboratory work on soil science and soil mechanics. – М.: Stroyizdat, 1970. - 97 p.] (in Russian)   |
| 12 | Высокопрочные бетоны // Тр. НИИЖБ. Вып. xN15. – М.: Строй издат., 1963. – 95 с.   | High-strength concrete // Тр. НИИЖБ. Issue xN15. - Moscow: Strojizdat, 1963. - 95 p.  |
| 13 | Baydjanov D., Abdrakhmanova K., Kropachev P., Rakhimova G., Modified concrete for producing pile foundations. Magazine of Civil Engineering. 2019 vol: 86 (2) pp: 3-10                              | Baydjanov D., Abdrakhmanova K., Kropachev P., Rakhimova G., Modified concrete for producing pile foundations. Magazine of Civil Engineering. 2019 vol: 86 (2) pp: 3-10  |
| 14 | Malgorzata L., Modified pavement quality concrete as material alternative to concrete applied regularly on airfield pavements., Materials Science and Engineering, 2019 vol: 603 (3).\              | Malgorzata L., Modified pavement quality concrete as material alternative to concrete applied regularly on airfield pavements., Materials Science and Engineering, 2019 vol: 603 (3).\  |
| 15 | Huang K., Ding T., Xiao J., Singh A., Modification on Recycled Aggregates and its Influence on Recycled Concrete. Institute of Physics Publishing. 2019 vol: 323 (1)                                | Huang K., Ding T., Xiao J., Singh A., Modification on Recycled Aggregates and its Influence on Recycled Concrete. Institute of Physics Publishing. 2019 vol: 323 (1)  |
| 16 | B. Khasanov and T. Mirzaev, "Production of extra-strong concrete axisymmetric products," in E3S Web of Conferences, 2019, vol. 97, doi: 10.1051/e3sconf/20199706011.                                | B. Khasanov and T. Mirzaev, "Production of extra-strong concrete axisymmetric products," in E3S Web of Conferences, 2019, vol. 97, doi: 10.1051/e3sconf/20199706011.  |