

УДК 666.973.3: 666.973.6

Большаков В.И. , доктор технических наук,
 профессор, ректор,
 Мартыненко В.А., кандидат технических наук, доцент
 ГВУЗ «Приднепровская государственная академия
 строительства и архитектуры»
 Украина, г. Днепропетровск

СТРУКТУРА И ВЗАИМОСВЯЗЬ ЗАТРАТ ТЕПЛОТЫ ПРИ АВТОКЛАВНОЙ ОБРАБОТКЕ ГАЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

1. ВВЕДЕНИЕ

В технологии газобетонных изделий (ГБИ) автоклавного твердения самым теплотратным пределом является автоклавная обработка. На этот технологический процесс затрачивается около 70% энергии. По вопросу взаимосвязи и влияния технологических параметров производства ГБИ на величину затрат теплоты при автоклавной обработке имеется несколько публикаций [1, 2].

А.Х. Эйбре [1] указал на неэффективность использования в производстве малоактивных составов газобетона с большим содержанием цемента. У таких смесей гидратационное тепловыделение небольшое и температура сырца-газобетона во время предварительного выдерживания повышается только до 65-70°C. Рационально использовать составы газобетона с известью активностью более 70%, что позволяет достичь большей температуры сырца-газобетона за счет ее гидратационного твердения. Большой разогрев ГБИ позволяет сэкономить более 10% теплоты. Самое значительное количество теплоты (около 30%) расходуется на нагрев влаги в газобетоне. Так снижение В/Т отношения с 0,5 до 0,4 (что соответствует применению ударной или вибрационной технологии) позволяет уменьшить теплотраты при автоклавной обработке более чем на 8%. При значительном остывании автоклава после выгрузки расходуется большое количество теплоты на нагрев его корпуса из-за высокой его металлоемкости (АП 1,2-3,6x27). Существенные теплотери связаны также с недостаточной тепловой изоляцией корпуса автоклава. Увеличение неизолированной поверхности и утечка пара через неплотности приводит к большим потерям теплоты и увеличивает удельные расходы пара на единицу производимой продукции.

В нормативном документе [2] приведена зависимость удельного расхода теплоты ($M_{кал}$) и пара ($кз/м^3$) по показателю автоклавного оборудования - коэффициенту загрузки автоклава по объему (k_v) и плотности (300-800 $кз/м^3$) ГБИ (рис. 1). Такие показатели как удельная металлоемкость автоклавного оборудования и коэффициент поверхности автоклава еще не использовались для его теплотехнической характеристики. Так, коэффициент удельной металлоемкости автоклавного оборудования ($m_{АО}$) характеризует общую удельную металлоемкость теплотехнического оборудования используемого в тепловом процессе автоклавной обработки силикатных изделий:

$$m_{АО} = \frac{\sum(m_{авт} + m_{под} + m_{ав.т})}{V_{изд}}, \text{ м/м}^3, \quad (1)$$

где $m_{авт}$; $m_{под}$; $m_{ав.т}$ - соответственно масса автоклава, поддонов (автоклавных решеток) и автоклавных тележек, т; $V_{изд}$ - суммарный объем изделий загружаемых в автоклав, $м^3$.

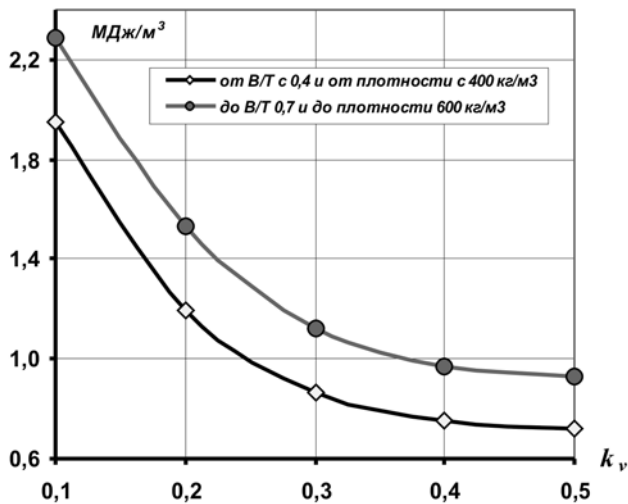


Рисунок 1 - Зависимость удельных теплот затрат при автоклавной обработке ГБИ от коэффициента загрузки автоклава по объему, В/Т отношения и плотности газобетона по данным [2]

Коэффициент поверхности автоклава (k_s) дополняет показатель k_v автоклава и характеризует удельные потери теплоты через поверхность автоклава к объему изделий:

$$k_s = \frac{S_{авт}}{V_{изд}}, \text{ м}^2/\text{м}^3, \quad (2)$$

где $S_{авт}$ - суммарная изолированная и неизолированная поверхность автоклава, м^2 .

Считаем, что разработка теплотехнических и технологических принципов взаимосвязи затрат теплоты на автоклавную обработку ГБИ позволила бы обусловить пути их снижения, что в настоящее время является очень актуальным. При возрастающей цене на энергоносители, вопрос уменьшения и рационального расхода пара при автоклавной обработке ГБИ имеет экономическую значимость.

Снижение удельных затрат на единицу производимой продукции ГБИ является актуальным особенно в настоящее время в нашей стране, где имеется значительный дефицит энергоносителей.

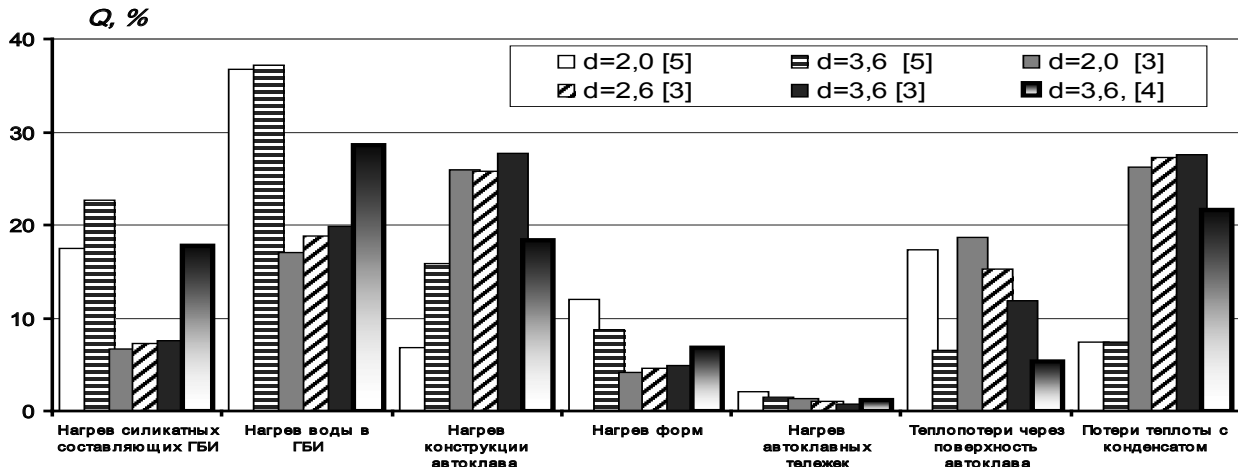


Рисунок 2 - Долевое значение постатейных затрат теплоты при автоклавной обработке ГБИ в автоклавах диаметром 2; 2,6 и 3,6 м согласно указанным источникам

2. СТРУКТУРА ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ ПРИ АВТОКЛАВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Анализ практических показателей удельного расхода пара при автоклавной обработке изделий на ряде предприятий этой отрасли Украины, Республики Беларусь показал разницу значений в соответствии с данными источников [2, 3]. Многофакторный анализ постатейных теплотехнических затрат теплоты автоклавной обработке ГБИ, разработка новой методики расчета тепловых балансов автоклавов позволил выстроить взаимосвязанную зависимость затрат теплоты излагать в ее следующем контексте (рис. 3).



Рисунок 3 - Структура схема затрат теплоты на автоклавную обработку ГБИ

Так, теплота пара при автоклавной обработке расходуется на нагрев ГБИ, конструкцию и теплоизоляцию автоклава, поддонов, автоклавных тележек, на возмещение теплотерь из автоклава в окружающую среду и потерь теплоты с отводимым конденсатом. Также определенная часть пара затрачивается на заполнение свободного автоклава и пористости газобетона изделий. Рассмотрим поштатейно эти затраты теплоты и их взаимосвязь во время проведения автоклавной обработки ГБИ.

1. Теплотзатраты на нагрев ГБИ состоят из:

1.1. Заполнения ячеистой и капиллярной пористости в газобетоне. Объем этой пористости равен объему ячеистых и капиллярных пор с учетом объема содержащихся остаточной воды в сырце-газобетоне. Также в этих порах содержится определенный объем паровоздушной смеси как после вакуумирования автоклава и в большем объеме после продувки автоклава. Чем больший объем содержания паровоздушной смеси в пористости газобетона и с меньшим содержанием в ней пара, тем хуже будет происходить прогрев центральных слоев изделий. Это приводит к уменьшению прочных характеристик этих слоев ГБИ. Именно, через пар, заполняющий пористость газобетона, происходит с ним тепло- и массообмен. Теплота пара расходуется на создание определенных температурных и влажностных параметров в макро- и микроструктуре газобетона, которые и определяют условия протекания реакции между сырьевыми силикатными материалами по образованию гидросиликатов.

1.2. Нагрева силикатных материалов газобетона. Масса этих составляющих меньше средней плотности газобетона, а удельная теплоемкость составляет около $0,84 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$. Соответственно, чем больше средняя плотность газобетона и, соответственно, содержание в нем силикатных материалов, тем больше требуется затратить теплоты на их нагрев и будет больше израсходовано пара и образовавшегося из него конденсата.

1.3. Нагрева химически не связанной воды, содержащейся в газобетоне. Масса такой воды зависит от начального водозатворения смеси, массы израсходованной на гидратацию извести и цемента и испаренной в период до автоклавной выдержки. Увеличение масса воды а газобетоне может возрасти в период продувки автоклава в результате тепло- и массообменных процессов в зависимости от положения газобетонных изделий (массив) в автоклаве. На стадии подъема давления пара в автоклаве происходит возрастания массы воды в газобетоне за счет массообменных процессов с паром. Это увеличение (конденсация) связано с плотностью газобетона и предыдущим содержанием в нем воды. Причем, чем выше содержание воды, тем больше образуется конденсата, который не удаляется из бетона на этой стадии и, соответственно, на его нагрев расходуется дополнительный пар. Из всех нагреваемых материалов в бетоне вода имеет наибольшую удельную теплоемкость (4,19 кДж/кг·°C), которая в 5 раз больше теплоемкости силикатных материалов и примерно в 10 раз больше теплоемкости металла.

Общим параметром, определяющим расход пара на нагрев ГБИ, является его исходная температура перед нагревом в автоклаве. От ее значения будет зависеть расход пара и количество сконденсировавшейся воды. Увеличение температуры сырца-газобетона (при его средней плотности <600) происходит в основном за счет тепловыделения при гидратации вяжущих. Основной вклад в его разогрев происходит за счет гидратации извести. Выдерживание ГБИ в отапливаемых камерах позволяет исключить потери теплоты из бетона, нагреть автоклавное оборудование (поддоны, автоклавные тележки). Исследования показали, что при рациональном времени выдержки ГБИ в обогреваемых камерах не представляется возможным изменить температуру центральных слоев ГБИ за счет внешнего теплообмена. Их нагрев возможен только за счет внутреннего тепловыделения при гидратации вяжущих. Для описания этого процесса разработана и апробирована математическая модель процесса теплопереноса в сырце-газобетоне в период до автоклавной выдержки с учетом технологических условий. Процесс нестационарного теплопереноса представлен дифференциальным уравнением теплопроводности с учетом испарения влаги и тепловыделения при гидратации вяжущих:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right) - \varepsilon \rho r \frac{\partial u}{\partial \tau} + Q(\tau), \quad (3)$$

где t - температура сырца-газобетона, K ; λ - коэффициент теплопроводности, $Вт/(м·K)$; ρ - средняя плотность, $кг/м^3$; τ - время до автоклавной выдержки, $ч$; $c = c_0 + c_1 u$ - удельная теплоемкость, $кДж/кг·K$; c_0 , c_1 - теплоемкость сухого газобетона, теплоемкость воды, $кДж/кг·K$; u - влагосодержание, $кг$; $\varepsilon = a_{m1}/a_{m2}$ - коэффициент внутреннего испарения влаги; a_{m1} , a_{m2} - коэффициенты диффузии пара и воды; r - теплота парообразования, $кДж/кг$; $Q(\tau)$ - тепловыделение во время выдержки при гидратации вяжущих в бетоне, $кДж/кг$.

Определенную роль на расход теплоты для нагрева ГБИ на стадии подъема давления будет оказывать тепловыделение от гидратации цемента. Эффективное использование тепловыделения цемента на этой стадии позволит уменьшить расход пара и, соответственно, уменьшить образование конденсата в капиллярных и ячеистых порах бетона. Это может достигнуто за счет использования термокинетического фактора [6-8]. Сокращения доли тепловыделения цемента на стадиях до автоклавной выдержки и смещение большей его доли на стадию автоклавной обработки посредством уменьшения начального содержания воды в составе бетона (за счет меньшего В/Т, использования вибрационной и ударной технологий) и оптимизация времени до автоклавной выдержки. В комплексе эти технологические приемы могут дать снижения удельных затрат теплоты на нагрев газобетонных изделий.

2. Теплотраты, связанные с нагревом автоклавного оборудования и проведением цикла обработки состоят из:

2.1. Расхода массы пара, используемого для продувки автоклава (если применяется такая стадия). Масса пара зависит от свободного объема автоклава ($V_{св. в}$) и кратности продувки ($k_{пр}$),

которую устанавливают экспериментально для данной конструкции автоклава, расположения в нем на автоклавных тележках ГБИ, способа ввода пара в автоклав. Поскольку этот процесс в большинстве автоклавов происходит за счет разбавления воздуха паром, то достижение минимального его содержания 1-2% происходит примерно при $k_{np} = 5-6$. По данным [4] расчетная масса пара на продувку принята 5 кг/м^3 изделий при давлении 1 МПа, что не обосновано, так как не связано со свободным объемом автоклава.

Масса пара для заполнения свободного объема автоклава на стадии под рабочего давления взаимосвязана с k_v . Этот показатель в ряде используемых технологий в Украине составляет 0,34-0,45 и характеризует проектно-технологические решения автоклавного оборудования (рис. 4).

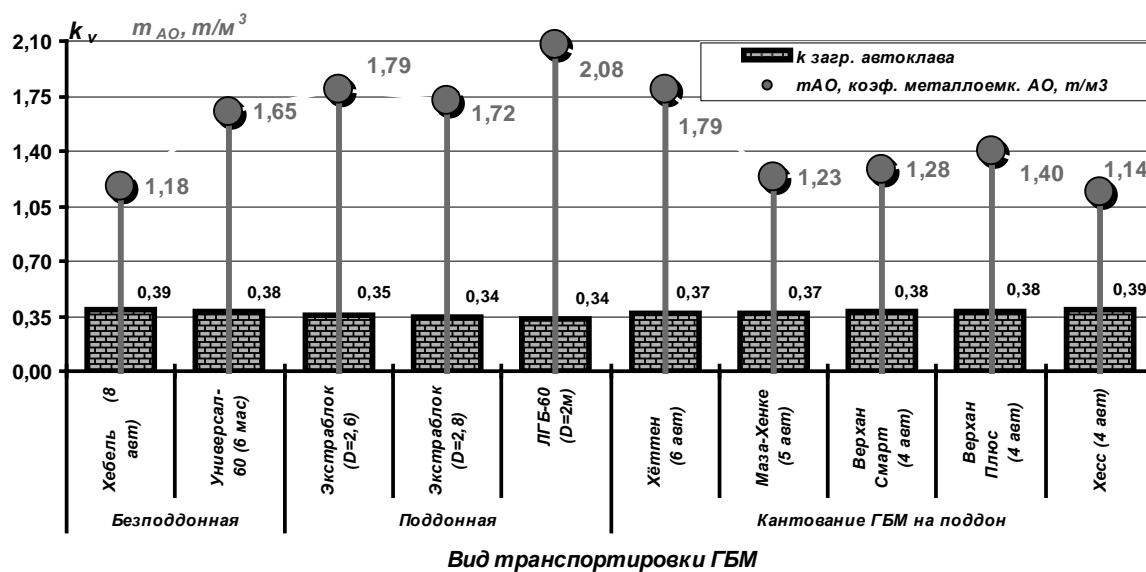


Рисунок 4 - Показатели k_v и $m_{АО}$ в указанных технологиях

2.2-2.4. Теплота нагрева поддонов (решеток), автоклавных тележек и металлической конструкции автоклава, как всего автоклавного оборудования взаимосвязана с удельной металлоемкостью и их начальной температурой. Так, $m_{АО}$ в разных технологиях составляет 1,0-2,0 т/м³ (рис. 4) Температура поддонов и автоклавных тележек после выдержки поезда в обогреваемых близка к температуре ГБИ. Температура автоклава зависит от времени выгрузки и загрузки автоклавных поездов, его типа (проходной или тупиковый) характеристик теплоизоляции, расположения автоклава в линии цеха и колеблется (в зависимости от технологии и организации производства) в широких пределах 70-120°C. Снижение теплотрат по этим пунктам может достигнуто на стадии разработки технологии и проектно-технологических решений автоклавного оборудования.

2.5. Теплота, связанная с теплотерями за цикл обработки через поверхность конструкции автоклава, которая состоит из теплотерь изолированной и неизолированной поверхностью автоклава. Эти потери взаимосвязаны с характеристиками теплоизоляции, долей неизолированной поверхности, наружной температурой, температурой изотермической выдержки и продолжительностью режима автоклавной обработки. Конструктивную особенность автоклава и возможность для относительного сравнения теплотрат (при прочих равных условиях) может характеризовать k_s . Этот показатель в используемых автоклавах отечественного и зарубежного производства составлять 2,4-5,8 м²/м³.

3. Количество удаляемого конденсата и его теплота, есть результат полезных и побочных тепловых затрат в теплотехническом процессе автоклавного оборудования. Его количество зависит от используемой массы пара и объема удаленной воды из изделий в результате массообменных

процессов во время изотермического прогрева изделий и снижения давления в автоклаве. Теплота отводимого конденсата из автоклава, есть результат суммы затрат теплоты по п. 1 (без п. 1.1) после прогрева газобетона, по п. 2 (без п. 2.1).

Количество отводимой теплоты с конденсатом можно регулировать во время обработки только путем своевременного его отвода, особенно на стадии поднятия давления. При прочих равных условиях, количество конденсата можно уменьшить только за счет меньшего удельного расхода пара, в т.ч. на стадии поднятия давления и нагрева ГБИ.

Учитывая, что при снижении давления в автоклаве из 1 м³ газобетона (в зависимости от влагосодержания, плотности газобетона) образуется и удаляется от 45 до 80 кг пара, то возможно его вторичное использование, организовав 2- и 3-х ступенчатые перепуски пара из автоклава в автоклав. Для этого необходима разработка проектно-организационных решений в проектируемой технологии. Для организации двойного перепуска количество автоклавов в линии должно составлять не менее 5-6 шт., а параметры цикла автоклавной обработки должны удовлетворять определенным условиям, которые уточняются после построения недельно-суточного графика работы автоклавов в технологической линии.

ВЫВОДЫ.

Уменьшение тепловых затрат при автоклавной обработке ГБИ может быть достигнуто за счет:

- оптимизации бетонно-технологических факторов газобетона, посредством снижения влагосодержания, достижением в нем оптимальной температуры перед автоклавной обработкой, эффективного использования гидратационного тепловыделения цемента на стадии подъема давления в автоклаве;
- улучшения показателей проектно-технологических параметров автоклавного оборудования, повышением коэффициента загрузки автоклава, снижением коэффициента удельной металлоемкости автоклавного оборудования и коэффициента поверхности автоклава.
- разработкой организационно-технологических решений для проектируемой линии с целью повторного использования удаляемого пара за счет 2- и 3-х ступенчатых перепусков, посредством оптимизации количества автоклавов и временных параметров их работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эйне А.Х. Возможности уменьшения расхода тепловой энергии при производстве газобетона // Строительные материалы. – 1986. - № 2. – С. 22-23.
2. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий по производству изделий из ячеистого и плотных бетонов автоклавного твердения. ОНТП 09-85 Минстройматериалов СССР. – Таллинн : НИПИсиликатобетон, 1989. – 116 с.
3. Новиков Б.А. О расходе пара при автоклавной обработке изделий из ячеистого бетона // Производство и применение изделий из ячеистых бетонов. – М.: НИИЖБ, Стройиздат, 1968. – С. 20-24.
4. Горяйнов К.Э., Дубенецкий К.Н., Васильков С.Г., Попов Л.Н. Технология минеральных теплоизоляционных материалов и легких бетонов. – М. : Стройиздат, 1976. – 536 с.
5. Горяйнов К.Э., Горяйнова С.К. Технология теплоизоляционных материалов и изделий. – М.: Стройиздат, 1982. – 376 с.
6. Ушеров-Маршак А.В. Оценка вклада экзотермии в энергетический баланс твердения вяжущих и бетонов // Бетон и железобетон. – 1997. - № 3. – С. 12-14.
7. Ушеров-Маршак А.В. Калориметрия цемента и бетона. – Харьков : «Факт», 2002. – 183 с.
8. Мартыненко В.А. Влияние экзотермии твердения вяжущих на энергозатраты при автоклавной обработке газобетонных изделий. Строительство, материаловедение, машиностроение: серия «Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве». Сб. науч. труд. Вып. 4. – Днепропетровск: ПГАСА, 2009. – С. 26-38.