

# ПУТИ СУШКИ ГАЗОСИЛИКАТНЫХ БЛОКОВ



**Кузьменков М.И.,**  
Заслуженный деятель науки  
Республики Беларусь, д.т.н.,  
проф. УО «Белорусский  
государственный  
технологический  
университет  
(г. Минск, Беларусь)



**МартинOV О.Г.,**  
науч. сотр. ГНУ «Институт  
тепломассообмена» НАН Б  
(г. Минск, Беларусь)

## Введение

К настоящему времени технология производства изделий из ячеистого бетона достаточно хорошо отработана [1] и они широко применяются в строительной отрасли Республики Беларусь вследствие их высоких технико-экономических показателей [2]. К сожалению, из-за ошибок в проектировании и нарушений культуры производства происходит снижение качества наружных ограждающих конструкций возводимых зданий и сооружений с использованием изделий из ячеистого бетона [3]. Одной из причин этих негативных явлений является повышенная влажность эксплуатируемых конструкций из ячеистого бетона. В качестве одной из мер по увеличению климатической долговечности наружных конструкций из ячеистого бетона предлагается [4] предварительная сушка газосиликатных блоков.

## Постановка задачи

В настоящей работе с целью устранения технологических простоев и уплотнения графика строительных работ рассматривается возможность сушки изделий из ячеистого бетона непосредственно на месте их изготовления.

Как известно, финишной стадией производства блоков из ячеистого бетона является автоклавирование. По существующей технологии процесс химико-термической обработки блоков в автоклаве осуществляется в среде насыщенного пара при температуре 183–185 °С и давлении 1,0–1,1 МПа. По завершению процесса давление в автоклаве снижается (перед разгрузкой) и блоки выгружаются.

В технологическом плане сушку изделий предлагается производить в том же автоклаве по завершению режима химико-термической обработки.

В пределах поставленной задачи рассмотрим возможность использования в качестве сушильного агента перегретого водяного пара, а также горячего воздуха.

На основании выполненных исследований [5,6] полагается, что влажность высушенных изделий не должна превышать их сорбционной влажности, составляющей в среднем 12%.

В качестве примера рассмотрим показатели, характерные для типичного производства.

Изделия к началу процесса сушки будут уже предварительно прогреты до температуры сушки  $t_{м.0} = 180$  °С, что приблизительно равно температуре насыщенного пара, подаваемого в автоклав в процессе их химико-термической обработки.

Для определения экономичности процесса будем считать, что изделия к окончанию сушки имеют температуру  $t_{м.вых} = t_{вых} = 110$  °С.

В процессе сушки в автоклав подается сушильный агент, который испаряет влагу из блоков. Образующаяся смесь испаренной влаги и исходного сушильного агента из автоклава направляется для использования в других

целях, а изделия выгружаются. Температура этой смеси в процессе сушки снижается до  $t_{\text{вых}} = 110$  °С. Давление сушильного агента в автоклаве поддерживается на уровне 0,1 МПа. Отсутствие избыточного давления в автоклаве в период сушки исключает утечки пара.

При конвективной сушке сушильный агент должен подаваться с температурой и расходом, достаточным для нагрева и испарения влаги. Также внутри автоклава смесь испаренной влаги и исходного сушильного агента должна иметь скорость движения, достаточную для надлежащей интенсивности сушки.

### Теплотехнические расчеты

Расчеты выполнялись согласно общепринятой методологии, отраженной, например в [7–10]. Как известно, материал можно высушить только в том случае, если парциальное давление паров жидкости в приповерхностной зоне материала будет больше парциального давления паров в ядре смеси испаренной влаги и сушильного агента. Для того, чтобы сушильный агент был в состоянии удалить влагу за пределы высушиваемого материала необходимо исключить возможность конденсации влаги в смеси паров испаренной влаги с сушильным агентом.

Сушильный агент испаряет влагу из материала посредством тепла, которое он содержит, а пары испаренной влаги удаляет за счет своего физического объема, которое он занимает.

В начале сушки из-за разности парциальных давлений водяных паров на поверхности изделия и в окружающей сушильной среде влага начинает испаряться с поверхности материала. Из-за перепада влагосодержания в нем появляется поток влаги от центра к периферии. Если пары внутри изделия не успевают удаляться, может иметь место его разрыв от избыточного давления. Поэтому интенсивность сушки не должна превышать критических значений. Сушка прекращается, когда влагосодержание во всех блоках достигает значения их равновесия с окружающей средой.

При выгрузке изделий с остаточным влагосодержанием ниже их равновесного значения в цеху в последующем может иметь место образование в изделиях трещин за счет поглощения влаги из воздуха и неравномерного распределения ее по объему изделий.

В соответствии с установленными требованиями равновесная влажность материала изделий из ячеистого бетона в эксплуатационных, специальным образом обеспечиваемых условиях не должна превышать 4%. Однако известно, что в зимних условиях равновесная влажность материала в воздушной среде мо-

жет достигать и 12%. Поэтому, если влажность материала изделий по завершению в них реакций при обработке в автоклаве достигает значений 35%, то последующую их сушку до влажности 12%, что гарантирует надлежащее качество изделий в процессе их производства. Отгрузка изделий и их доставка потребителю при обеспечении надежной упаковки, исключающей увлажнение изделий, будет являться одним из важнейших факторов, обеспечивающих надлежащее качество строительства.

В качестве примера рассмотрим типовой блок ячеистого бетона длиной  $L_{\text{бл}} = 625$  мм; шириной  $A_{\text{бл}} = 500$  мм и высотой  $B_{\text{бл}} = 249$  мм. Объем блока будет равен  $V_{\text{бл}} = L_{\text{бл}} A_{\text{бл}} B_{\text{бл}} = 0,0778125$  м<sup>3</sup>, площадь наружной поверхности блока  $S_{\text{бл}} = 2 (A_{\text{бл}} L_{\text{бл}} + B_{\text{бл}} L_{\text{бл}} + A_{\text{бл}} B_{\text{бл}}) = 1,185$  м<sup>2</sup>, а условный расчетный эффективный размер блока

$$R_{\text{бл.эфф}} = \sqrt{\frac{2S_{\text{бл}}}{6}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,185}{6}} = 0,444 \text{ м.}$$

Следует принимать во внимание при расчетах показателей, что при термической обработке объем изделий практически не меняется (только в пределах усадки, составляющей несколько процентов), в отличие от их массы и, следовательно, и их плотности, сильно зависящей от степени их увлажнения.

Для стеновых блоков расчетная плотность материала блока стандартного изделия (подразумевается по сухому скелету с нулевой относительной влажностью  $W_{\text{б,сух}} = 0\%$ ) принимается

$$\rho_{\text{м,сух}} = 500 \text{ кг/м}^3.$$

Определим количество тепла, требуемое для сушки изделий с начальной влажностью  $W_{\text{нач}} = 35\%$  до конечной  $W_{\text{кон}} = 12\%$ .

Влага в материале сначала в жидком виде нагревается до температуры кипения в объеме материала  $t_{\text{кип}}$ , затем кипит в объеме материала  $t_{\text{кип}}$ , после чего нагревается в среднем до температуры смеси испаренной влаги и исходного сушильного агента в автоклаве  $t_{\text{см}}$ .

Вначале влажный материал с исходным влагосодержанием

$$X_{\text{вл.м.0}} = \frac{W_{\text{нач}}}{1 - W_{\text{нач}}} = 0,538 \text{ кг влаги/кг сухого скелета}$$

материала имеет температуру  $t_{\text{м.0}} = 180$  °С.

Принимается, что высушенный материал вместе с остаточной влагой в количестве

$$X_{\text{вл.м.вых}} = \frac{W_{\text{нач}}}{1 - W_{\text{нач}}} = 0,136 \text{ кг влаги/кг сухого скелета}$$

материала удаляется из автоклава с температурой  $t_{\text{м.вых}} = t_{\text{вых}} = 110$  °С.

Количество удаляемой из материала влаги, приходящейся на 1 кг сухого материала (скелета) равняется

$$x_{\text{вл.уд}} = x_{\text{вл.м.0}} - x_{\text{вл.м.вых}} = 0,402 \text{ кг удаляемой влаги/кг скелета сухого материала.}$$

Коэффициент средней удельной теплоемкости сухого материала изделия согласно [11] при температуре в диапазоне от  $t_{\text{м.0}}$  до  $t_{\text{м.суш}}$  составляет

$$c_{\text{м.сух}} = 0,84 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}.$$

Коэффициент средней удельной теплоемкости влаги в жидком виде при температуре в диапазоне от  $t_{\text{м.0}}$  до  $t_{\text{вых}}$  составляет  $c_{\text{ж}} = 4,22 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$ .

Удельная энтальпия (теплосодержание) паров влаги в удаляемом количестве при температуре  $t_{\text{вых}}$  и давлении 0,1 МПа равна [12]  $i_{\text{п.вых}} = 2696,7 \text{ кДж/(кг удаляемой влаги)}$ .

Суммарное количество теплоты (удельной на кг сухого материала), требующееся для сушки материала будет равно

$$Q_{\text{суш.м}} = c_{\text{м.сух}}(t_{\text{м.вых}} - t_{\text{м.0}}) + x_{\text{вл.м.вых}} c_{\text{ж}}(t_{\text{вых}} - t_{\text{м.0}}) + x_{\text{вл.уд}}(i_{\text{п.вых}} - c_{\text{ж}} t_{\text{м.0}}) = 679,74 \text{ кДж/(кг скелета сухого материала).}$$

Суммарное количество теплоты (удельной на кг удаляемой влаги), требующееся для сушки материала будет равно

$$Q_{\text{суш.уд.вл}} = Q_{\text{суш.м}}/x_{\text{вл.уд}} = 679,74/0,402 = 1690,9 \text{ кДж/(кг удаляемой влаги).}$$

### Сушка перегретым паром

Известно успешное использование перегретого пара в качестве сушильного агента для конвективной сушки сырья и изделий при производстве строительных материалов [13].

Рассмотрим возможность сушки изделий из ячеистого бетона перегретым паром.

С целью снижения энергозатрат на предварительный разогрев блоков процесс их сушки осуществим в том же автоклаве сразу же по завершению химико-термической обработки, изменив параметры подаваемого в автоклав пара с насыщенного на перегретый. Для этого следует подавать в автоклав пар, перегретый до температуры пара  $t_{\text{п.вх}} = 220 \text{ °C}$  при давлении  $p_{\text{п.вх}} = 0,1 \text{ МПа}$  и соответственно с плотностью  $0,441 \text{ кг/м}^3$ .

В изобарическом режиме в автоклаве температура пара вследствие испарения влаги понизится, а влагосодержание возрастет. Температура смеси исходного пара с парами испаренной влаги на выходе из автоклава при-

нимается равной  $t_{\text{п.вых}} = 110 \text{ °C}$  с плотностью  $0,573 \text{ кг/м}^3$  [14], что исключает конденсацию паров в автоклаве, так как при барометрическом давлении плотность насыщенного пара равна  $0,590 \text{ кг/м}^3$  [12].

Удельное количество тепла, передаваемое перегретым паром влажным блокам, при таких параметрах [14] будет составлять

$$Q_{\text{п}} = i_{\text{п.вх}} - i_{\text{п.вых}} = 2914,7 - 2696,7 = 218 \text{ кДж/кг пара.}$$

Удельный расход перегретого пара с такими параметрами составит

$$I_{\text{п}} = Q_{\text{суш.уд.вл}}/Q_{\text{п}} = 1690,9/218 = 7,756 \text{ кг пара/кг удаленной влаги.}$$

Значение удельного расхода пара, рассчитанного для сравнения по формуле, предложенной в [15], получается несколько выше:

$$I_{\text{п}} = (1022 + t_{\text{п.вх}})/(t_{\text{п.вх}} - t_{\text{п.вых}}) = (1022 + 220)/(220 - 110) = 11,3 \text{ кг пара/кг удаленной влаги.}$$

Удельные энергозатраты на выработку этого перегретого пара с температурой  $t_{\text{п.вх}} = 220 \text{ °C}$  из воды с температурой  $t_{\text{ж.0}} = 20 \text{ °C}$  и значением начальной энтальпии  $i_{\text{ж.0}} = 83,91 \text{ кДж/кг пара}$  [16] составят

$$Q_{\text{п.вх}} = i_{\text{п.вх}} - i_{\text{ж.0}} = 2914,7 - 83,91 = 2831 \text{ кДж/кг пара.}$$

Удельные энергозатраты на удаление влаги из материала посредством перегретого пара будут равны

$$Q_{\text{п.уд.вл}} = I_{\text{п}} Q_{\text{п.вх}} = 7,756 \cdot 2831 = 21\,957 \text{ кДж/кг удаленной влаги.}$$

### Сушка воздухом

Рассмотрим возможность сушки изделий из ячеистого бетона горячим воздухом.

Для этого также в автоклав с изделиями по завершении их химико-термической обработки и удалении из него технологического пара будем подавать горячий воздух.

Начальное влагосодержание влажного воздуха на входе  $x_{\text{п.в.вх}} = x_{\text{п.в.вх}}(t_{\text{вх}}, \varphi_{\text{вх}})$  будет определяться его температурой и влажностью на входе  $t_{\text{вх}}$  и  $\varphi_{\text{вх}}$ .

Количество влаги, уносимой с воздухом, будет определяться значением его влагосодержания  $x_{\text{п.в.вых}} = x_{\text{п.в.вых}}(t_{\text{вых}}, \varphi_{\text{вых}})$  при температуре и влажности воздуха на выходе  $t_{\text{вых}}$  и  $\varphi_{\text{вых}}$ .

Тогда количество влаги, удаляемой из самого высушиваемого материала, будет определяться разницей влагосодержаний воздуха на выходе и входе  $x_{\text{п.в.вых}} - x_{\text{п.в.вх}}$ , кг влаги/кг сухого воздуха.

Примем, что абсолютное давление в автоклаве равно  $P_{\text{суш}} = 0,1 \text{ МПа}$ . Воздух для сушки предварительно поступает в калорифер на его подогрев из окружающей среды с температурой  $t_{\text{в.0}} = 20 \text{ °C}$  с относительной влажностью  $\varphi_{\text{в.0}} = 0,81$  (81%) и плотностью  $\rho_{\text{в.0}} = 1,18 \text{ кг/м}^3$  [17].

При этих же условиях исходное влагосодержание воздуха составляет  $x_{п.в.0} = 0,012$  кг/кг сухого воздуха, соответствующее парциальное давление пара  $p_{п} = 1894$  Па, давление насыщающих паров  $p_{н} = 2338,8$  Па, что хорошо коррелирует с расчетом по формулам, приведенным в [18]:

$$p_{п} = 0,6112 \cdot \exp[17,504 \cdot t / (241,2 + t_{в.0})] = 2334,8 \text{ Па.}$$

Хотя влага из материала может испаряться при любой температуре материала, лишь бы парциальная плотность паров жидкости на поверхности материала  $p_{п.пов}$  была больше  $p_{п}$  в ядре потока, интенсивнее всего процесс сушки идет в состоянии кипения влаги при температуре, не менее температуры кипения. При  $H. U.$  температура кипения воды со свободной поверхности  $t_{кип} = 100$  °С. Поэтому температура влажного воздуха, как сушильного агента, на выходе из автоклава должна быть также не менее 100 °С, чтобы высушиваемый материал не захлаживался, то есть, чтобы поток тепла всегда был направлен от сушильного агента к материалу. Поэтому также выберем, что температура воздуха на входе в автоклав  $t_{вх} = 220$  °С, на выходе из него  $t_{вых} = 110$  °С, а относительное влагосодержание воздуха на входе в автоклав  $x_{п.в.вх} = x_{п.в.0} = 0,012$  кг/кг сухого воздуха.

В воздухе, выходящем с температурой 110 °С (> 100 °С) отсутствует вторичная конденсация влаги на блоках, что обеспечивает удаление влаги из материала посредством ее выкипания из материала (хотя бы с его наружной поверхности).

Пары удаляемой из материала влаги вместе с исходными парами влаги и воздухом в сушильном агенте образуют в автоклаве паровоздушную среду.

Теплосодержание сушильного агента определяется по его температуре на входе. Влагоемкость сушильного агента определяется по его температурным параметрам на выходе.

Рассмотрим показатели энергоемкости сушки воздухом.

Расчет удельной энтальпии влажного воздуха с начальным влагосодержанием  $x_{п.в.вх} = x_{п.в.0}$  на 1 кг сухой части воздуха, рассчитанных по формуле [18]

$$i = 1,006 \cdot t + x_{п.в.} (2501 + 1,805 \cdot t) \text{ (кДж/кг сух. возд.)},$$

дает следующие значения  $i_{в.0} = 50,5652$ ;

$$i_{в.вых} = 143,0546;$$

$$i_{в.вх} = 256,0972 \text{ (кДж/кг сух. возд.)}.$$

Количество тепла, передаваемое высушиваемому материалу от горячего воздуха, при-

нимая во внимание, что расчет ведется только с учетом начального влагосодержания влаги в воздухе  $x_{п.в.вх} = x_{п.в.0}$ , рассчитывается по изменению его температуры (при отсутствии теплопотерь):

$$Q_{в} = i_{в.вх} - i_{в.вых} = 256,0972 - 143,0546 = 113,0412 \text{ кДж/кг сухого воздуха.}$$

Удельный расход сухого воздуха

$$l_{с.в} = Q_{суш.уд.оп} / Q_{в} = 1690,9 / 113,0412 = 14,96 \text{ кг сухого воздуха/кг влаги.}$$

Поскольку

$$l_{с.в} = 1 / (x_{п.в.вых} - x_{п.в.0}),$$

можно определить влагосодержание воздуха, выходящего из автоклава:

$$x_{п.в.вых} = x_{п.в.0} + 1 / l_{с.в} = 0,012 + 0,0669 = 0,0789 \text{ кг влаги/кг сухого воздуха.}$$

При таком влагосодержании значение относительной влажности воздуха на выходе равно 7,9%, что гарантирует полное отсутствие конденсации в нем влаги.

Удельные энергозатраты на нагрев исходного воздуха до температуры  $t_{вх} = 220$  °С составляют

$$Q_{в.вх} = i_{в.вх} - i_{в.0} = 256,0972 - 50,5652 = 205,532 \text{ кДж/кг сухого воздуха.}$$

Удельные энергозатраты на удаление из материала влаги горячим воздухом составят

$$Q_{в.уд.вл} = l_{с.в} Q_{в.вх} = 14,96 \text{ кг сух. возд./кг влаги} \cdot 205,532 \text{ кДж/кг сух. возд.} = 3074,76 \text{ кДж/кг влаги.}$$

Приведенные выше расчетные оценки показывают большую энергетическую эффективность использования в качестве сушильного агента воздуха по сравнению с паром.

Поэтому оценку степени интенсивности процесса сушки произведем только для воздуха.

**Интенсивность сушки** будет зависеть от интенсивности подвода тепловой энергии к материалу изделия и интенсивности влагоудаления.

Так как при конвективной сушке посредством сушильного агента тепловая энергия к изделию подводится через его геометрическую поверхность, можно написать, что интенсивность теплообмена турбулентного потока паровоздушной среды (смесь сушильного агента с парами удаляемой влаги) с поверхностью пористого изделия с определяющим размером  $D$  при адиабатических условиях (когда вся теплота, переданная от парогазовой среды к жидкости, затрачивается на испарение последней и возвращается к смеси с паром),

характеризуемая средним значением безразмерного критерия Нуссельта

$$\overline{Nu}_R = \frac{\alpha R}{\lambda},$$

будет описываться известным выражением [16, с. 348],

$$\overline{Nu}_R = 0,00455 Re_R^{0,8} K_{исп}^{0,4}.$$

Соответственно среднее значение коэффициента теплообмена между поверхностью и потоком паровоздушной среды

$$\alpha = \frac{\lambda \overline{Nu}_R}{R}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

где  $R$ , м – определяющий размер поверхности (по направлению омывающего ее потока);

$\lambda$ , Вт/(м·°C) – коэффициент удельной теплопроводности паровоздушной среды (при температуре в ядре потока).

Значение критерия Рейнольдса

$$Re_R = \frac{wR}{\nu} = \frac{\rho_{cp} wR}{\eta},$$

где  $w$ , м/с – линейная скорость потока паровоздушной среды;

$\rho_{cp}$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность паровоздушной среды;

$\nu$ , м<sup>2</sup>/с – кинематическая вязкость паровоздушной среды (при температуре в ядре потока);

$\eta$ , кг/(м·с) – динамическая вязкость паровоздушной среды (при температуре в ядре потока).

Значение критерия фазового перехода

$$K_{исп} = \frac{r_{исп}}{c_{p,cp} (t_{cp} - t_{поверхн})},$$

где  $c_{p,cp}$ , Дж/(кг·K) – удельная изобарическая теплоемкость паровоздушной среды (при температуре в ядре потока);

$t_{cp}$ , °C – температура (средняя) паровоздушной среды в ядре потока;

$t_{поверхн}$ , °C – температура поверхности изделия.

Для оценки значений искомой средней интенсивности необходимо выполнить корректное усреднение приведенных выше показателей.

Средняя температура потока паровоздушной смеси (в ядре потока)

$$t_{cp} = (t_{вх} + t_{вых})/2 = (220 + 110)/2 = 165 \text{ °C}.$$

Средняя температура смеси испаренной влаги и исходного сушильного агента в автоклаве в ядре потока принимается равной средней температуре сушильного агента

$t_{cp} = (t_{вх} + t_{вых})/2 = 165 \text{ °C}$ , что учитывается при расчете интенсивности теплообмена агента с изделием.

Как указано выше, паровоздушная среда состоит из воздуха со средним содержанием водяного пара в количестве

$$x_{п,ср} = (x_{п,в,0} + x_{п,в,вых})/2 = (0,012 + 0,0789)/2 = 0,045 \text{ кг влаги/кг сухого воздуха}.$$

Средняя плотность паровоздушной среды при  $P_{суш} = 0,1$  МПа рассчитывается по формуле, приведенной в [15]:

$$\rho_{cp} = (349 - \frac{132 \cdot x_{п,ср}}{0,622 + x_{п,ср}})/(273 + t),$$

кг среды/м<sup>3</sup> среды.

Из чего, соответственно, находится, что при  $t_{cp} = 110 \text{ °C}$   $\rho_{cp} = 0,888 \text{ кг/м}^3$ , при  $t_{cp} = 165 \text{ °C}$   $\rho_{cp} = 0,7763 \text{ кг/м}^3$ .

Относительная молярная концентрация сухого воздуха и пара в рассматриваемой смеси

$$\begin{aligned} \sigma_v &= 0,622/(0,622 + x_{п,ср}) = \\ &= 0,622/(0,622 + 0,045) = 0,9324; \\ \sigma_n &= x_{п,ср}/(0,622 + x_{п,ср}) = \\ &= 0,045/(0,622 + 0,045) = 0,0681. \end{aligned}$$

Плотность пара в смеси (165 °C)

$$\rho_{п,ср} = \sigma_n \rho_{cp} = 0,0681 \cdot 0,7763 = 0,0529 \text{ кг/м}^3.$$

Средние значения теплофизических параметров рассчитывались с учетом рекомендаций, приведенных в [19].

Расчетное выражение для величины среднего значения коэффициента теплообмена содержит значение коэффициента удельной теплопроводности в числителе. Поэтому среднее значение коэффициента удельной теплопроводности для смеси рассчитывается как средневзвешенное значений коэффициентов удельной теплопроводности составляющих компонентов при  $t_{cp} = 165 \text{ °C}$  с поправочным коэффициентом:

$$\begin{aligned} \lambda_{cp} &= (\sigma_v \lambda_v + \sigma_n \lambda_n) \left(1 + \frac{\sigma_n - \sigma_v}{3,5}\right) = \\ &= (0,932 \cdot 0,037 + 0,0681 \cdot 0,030) \cdot \end{aligned}$$

$$\left(1 + \frac{0,0681 - 0,0681^2}{3,5}\right) = 0,0372 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$$

(почти как у воздуха).

Среднее значение удельного коэффициента изобарической теплоемкости, рассчитываемое на 1 кг сухого воздуха, применяемое для энергетических расчетов,

$$\begin{aligned} c_{p,ср} &= c_{p,в} + x_{п,ср} c_{p,п} = 1020 + 0,045 \cdot 1975 = \\ &= 1110 \text{ Дж}/(\text{кг сух. возд. °C}). \end{aligned}$$

Среднее значение удельного коэффициента изобарической теплоемкости, рассчитываемое на 1 кг паровоздушной среды (влажного воздуха), применяемое для тепло-

массообменных расчетов, в силу аддитивности физической природы этого показателя относительно долей составляющих ее компонентов, имеет следующее представление:

$$c_{p, \text{ср}} = \sigma_v c_{p, \text{в}} + \sigma_n c_{p, \text{н}} = 0,932 \cdot 1020 + 0,0681 \cdot 1975 = 1085,1 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Среднее значение удельного коэффициента динамической вязкости паровоздушной среды:

$$\eta_{\text{ср}} = (\sigma_v \eta_v + \sigma_n \eta_n) \left(1 + \frac{\sigma_n - \sigma_v}{2,75}\right) = (0,932 \cdot 24,7 \cdot 10^{-6} + 0,0681 \cdot 14,8 \cdot 10^{-6}) \cdot \left(1 + \frac{0,0681 - 0,0681^2}{3,5}\right) = 24,58 \cdot 10^{-6} \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}.$$

При обеспечении техническими средствами в автоклаве скорости движения сушильного агента в ядре потока, равной, например,  $w = 10 \text{ м/с}$ , значение критерия Рейнольдса для блока с  $R_{\text{бл.эфф}} = 0,444 \text{ м}$  составит

$$Re_R = \frac{\rho_{\text{ср}} w R_{\text{бл.эфф}}}{\eta_{\text{ср}}} = \frac{0,7763 \cdot 10 \cdot 0,444}{24,58 \cdot 10^{-6}} = 140226,$$

что свидетельствует о развитой степени турбулентности.

Значение критерия фазового перехода при давлении в автоклаве  $0,1 \text{ МПа}$ , температуре поверхности изделия  $t_{\text{поверхн}} = t_{\text{вых}} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$  и соответствующей теплоте испарения  $r_{\text{исп}} = 2257,6 \text{ кДж/кг}$  [14,20,21]

$$K_{\text{исп}} = \frac{r_{\text{исп}}}{c_{p, \text{ср}} (t_{\text{ср}} - t_{\text{поверхн}})} = \frac{2257,6}{1,0851 (165 - 110)} = 37,83.$$

$$\overline{Nu}_R = 0,00455 Re_R^{0,8} K_{\text{исп}}^{0,4} = 0,00455 \cdot 140226^{0,8} \cdot 37,83^{0,4} = 255.$$

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{ср}} \overline{Nu}_R}{R_{\text{бл.эфф}}} = \frac{0,0372 \cdot 255}{0,444} = 21,36 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Величина плотности теплового потока от паровоздушной среды к поверхности изделия  $q = \alpha (t_{\text{ср}} - t_{\text{поверхн}})$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Продолжительность подвода тепла к изделие массой  $m_{\text{м.сух}}$  и площадью наружной поверхности  $S_{\text{м}}$  для испарения из него влаги в количестве  $x_{\text{вл.уд}}$  в общем случае может быть определена из следующего соотношения для закона сохранения энергии

$$m_{\text{м.сух}} Q_{\text{суш.м}} = q S_{\text{м}} \tau = \alpha (t_{\text{ср}} - t_{\text{поверхн}}) S_{\text{м}} \tau.$$

Для сушки блоков с массой  $m_{\text{бл.сух}} = 38,91 \text{ кг}$  и площадью поверхности  $S_{\text{бл}} = 1,185 \text{ м}^2$  необхо-

димо  $Q_{\text{суш.м}} = 679,74 \text{ кДж/(кг скелета сухого материала)}$ , откуда эта длительность равна

$$\tau = \frac{m_{\text{бл.сух}} Q_{\text{суш}}}{\alpha (t_{\text{ср}} - t_{\text{поверхн}}) S_{\text{бл}}} = \frac{38,91 \cdot 679 \cdot 740}{21,36 \cdot (165 - 110) \cdot 1,185} = 18 \,994 \text{ с} = 5,28 \text{ ч}.$$

Интенсивность массообмена в потоке сушильного агента описывается соотношением диффузионного критерия Нуссельта

$$\overline{Nu}_{\text{д.Р}} = 2 \cdot 10^{-4} Re_R^{0,8} \left(\frac{p_{\text{п.стенки}} - p_{\text{п.потока}}}{P_{\text{суш}}}\right)^{-0,5} \left(\frac{p_{\text{п.потока}}}{P_{\text{суш}}}\right)^{-0,5},$$

где  $p_{\text{п.стенки}}$ , Па – парциальное давление водяных паров у поверхности стенки изделия. Принимается, что  $p_{\text{п.стенки}} = p_{\text{п.нас}}(t_{\text{поверхн}}) = p_{\text{п.насыщ}}(110 \text{ }^\circ\text{C})$ ;

$p_{\text{п.потока}}$ , Па – парциальное давление водяных паров в ядре потока;  $P_{\text{суш}}$ , Па – полное давление паровоздушной среды в сушилке.

По данным [17] при  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  на стенке,  $\varphi = 4,75\%$ ;  $0,1 \text{ МПа}$ . Из чего находим, что

$$p_{\text{п.стенки}} = p_{\text{п.насыщ}} = 143 \,383,6 \text{ Па};$$

$$p_{\text{п.в}} = 6811 \text{ Па};$$

$$x_{\text{п}} = 0,045 \text{ кг/кг};$$

$$i = 233,4 \text{ кДж/кг};$$

средняя плотность влажного воздуха  $\rho_{\text{ср}} = 0,888 \text{ кг/м}^3$ ;

$$\rho_{\text{п.ср}} = \sigma_n \rho_{\text{ср}} = 0,0681 \cdot 0,888 = 0,0605 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{насыщ}} = \rho_{\text{п.ср}} / \varphi = 0,0605 / 0,0475 = 1,273 \text{ кг/м}^3.$$

При  $165 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 0,97\%$ ;  $0,1 \text{ МПа}$  находим, что

$$p_{\text{п.насыщ}} = 700 \,978 \text{ Па};$$

$$p_{\text{п.в}} = 6799 \text{ Па};$$

$$x_{\text{п}} = 0,045 \text{ кг/кг};$$

$$i = 293 \text{ кДж/кг};$$

средняя плотность влажного воздуха  $\rho_{\text{ср}} = 0,7763 \text{ кг/м}^3$ ;

$$\rho_{\text{п.ср}} = \sigma_n \rho_{\text{ср}} = 0,0681 \cdot 0,7763 = 0,0529 \text{ кг/м}^3,$$

$$\overline{Nu}_{\text{д.Р}} = 2 \cdot 10^{-4} Re_R^{0,8} \left(\frac{p_{\text{п.стенки}} - p_{\text{п.потока}}}{P_{\text{суш}}}\right)^{-0,5} \left(\frac{p_{\text{п.потока}}}{P_{\text{суш}}}\right)^{-0,5} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 140226^{0,8} \cdot \left(\frac{143383,6 - 6799}{100 \,000}\right)^{-0,5} \cdot \left(\frac{6799}{100 \,000}\right)^{-0,5} = 8,601.$$

Значение массообменного безразмерного критерия (диффузионное число Нуссельта):

$$\beta = \frac{D \overline{Nu}_{\text{д.Р}}}{R_{\text{бл.эфф}}} = \frac{4,02 \cdot 10^{-5} \cdot 8,601}{0,44} = 7,79 \cdot 10^{-4} \text{ м/с},$$

где  $\beta$ , м/с – коэффициент массообмена между поверхностью и потоком паровоздушной среды, отнесенный к разности плотностей пара.

Коэффициент диффузии пара в паровоздушной среде, рассчитываемый по [22] при барометрическом давлении  $P_0 = 101325$  Па, будет равен

$$D = D_{t_0} \left( \frac{273 + t}{273} \right)^{1,8} \frac{P_0}{P_{\text{суш}}} =$$

$$= 2,16 \cdot 10^{-5} \left( \frac{273 + 110}{273} \right)^{1,8} \frac{101325}{100\,000} =$$

$$4,02 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Величина плотности массового потока пара от поверхности изделия к потоку паровоздушной среды

$$j = \beta(\rho_{\text{п.стенки}} - \rho_{\text{п.ср}}) =$$

$$= 7,79 \cdot 10^{-4} (1,273 - 0,0529) = 9,50 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}),$$

где  $\rho_{\text{п.стенки}} = \rho_{\text{п.насыщ}}(t_{\text{поверхн}})$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$  – плотность пара у поверхности стенки изделия;

$\rho_{\text{п.ср}}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$  – плотность пара в ядре потока при  $t_{\text{ср}}$ .

Длительность периода постоянной скорости сушки  $\tau_{\text{вл}}$  для изделий с массой удаляемой влаги  $m_{\text{вл.уд}}$  и площадью наружной поверхности  $S_{\text{м}}$  в общем случае может быть определена из следующего соотношения для закона сохранения вещества

$$m_{\text{вл.уд}} = j S_{\text{м}} \tau = \beta(\rho_{\text{п.стенки}} - \rho_{\text{п.ср}}) S_{\text{м}} \tau_{\text{вл}}.$$

Для изделий в виде блоков с массой  $m_{\text{бл.сух}} = 38,91$  кг, массой удаляемой влаги  $m_{\text{вл.уд.бл}} = 15,65$  кг и площадью поверхности  $S_{\text{бл}} = 1,185 \text{ м}^2$

$$\tau_{\text{вл}} = \frac{m_{\text{вл.уд.бл}}}{\beta(\rho_{\text{п.стенки}} - \rho_{\text{п.ср}}) S_{\text{м}}} = \frac{15,65}{9,50 \cdot 10^{-4} \cdot 1,185} =$$

$$= 13895 \text{ с} = 3,86 \text{ ч}.$$

Следует учитывать, что общая продолжительность сушки несколько больше длительности периода постоянной скорости.

### Экономические показатели

Примем, что объем годового выпуска изделий из ячеистого бетона составляет, например,  $V_{\text{бл.год}} = 400000 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Удельная масса влаги, удаляемая из единицы объема типового изделия массой  $m_{\text{бл.сух}} = 38,91$  кг с плотностью  $\rho_{\text{м.сух}} = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$  при его последующем высушивании от начальной влажности 35% до конечной 12%,

$$m_{\text{вл.уд.удельная}} = m_{\text{вл.уд.бл}}/V_{\text{бл}} =$$

$$= 15,65/0,0778125 = 201,1 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Годовое количество удаляемой влаги (примем, как расчетное) будет составлять

$$m_{\text{вл.уд.год}} = m_{\text{вл.уд.удельная}} V_{\text{бл.год}} = 201,1 \cdot 400000 =$$

$$= 80\,440\,000 \text{ кг}/\text{год} = 80\,440 \text{ т}/\text{год}.$$

Для сравнения оценим энергозатраты на термовлажностную обработку изделий паром в автоклаве.

Расход пара на один цикл в одном автоклаве составляет  $M_{\text{п.цикл}} = 11,5$  т/автоклав. При объеме загрузки  $V_{\text{м.авт}} = 90 \text{ м}^3$  блоков в автоклав удельный расход пара будет

$$M_{\text{п.уд}} = M_{\text{п.цикл}}/V_{\text{м.авт}} = 11,5/90 =$$

$$= 0,127778 \text{ т}/\text{м}^3 \text{ блоков},$$

а соответственный годовой расход пара

$$M_{\text{п.год}} = M_{\text{п.уд}} V_{\text{бл.год}} = 0,127778 \cdot 400000 =$$

$$= 51\,111 \text{ т пара}/\text{год}.$$

Годовое потребление тепловой энергии (от пара) будет

$$51111 \text{ т пара}/\text{год} \cdot 2786 \text{ МДж}/\text{т пара (энтальпия)} =$$

$$= 142\,395\,246 \text{ МДж}/\text{год} =$$

$$= 39\,554 \text{ МВт} \cdot \text{час}/\text{год} =$$

$$= 34\,010 \text{ Гкал}/\text{год} = 4859 \text{ т у. т.}/\text{год}.$$

Удельное потребление тепловой энергии (от пара)

$$142\,395\,246 \text{ МДж}/\text{год}/400000 \text{ м}^3/\text{год} =$$

$$= 356 \text{ МДж}/\text{м}^3 = 0,0989 \text{ МВт} \cdot \text{час}/\text{м}^3 =$$

$$= 0,0850 \text{ Гкал}/\text{м}^3 = 0,0121 \text{ т у. т.}/\text{м}^3.$$

Годовые энергозатраты при сушке изделий воздухом составят

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{уд.вл}} m_{\text{вл.уд.год}} = 3074,76 \text{ кДж}/\text{кг влаги} \cdot$$

$$\cdot 80\,440\,000 \text{ кг}/\text{год} = 247\,333\,694 \text{ МДж}/\text{год} =$$

$$= 68\,704 \text{ МВт} \cdot \text{час}/\text{год} = 59\,075 \text{ Гкал}/\text{год} =$$

$$= 8\,439,2 \text{ т у. т.}/\text{год}.$$

Удельное потребление тепловой энергии (на нагрев воздуха для сушки)

$$247\,333\,694 \text{ МДж}/\text{год}/400000 \text{ м}^3/\text{год} =$$

$$= 618 \text{ МДж}/\text{м}^3 = 0,172 \text{ МВт} \cdot \text{час}/\text{м}^3 =$$

$$= 0,148 \text{ Гкал}/\text{м}^3 = 0,0211 \text{ т у. т.}/\text{м}^3.$$

В денежном выражении на типовом производстве доля стоимости тепловой энергии в себестоимости единицы продукции ( $1 \text{ м}^3$ ) составляет **примерно 4,38%** при ее общем расходе в размере  $0,121 \text{ Гкал}/\text{м}^3$ .

При увеличении расхода тепловой энергии на сушку изделий воздухом на  $0,148 \text{ Гкал}/\text{м}^3$  себестоимость единицы продукции **увеличивается на 5,07%**.

При осуществлении энергосберегающих мероприятий, направленных на нагрев воздуха, например при утилизации для этой цели вторичного тепла от иных энергопотребителей, величина себестоимости может быть значительно уменьшена.

## Выводы

1. Сушка блоков из ячеистого бетона горячим воздухом, получаемым в теплогенераторе в автоклаве возможна. Себестоимость высушенных блоков увеличится не более, чем на 5%.

2. При создании надлежащего энергетического узла, вырабатывающего тепловую энергию совокупно с электрической в когенерационном цикле, позволит снизить себестоимость продукции за счет генерации собственной дешевой электроэнергии.

3. Применение высушенных в заводских условиях газосиликатных блоков будет способствовать повышению качества строительных работ.

4. Затраты на сушку газосиликатных блоков будут несопоставимо малы по сравнению с затратами на ликвидацию негативных последствий при использовании влажных блоков в жилищном строительстве и повышению расхода тепловой энергии на отопление этих объектов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сажнев, Н.П., Гончарик, В.Н., Гарнашевич, Г.С., Соколовский, Л.В. / Производство ячеистобетонных изделий: теория и практика. – Мн.: Стринко, 1999. – 284 с.: ил.

2. Сажнев, Н.П. Опыт производства и применения ячеистобетонных изделий автоклавного твердения в Республике Беларусь // Опыт производства и применения ячеистобетонных изделий автоклавного твердения: материалы 7-й Международной научно-практической конференции, Брест, Малорита, 22-24 мая 2012 г. / редкол. Н.П. Сажнев (отв. ред.) [и др.]. – Мн.: Стринко, 2012. – 120 с.: ил.

3. Гарнашевич, Г.С., Губская, А.Л., Сажнев, Н.П., Лоско, А.В., Лоско, В.В., Власенко, Ж.Н. Ячеистый бетон автоклавного твердения: теплофизические и эксплуатационные свойства. Проблемы и решения // Опыт производства и применения ячеистобетонных изделий автоклавного твердения: материалы 9-й Международной научно-практической конференции, Минск, 18-19 мая 2016 г. / редкол. Н.П. Сажнев (отв. ред.) [и др.]. – Мн.: Колорград, 2016. – 112 с.: ил.

4. Рыхленок, Ю.А., Крутилин, А.Б. Особенности эксплуатации и причины снижения долговечности наружных стен из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения // Проблемы современного бетона и железобетона. Сборник научных трудов. Выпуск 4. – Мн.: «Колорград», 2012.

5. Крутилин, А.Б. Некоторые результаты экспериментальных исследований сорбционного увлажнения ячеистых бетонов низких плотностей. // Опыт производства и применения ячеистобетонных изделий автоклавного твердения: материалы 9-й Международной научно-практической конференции, Минск, 18-19 мая 2016 г. / редкол. Н.П. Сажнев (отв. ред.) [и др.]. – Мн.: Колорград, 2016. – 112 с.: ил.

6. Лешкевич, В.В., Крутилин, А.Б., Протасевич, А.М. Тепло-влажперенос в ограждениях из ячеистого бетона со штукатурными слоями полимерно-цементными составами. // Проблемы современного бетона и железобетона. Сборник научных трудов. Выпуск 9. – Мн.: «Колорград», 2017.

7. Лыков, А.В. Теория сушки. Изд.-е 2-е, перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1968. – 472 с. с илл.

8. Акулич, П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Мн.: Беларус. навука, 2010. – 443 с.

9. Плановский, А.Н., Рамм, В.М., Каган, С.В. / Процессы и аппараты химической технологии. Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Госуд. научно-техн. изд-во химич. литературы, 1962. – 847 с. (с. 738).

10. Лебедев, П.Д. / Расчет и проектирование сушильных установок. (Учеб. для высш. техн. учеб. заведений). – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 320 с. с черт.

11. Инструкция по применению газобетонных блоков ОАО «Березовский КСИ». Сайт ОАО «Березовский КСИ»: [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.berezaksi.by](http://www.berezaksi.by). – Дата доступа: 23.04.2018.

12. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб.: Издательство НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с. с ил.

13. Михайлов, Ю.А. Сушка перегретым паром. – М.: «Энергия», 1967. – 200 с.

14. Перегретый пар / Сайт компании Spirax Sarco: [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.spiraxsarco.com/global/ru/Resources/Pages/steam-tables/superheated-steam.aspx>. – Дата доступа: 23.04.2018.

15. Кречетов, И.В. Сушка и защита древесины: учебник для техникумов. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 328 с.

16. Исаченко, В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1975. – 448 с. с ил.

17. Физические свойства влажного воздуха / Информационный инженерный портал: [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://helpeng.ru/programs/properties\\_dump\\_air.php](http://helpeng.ru/programs/properties_dump_air.php). – Дата доступа: 23.04.2018.

18. I-d диаграмма влажного воздуха: [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://iddiagram.ru/help.php>. – Дата доступа: 23.04.2018.

19. Государственная служба стандартных справочных данных (ГСССД 125-88). Таблицы стандартных справочных данных. Воздух влажный. Теплофизические свойства в диапазоне 5...95 °С при давлении 99325 Па.: [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200080697> – Дата доступа: 23.04.2018.

20. Буянов, О.Н., Архипова, Л.М. / Таблицы. Вода и водяной пар. Справочные материалы для практических и лабораторных занятий. – Кемерово, 2005. – 65 с.: e-lib.kemntipp.ru/uploads/18/tht080.doc

21. Теплофизические свойства водяного пара: плотность, теплоемкость, теплопроводность. – Сайт Thermalinfo.ru: [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/neorganicheskie-gazy/teplofizicheskie-svoystva-teploprovodnost-vodyanogo-para-na-linii-nasyshheniya> – Дата доступа: 23.04.2018.

22. Андреев, Е.И. / Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 192 с., ил.: [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://mash-xxl.info/page/047012187214180198020020164017227214109137251033/> – Дата доступа: 23.04.2018.