

удк

С.М. УСОВ, инженер-электрофизик (usov\_sm@mail.ru), ЗАО «НЭВЗ-КЕРАМИКС»;  
В.Г. ГОРШКОВ, инженер-механик (teplonasos@yandex.ru), ООО «ОКБ Теплосибмаш»  
(Новосибирск)

## Энергосберегающая технологическая линия для производства кирпича – источник тепловой энергии

Важнейшими задачами развития современного производства являются энергоэффективность и энергосбережение, экологическая безопасность, улучшение условий и повышение производительности труда, качества продукции. Повышение энергоэффективности и энергосбережения в производстве кирпича становится еще более актуальным в процессе вступления России в ВТО, позволяя повысить конкурентоспособность продукции.

Обилие задач обуславливает необходимость их комплексного решения. В данной работе представлен тепловой баланс технологической линии производства пустотелого кирпича годовой производительностью 30 млн шт. [1], а также показана эффективность глубокой утилизации (с использованием теплоты конденсации водяных паров) тепловой энергии отходящих газов для ее вторичного использования.

Пароглиняная смесь из установки сушки глины, описанной в [2], с температурой 100°C, пройдя измельчение и активацию, поступает в пресс специальной конструкции, где прессуется без перемешивания с воздухом. В процессе прессования пар конденсируется на поверхности частиц шихты. Сырец от пресса по теплоизолированным транспортерам поступает в конвективную зону сушки рекуперативной объемной сушильно-обжиговой печи (РОСО).

Сырец, прогретый по всему объему, обладает высокой способностью перемещения влаги к поверхности [3, 4]. Расчет длительности сушки сырца произведен по методике, описанной в [5, 6], проверенной в промышленных и лабораторных сушилках. Расчет длительности

термообработки изделий в зоне обжига произведен согласно методике, описанной в [7], и составляет 200 мин.

Печь с размерами корпуса 9×9 м (рис. 1) представляет собой объем, заполненный встречными потоками изделий, обменивающимися тепловой энергией. При этом происходит сушка и обжиг кирпича-сырца, а также остывание обожженного кирпича. Объем печи обеспечивает время прохождения сырца через конвективную зону сушки 115 мин, время прохождения изделий через зону лучистого теплообмена 200 мин, при производительности 30 млн шт. кирпича пустотелого в год.

Транспортеры печи выполнены в виде каркасов под изделия, соединенных между собой в замкнутые цепи, свисающие вниз. Загрузка и выгрузка производится в верхних каркасах транспортеров путем замещения обожженного кирпича сырцом. После загрузки или одновременно с загрузкой всех верхних каркасов происходит перемещение каркасов на один шаг. Сырец, продвигаясь вниз, проходит между воздушными потоками на боковых стенках, где происходит его сушка в горячих парогазовых потоках. Затем в зоне лучистого теплообмена изделия нагреваются до температуры спекания, после чего, поднимаясь вверх, отдают тепло встречным потокам нагреваемого сырца в зоне обжига посредством излучения, а в зоне сушки посредством конвекции.

Печь является самой энергетически насыщенной установкой, в которой объединены все тепловые потоки технологической линии. Поэтому тепловой баланс печи равен тепловому балансу технологической линии в целом. Установка сушки глины также включена в один из

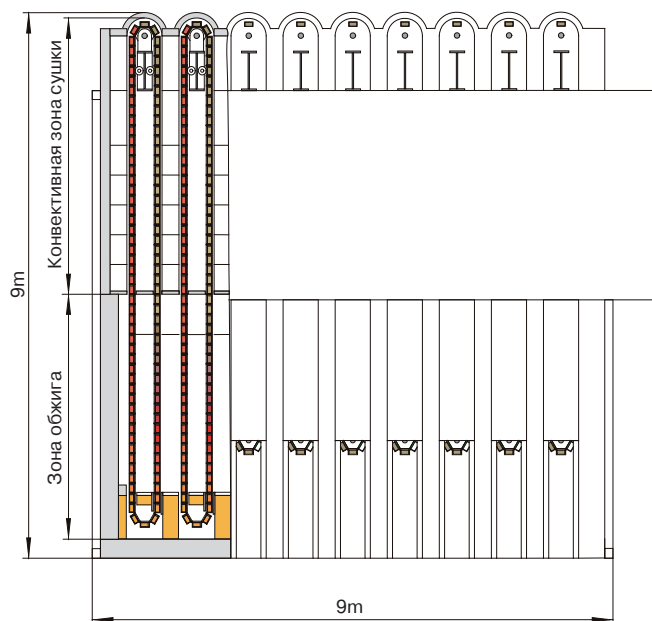


Рис. 1. Эскиз печи РОСО.

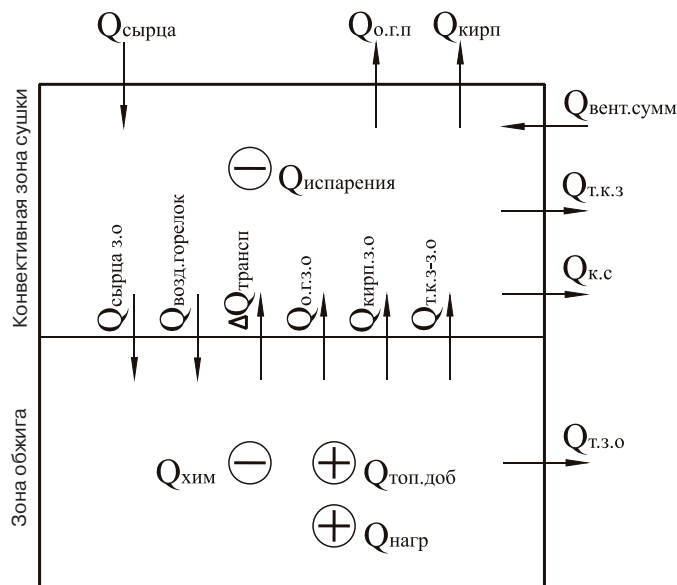


Рис. 2. Тепловые потоки объемной печи

<sup>1</sup> Графики сушки и обжига для глин разных месторождений необходимо проверять экспериментально.

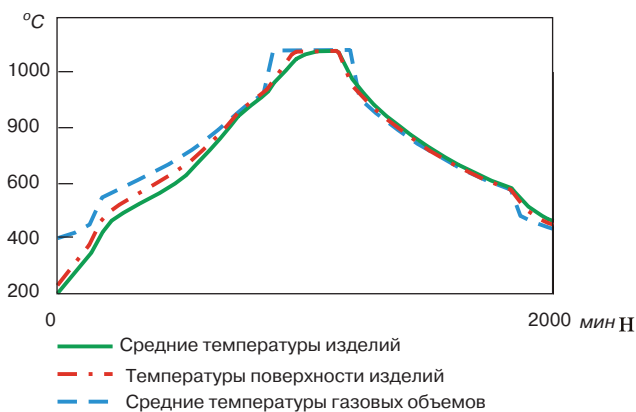


Рис. 3. Расчетные температуры изделий и смежных с ними газовых объемов в зоне обжига

контуров рекуперации (возвращения) тепловой энергии печи.

Загрузка в печь горячего сырца позволяет экономить тепловую энергию и получить высокую скорость удаления влаги из сырца с самого начала процесса сушки. При этом в зоне сушки печи РОСО появляется существенный избыток тепловой энергии. Это может приводить к неоправданным потерям тепловой энергии, разрушению сырца в процессе сушки, ухудшению условий труда вследствие высокой температуры готовых изделий. При излишках тепловой энергии в зоне сушки наиболее целесообразными способами снижения величины теплового баланса конвективной зоны являются направление тепловой энергии из конвективной зоны печи в установку сушки глины и нагрев воздуха для горелок.

Тепловая энергия для нагрева теплоносителя устройства сушки и воздуха для газовых горелок отбирается при помощи теплообменников из нижних ярусов конвективной зоны. Теплоноситель, поступающий из установки сушки, нагревается от 115,5 до 120°C. При этом из печи забирается 594 кДж/с тепловой энергии [3]. Воздух перед поступлением в горелки нагревается до 200°C, из конвективной зоны в зону обжига возвращается 138 кДж/с.

Сырце в нижнем ярусе зоны сушки нагревается до средней температуры  $t_{\text{сырца з.о.}} = 200^\circ\text{C}$ .

Задав среднюю температуру готового кирпича и отходящих газов  $t_{\text{кирп.}} = t_{\text{о.г.п.}} = 100^\circ\text{C}$ , мы имеем все исходные данные для расчета теплового баланса конвективной зоны печи.

На рис. 2. показаны направления энергетических потоков печи.

Тепловой поток через теплоизоляцию конвективной зоны рассчитан для материала с теплопроводностью  $\lambda_{\text{т.к.з.}} = 0,04 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Тепловой поток от действия вентиляторов рассчитан для суммарной полезной мощности  $P_{\text{вент.сум.}} = 60 \text{ кВт}$ .

Масса пустотелого абсолютно сухого сырца  $G_{\text{сырца а.с.}} = 3,2 \text{ кг}$ ; масса кирпича обожженного  $G_{\text{кирп.}} = 2,8 \text{ кг}$ ; разница соответствует потере массы при прокаливании ППП = 12,5%, содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в глине  $A = 12,5\%$  [8]. Начальная масса сырца  $G_{\text{сырца}} (8,5\%) = 3,5 \text{ кг}$ . Начальная потеря массы сырца определяется испарением влаги при сушке. Потеря массы при прокаливании и затраты  $Q_{\text{хим.}}$  определяются дегидратацией глинистых минералов.

В тепловом потоке с отходящими газами из зоны обжига  $Q_{\text{о.г.з.о.}}$  учтены потоки газов от горения топлива горелок и топлива запрессованного в сырце, дегидратации глинистых минералов в зоне обжига, а в тепловом потоке отходящих газов печи  $Q_{\text{о.г.п.}}$  еще и поток пара от сушки сырца в конвективной зоне. Для расчета состава продуктов горения использована методика, представленная в [9].

При расчете тепла, вносимого транспортерами  $\Delta Q_{\text{трансп.}}$  температура каркасов принималась равной температуре поверхности изделий. Масса каркасов транспортеров 1 кг/кирпич.

Средняя температура кирпича, поступающего из зоны обжига в зону сушки  $t_{\text{сырца з.о.}}$ , температура поверхности изделий, средняя температура отходящих газов зоны обжига  $t_{\text{о.г.з.о.}}$  определяются из графиков расчета теплообмена в зоне обжига, показанного на рис. 3, выполненного согласно методике, описанной в [7].

Крайние левые и крайние правые части графиков соответствуют температуре верхних изделий и газовых объемов зоны обжига. Крайней правой части средней температуры соответствуют изделия с температурой

Таблица 1

Статьи теплового баланса	Обозначение	Значение, кДж/с
Тепло, вносимое кирпичом из зоны обжига в зону сушки	$Q_{\text{кирп.з.о}}$	1132
Тепло, вносимое газами из зоны обжига в зону сушки	$Q_{\text{о.г.з.о.}}$	970
Тепло, вносимое транспортерами из зоны обжига в зону сушки	$\Delta Q_{\text{трансп.}}$	149
Тепло, вносимое сырцом от пресса в зону сушки	$Q_{\text{сырца}}$	420
Разогрев газов вентиляторами	$Q_{\text{вент.сум.}}$	60
Поток тепла в конвективную зону из зоны лучистого теплообмена через разделяющий теплоизолятор	$Q_{\text{т.к.з-з.о.}}$	2
Затраты тепла на испарение влаги из сырца в зоне сушки печи	$Q_{\text{исп.з.с.}}$	-677
Затраты тепла на испарение корректирующей воды в зоне сушки	$Q_{\text{исп.кор.воды}}$	-156
Тепло, уносимое кирпичом из зоны сушки	$Q_{\text{кирп.}}$	-234
Тепло, уносимое отходящими газами печи из зоны сушки	$Q_{\text{о.г.п.}}$	-286
Тепло, уносимое сырцом из зоны сушки в зону обжига	$Q_{\text{сырца.з.о.}}$	-538
Тепло, отбираемое из зоны сушки печи для камеры сушки глины	$Q_{\text{к.с.}}$	-594
Тепло, отбираемое из зоны сушки для нагрева воздуха для горелок	$Q_{\text{возд.горелок}}$	-242
Потери тепла через теплоизоляцию конвективной зоны	$Q_{\text{т.к.з.}}$	-15
Энергетический баланс конвективной зоны (зоны сушки)	$\Delta Q_{\text{к.з.}}$	-9

<sup>2</sup> При незначительном содержании карбонатов в глине.

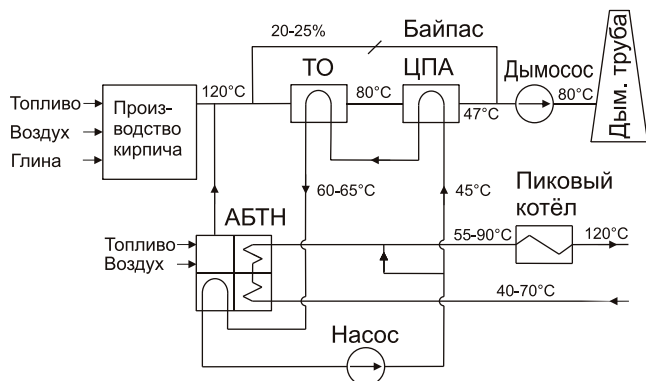


Рис. 4. Принципиальная схема глубокой утилизации теплоты отходящих газов при помощи теплового насоса

$t_{\text{кирп. з.о.}} = 460^{\circ}\text{C}$ , переходящие из зоны обжига в зону сушки. Температуру  $t_{\text{о.г.з.о.}} = 420^{\circ}\text{C}$  находят как среднее арифметическое температуры верхних газовых объемов, т. е. левой и правой частей графика средней температуры газовых объемов.

В табл. 1 сведены значения тепловых потоков конвективной зоны с учетом их знаков в соответствии с рис. 2. Сложив эти значения, получаем величину теплового баланса конвективной зоны.

Тепловой баланс конвективной зоны  $\Delta Q_{\text{к.з.}}$  является поправкой к тепловому балансу печи, вычисленному из исходных данных, и является величиной управляемой. Тепловой баланс конвективной зоны сравнительно мал по отношению к основным тепловым потокам. Это достигнуто, дополнительно к отбору тепловой энергии, подачей в нижний воздухоподогреватель конвективной зоны корректирующей воды в количестве 0,06 кг/с для испарения. При уменьшении  $\Delta Q_{\text{к.з.}}$  за счет перехода тепловой энергии в скрытую теплоту водяного пара происходит снижение температуры отходящих газов, а следовательно, и готовых изделий, при этом смягчается начальный этап сушки сырца. При отрицательном  $\Delta Q_{\text{к.з.}}$  температура отходящих газов становится меньше  $100^{\circ}\text{C}$ .

Суммарные затраты тепловой энергии в технологической линии за вычетом теплоты, создаваемой вентиляторами конвективной зоны, восполняются за счет нагревателей печи и за счет выгорания топливной добавки, запрессованной в сырце.

При расчете теплового баланса печи использованы значения: средняя теплопроводность теплоизолятора зоны обжига  $\lambda_{\text{т.з.о.}} = 0,17 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ ; коэффициент избытка воздуха для горения топлива  $\alpha = 1,3$ .

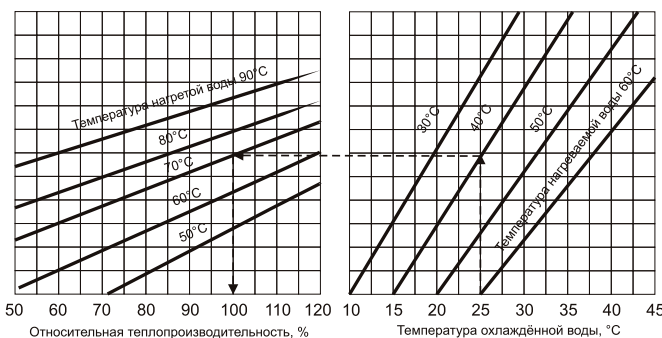


Рис. 5. Зависимость относительной теплопроизводительности абсорбционного бромисто-литиевого теплового насоса от параметров охлажденной, нагреваемой и нагретой воды

В табл. 2 сведены значения внешних тепловых потоков печи с учетом их знаков в соответствии с рис. 2. Сложив эти значения, получаем величину теплового баланса печи, т. е. технологической линии в целом.

При использовании в качестве топлива в туннельной печи природного газа и сушке сырца в сушиле смесью горячего воздуха и дымовых газов для линии пластического формования расход тепла составляет 6155 кДж/шт. пустотелого кирпича [8].

Для рассматриваемой энергоэффективной линии расход тепла составляет 2453 кДж/с или 2453 кДж/шт. пустотелого кирпича, что существенно ниже вышеприведенных примеров в [8].

Особенностью данной линии является высокое содержание паров воды в отходящих газах печи.

Включение в производственный комплекс теплоутилизационного оборудования (рис. 4): поверхностного теплообменника ТО для отбора физической теплоты сбросных продуктов сжигания топлива (дымовых газов); контактного циклонно-пенного теплообменника (ЦПА) для глубокой утилизации теплоты дымовых газов, включая теплоту конденсации водяных паров [10], и экологически безопасного бромисто-литиевого теплового насоса с огневым обогревом АБТН-Т [11, 12] позволяет очистить дымовые газы и получить дешевую тепловую энергию для теплообеспечения кирпичного завода и соответствующей инфраструктуры.

Глубокая утилизация теплоты отходящих газов - это процесс возвращения тепловой энергии, включая теплоту конденсации водяных паров, для повторного использования. Влажные дымовые газы поступают в по-

Таблица 2

Наименование статей	Обозначение	Значение, кДж/с
Потери тепла через теплоизоляцию зоны обжига	$Q_{\text{т.з.о.}}$	83
Потери тепла через теплоизоляцию конвективной зоны	$Q_{\text{т.к.з.}}$	15
Затраты тепла на испарение влаги в зоне сушки печи	$Q_{\text{исп.з.с.}}$	833
Затраты тепла на химические реакции в зоне обжига печи	$Q_{\text{хим.}}$	837
Тепло, уносимое кирпичом из зоны сушки	$Q_{\text{кирп.}}$	234
Тепло, уносимое отходящими газами печи из зоны сушки	$Q_{\text{о.г.п.}}$	286
Тепло, отбираемое из зоны сушки печи для камеры сушки глины	$Q_{\text{к.с.}}$	594
Тепло, вносимое сырцом в зону сушки	$Q_{\text{сырца}}$	-420
Энергетический баланс конвективной зоны (зоны сушки)	$\Delta Q_{\text{к.з.}}$	-9
Суммарные затраты тепловой энергии в технологической линии	$Q_{\text{линии}}$	2453
Теплота, утилизируемая из уходящих газов (парогазовая смесь – вторичный энергоресурс)	$Q_{\text{утилизации}}$	2077
Невозвратные потери тепла в технологической линии	$Q_{\text{потерь}}$	376

верхностный теплообменник ТО с оребренными теплообменными трубками со стороны дымовых газов и после охлаждения направляются в циклонно-пенный аппарат, где происходит их очистка, охлаждение, конденсация из них водяных паров и нагрев промежуточного теплоносителя (воды). Затем для повышения температуры промежуточный теплоноситель поступает в поверхностный теплообменник ТО, в котором происходит противоточное движение теплоносителя и дымовых газов. Часть промежуточного теплоносителя, равная количеству конденсата, образующегося при конденсации водяных паров из отходящих газов, после деаэрации (на схеме не показана) направляется на подпитку теплосети. Перед поступлением в теплообменник ТО отходящие газы печи смешиваются с отходящими газами из греющей топki теплового насоса. Часть горячих газов (20–25%) проходит на всасывающую сторону дымососа через байпас, минуя ТО и ЦПА, смешиваются с охлажденными и осушенными газами из ЦПА и подогревает их. Температура и влажность смеси газов позволяют исключить конденсацию влаги на стенках дымовой трубы.

Без применения теплового насоса конденсация водяного пара из отходящих газов начинается при температуре около 80°C и ниже, т. е. при противоточном движении относительно газов теплоноситель (вода) нагревается в ТО до 60–65°C.

При низкой температуре наружного воздуха температура обратной сетевой воды после системы отопления достигает 70°C. Поэтому при охлаждении отходящих газов сетевой водой конденсации водяных паров не происходит. Для эффективного отбора теплоты конденсации водяных паров отходящие газы должны быть охлаждены до температуры не выше 50–55°C. Следовательно, для эффективного отбора тепловой энергии от промежуточного теплоносителя и нагрева обратной сетевой воды необходим тепловой насос (рис. 4). При положительной температуре наружного воздуха в соответствии с отопительным температурным графиком в отопительную сеть подается вода с температурой 45–55°C. Поэтому, для нагрева до этой температуры промежуточный теплоноситель охлаждается тепловым насосом до температуры 25–30°C (рис. 5). При этом тепловая мощность теплового насоса около 120% от номинальной. При температуре наружного воздуха -28°C температура прямой сетевой воды должна быть 95°C, при этом промежуточный теплоноситель охлаждается до 55°C. Абсорбционный бромисто-литиевый тепловой насос АБТН-3000Т [13], выбранный для отвода 2077 кДж/с (кВт), обеспечивает нагрев сетевой воды отопления до 95°C при 100% тепловой мощности. Следовательно, в интервале температуры наружного воздуха +10 - -28°C тепловой насос полностью заменяет водогрейный котел.

Приведем пример. При температуре наружного воздуха -15°C согласно температурному графику отопления температура воды должна быть на подаче 79°C, на «обратке» - 60°C. Тепловой насос АБТН-3000Т, работая в этом тепловом режиме со 125% теплопроизводительностью, нагревает воду от 60 до 79°C, охлаждая промежуточный теплоноситель до 45°C. Соответственно отходящие газы охлаждаются в ЦПА до 47°C, что гораздо ниже температуры конденсации водяных паров.

При этом в испаритель теплового насоса от промежуточного теплоносителя поступает 2077 кДж/с. Для работы теплового насоса АБТН-3000Т в этом тепловом режиме затрачивается 4543 кДж/с энергии сжигания топлива. Эта энергия также поступает в систему теплоснабжения. В результате 2077 кДж/с + 4543 кДж/с = 6620 кДж/с, или 6620 кВт.

Для сравнения, водогрейный котел ДЕВ-10-14ГМ-0 (Е-10-1,4ГМ Бийского котельного завода) имеет тепловую мощность 6,9 МВт (КПД 92%) и потребляет при

этом 706 нм<sup>3</sup>/ч природного газа. Для получения 6,62 МВт тепловой энергии этот котел будет потреблять 677,35 нм<sup>3</sup>/ч. В АБТН-3000Т для получения такой же тепловой мощности затрачивается 465 нм<sup>3</sup>/ч газового топлива. Экономия топлива составляет 212,35 нм<sup>3</sup>/ч, или 31,35%. При меньших тепловых нагрузках экономия топлива будет выше и может достигнуть 43%.

При температуре наружного воздуха ниже -28°C возникает необходимость подогрева подаваемой воды выше 95°C. Этого можно достичь снижением тепловой мощности АБТН-3000Т. Для получения необходимой потребителю тепловой мощности и дальнейшего повышения температуры в этом случае последовательно с АБТН-3000Т включается пиковый котел-подогреватель сетевой воды.

Вывод. Данная технологическая линия не только решает важные задачи повышения энергоэффективности современного производства, но и помогает создать инфраструктуру предприятия.

#### Список литературы

1. *Усов С.М.* Способ изготовления кирпича полусухого прессования, технологическая линия для его производства и пресс для этой линии. А.с. № 2348590 РФ // Опул. 10.03.2009 Б.И. №7. С. 949.
2. *Усов С.М.* Основные параметры энергосберегающей установки для сушки глины // Строительные материалы. 2011. № 4. С. 25–27.
3. *Лыков А.В.* Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
4. *Роговой М.И.* Теплотехническое оборудование керамических заводов. М.: Стройиздат, 1983. 364 с.
5. *Зотов С.Н.* Исследование процессов скоростной сушки керамических изделий с целью создания методики инженерного расчета режимов сушки. Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. М.: Государственный научный институт стекла, 1977. 22 с.
6. *Зотов С.Н., Белопольский М.С.* Режимы сушки плиток, изготовленных методом полусухого прессования // Стекло и керамика. 1975. № 2.
7. *Усов С.М.* Методика расчета теплообмена в зоне обжига объемной печи // Строительные материалы. 2010. № 12. С. 41–43.
8. Инструкция по нормированию расхода топлива и электрической энергии при производстве кирпича, керамических камней и дренажных труб. М.: Министерство промышленности строительных материалов СССР. Государственный всесоюзный научно-исследовательский институт строительных материалов и конструкций ВНИИстром им.П.П.Будникова, 1979. 101 с.
9. Справочник по производству строительной керамики / Под. ред. М.О. Юшкевича Т.1. М.: Госстройиздат, 1961. 464 с.
10. *Богатых С.А.* Циклонно-пенные аппараты. Л.: Машиностроение, 1978. 224 с.
11. *Бараненко А.В., Тимофеевский Л.С., Долотов А.Г., Попов А.В.* Абсорбционные преобразователи теплоты. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, 2005. 338 с.
12. *Горшков В.Г.* Тепловые насосы. Аналитический обзор. // Справочник промышленного оборудования. Журнал для специалистов. 2004. №2. С. 47–80.
13. *Горшков В.Г., Мухин Д.Г.* Абсорбционные бромистолитиевые тепловые насосы и некоторые технологии их применения для утилизации сбросной теплоты. Тезисы докладов на конференции «Теплонасосные технологии в Украине. Состояние и перспективы внедрения», Киев, 23-25 мая 2012 г.