



А.А. Сеницын, О.В. Стратунов, Д.В. Басков
Вологодский государственный университет

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В работе рассмотрены основные результаты инструментального анализа энергетической и технологической эффективности производства, связанного с пропариванием железобетонных изделий в пропарочных камерах, работающих на насыщенном водяном паре.

Железобетонные конструкции, пропарочная камера, термовлажностная обработка, энергетическая эффективность, энергосберегающие мероприятия.

Заводы сборного железобетона относятся к числу предприятий, на которых санитарно-гигиенические условия труда и техника безопасности являются не только важным критерием для производительности труда – они обеспечивают сохранение здоровья каждого работника. В целях сокращения сроков распалубки железобетонных конструкций и сдачи их под нагрузку строители всегда стремились ускорить твердение бетона. Этот вопрос приобрел особую актуальность при изготовлении бетонных и железобетонных изделий в заводских условиях, так как предприятия заинтересованы в максимальном использовании производственных площадей и в сокращении сроков изготовления изделий.

В настоящее время наиболее распространенным способом ускорения твердения бетона, позволяющим получать в короткий срок изделия с отпускной прочностью, при которой их можно транспортировать на строительную площадку и монтировать в зданиях и сооружениях, является тепловая обработка. В заводских условиях она осуществляется путем пропаривания изделий в пропарочных камерах. При пропаривании сформованные изделия выдерживаются в камере в среде насыщенного пара до достижения бетоном заданной прочности. В пропарочной камере создается не только благоприятная температура для ускоренного твердения (в пределах 60–100 °С), но и оптимальная влажность среды, способствующая сохранению влаги в бетоне для его дальнейшего твердения и после окончания пропаривания.

Эффективность пропаривания, как и других видов тепловой обработки, определяется выбором рационального режима обработки в полном соответствии с принятым составом бетона, характеристикой составляющих материалов, особенностью цемента, размерами и конфигурацией изделия, начальной прочностью бетона к моменту обработки и др.

Для формирования структуры бетона особенно важными являются влажностные условия твердения, поэтому во многих случаях следует отдать предпочтение тепловлажностной обработке железобетонных изделий. При этом особо важной задачей является разработка технологической карты

обработки изделий при соблюдении техники безопасности и охраны труда.

Основная деятельность работников предприятий по производству железобетонных конструкций производится в строгом соответствии с требованиями Типовой инструкции по охране труда для формовщика железобетонных изделий и конструкций ТОИ Р-218-53-95, утвержденной Федеральным дорожным департаментом Минтранса РФ 5 декабря 1994 г., а также Правилами устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды (утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 11 июня 2003 г. № 90).

Заводы сборного железобетона относятся к числу предприятий, на которых санитарно-гигиенические условия труда и техника безопасности являются не только важным критерием для производительности труда – они обеспечивают сохранение здоровья каждого работника. В целях сокращения сроков распалубки железобетонных конструкций и сдачи их под нагрузку строители всегда стремились ускорить твердение бетона. Этот вопрос приобрел особую актуальность при изготовлении бетонных и железобетонных изделий в заводских условиях, так как предприятия заинтересованы в максимальном использовании производственных площадей и в сокращении сроков изготовления изделий.

В работе представлены основные результаты определения технологических условий тепловлажностной обработки железобетонных изделий в пропарочных камерах ямного типа предприятия СП «Вологодский завод ЖБК и СД» ОАО «РЖД».

Предприятие специализируется на производстве изделий из бетона для использования в строительстве несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений, а также временных вспомогательных сооружений.

В соответствии с договором на выполнение НИР № 20-12 от 30.11.18 г. «Исследование системы пароснабжения предприятия и разработка мероприятий по повышению ее эффективности», проведен энергоаудит комплекса производственных паропотребителей.

Для полигона тепловлажностной обработки железобетонных изделий проведено сопоставление фактических данных по расходу водяного пара на производство бетона, т/ч, с расчетными значениями, полученными с применением инженерной методики [1]. Данные методические указания по проведению конструктивного и теплотехнического расчета ямной пропарочной камеры применяются в научно-образовательном процессе НОЦ «Проблемы современной техносреды». С подобного типа работами НОЦ можно ознакомиться в предыдущих публикациях, например в [2, 3].

Среди применяемых в работе методов выделены следующие. Методы проведения анализа технического объекта основывались на принципах системного подхода. Под технической системой в настоящей работе понималась взаимосвязь основных ее элементов – источника, комплекса потребителей и распределительных связей. Структура технической системы определялась составом ее основных элементов и способами их связей. Множество всех возможных состояний системы зависело от числа элементов и определялось уровнями связей между ними, а также функциями технической системы. При этом метод декомпозиции применялся для решения сложной технической задачи анализа эффективности системы пароснабжения предприятия и сводился к расчленению системы на подсистемы и отдельные элементы с целью их детального исследования с последующим их синтезом. Метод моделирования имел в работе наибольшее значение в силу специфики конструирования технического объекта. В цикл моделирования включены этапы создания модели технического объекта, исследование модели, преобразование модели и переход от модели к техническому объекту. На этом этапе моделирования были установлены правила соответствия, выражающие соотношения между свойствами реального технического объекта и свойствами математических объектов. Подобные методы ярко отражены в работах [4, 5].

Наиболее важной составной частью данных научных исследований являются экспериментальные работы. Для их проведения разработана гипотеза, создана программа экспериментальных работ, обеспечены условия для осуществления процедуры экспериментальных работ, разработаны пути и приемы фиксирования хода и результатов эксперимента и подготовлены средства эксперимента, а также выполнена обработка и анализ экспериментальных данных.

Потери теплоты через ограждающие конструкции в кДж/период рассчитываются по общей формуле:

$$Q_{\text{п}} = 3,6 \cdot S_{\text{огр}} \cdot \alpha_{\text{н}} \cdot (t_{\text{нп}} - t_{\text{с}}) \cdot \tau, \quad (1)$$

где $S_{\text{огр}}$ – площадь наружной поверхности ограждающих конструкций камеры, м^2 ;

$\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи от наружных поверхностей, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

$t_{\text{нп}}$ – средняя температура наружной поверхности ограждающих конструкций, $^\circ\text{C}$;

$t_{\text{с}}$ – температура среды, $^\circ\text{C}$;

τ – время работы установки, ч.

Поскольку при работе камеры зачастую температуры наружной поверхности стен, дна и крышки неодинаковы, и, кроме того, эти температуры различны в периоды подъема и изотермической выдержки, то потери теплоты определяются по формуле:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{к}} + Q_{\text{с}}^{\text{в}} + Q_{\text{с}}^{\text{г}} + Q_{\text{д}}, \quad (2)$$

или

$$Q_{\text{п}} = 3,6 \cdot \{ S_{\text{к}} \cdot [\alpha_{\text{нп}}^{\text{кп}} \cdot (t_{\text{нп}}^{\text{кп}} - t_{\text{с}}) \cdot \tau_{\text{п}} + \alpha_{\text{нп}}^{\text{кв}} \cdot (t_{\text{нп}}^{\text{кв}} - t_{\text{с}}) \cdot \tau_{\text{в}}] + S_{\text{с}}^{\text{в}} \cdot [\alpha_{\text{нп}}^{\text{св}} \cdot (t_{\text{нп}}^{\text{св}} - t_{\text{с}}) \cdot \tau_{\text{п}} + \alpha_{\text{нп}}^{\text{сб}} \cdot (t_{\text{нп}}^{\text{сб}} - t_{\text{с}}) \cdot \tau_{\text{в}}] + S_{\text{с}}^{\text{г}} \cdot [k^{\text{пс}} \cdot (t_{\text{б}}^{\text{п}} - t_{\text{г}}) \cdot \tau_{\text{п}} + k^{\text{вс}} \cdot (t_{\text{б}} - t_{\text{г}}) \cdot \tau_{\text{в}}] + S_{\text{д}} \cdot [k^{\text{пл}} \cdot (t_{\text{б}}^{\text{п}} - t_{\text{г}}) \cdot \tau_{\text{п}} + k^{\text{вд}} \cdot (t_{\text{б}} - t_{\text{г}}) \cdot \tau_{\text{в}}] \}, \quad (3)$$

где $S_{\text{к}}$, $S_{\text{с}}^{\text{в}}$, $S_{\text{с}}^{\text{г}}$, $S_{\text{д}}$ – площади наружной поверхности крышки, стен выше и ниже нулевой отметки, дна соответственно, м^2 ;

$\alpha_{\text{нп}}^{\text{кп}}$, $\alpha_{\text{нп}}^{\text{св}}$ – коэффициенты теплоотдачи с поверхности крышки и стен, находящихся выше нулевой отметки в период подъема температуры $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

$$\alpha_{\text{нп}}^{\text{св}} = 9,8 + 0,07 \cdot (t_{\text{нп}}^{\text{св}} - t_{\text{с}}), \quad (4)$$

где $t_{\text{нп}}^{\text{св}}$ – средняя температура на поверхности стен в период подъема температуры;

$\alpha_{\text{нп}}^{\text{кв}}$, $\alpha_{\text{нп}}^{\text{сб}}$ – коэффициенты теплоотдачи с поверхности стен, находящихся выше нулевой отметки и крышки в период выдержки температуры, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Например, для стен:

$$t_{\text{нп}}^{\text{св}} = \frac{(t_{\text{нп}1} + t_{\text{нп}2})}{2}, \quad (5)$$

аналогично определяется $\alpha_{\text{нп}}^{\text{кп}}$.

$\alpha_{\text{нп}}^{\text{кв}}$, $\alpha_{\text{нп}}^{\text{сб}}$ – коэффициенты теплоотдачи с поверхности крышки и стен, находящихся выше нулевой отметки в период выдержки температуры, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Например, для стен:

$$\alpha_{\text{нп}}^{\text{сб}} = 9,8 + 0,07 \cdot (t_{\text{нп}}^{\text{сб}} - t_{\text{с}}), \quad (6)$$

где $t_{\text{нп}}^{\text{сб}}$ – температура на наружной поверхности стен в период изотермической выдержки, $^\circ\text{C}$ ($t_{\text{нп}}^{\text{сб}} = t_{\text{нп}2}$);

$t_{\text{с}}$, $t_{\text{г}}$ – температура среды в цехе и грунта, $^\circ\text{C}$;

$k^{\text{пс}}$, $k^{\text{пл}}$ – коэффициенты теплопередачи от внутреннего пространства камеры в грунт в период подъема температуры, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Теплота, выделяемая цементом в процессе термовлажностной обработки, $\text{кДж}/\text{кг}$, определяется по формуле:

$$Q_{\text{эц}} = 1,85 \cdot Q_{\text{ц}28} \cdot (В/Ц)^{0,44} \cdot (1 - \vartheta), \quad (7)$$

где $Q_{\text{ц}28}$ – тепловыделение цемента при двадцативосьмидневном твердении в нормальных условиях, $\text{кДж}/\text{кг}$;

$В$ – расход воды на 1 м^3 бетона, кг ;

$Ц$ – масса цемента в 1 м^3 бетона, кг ;

ϑ – величина, зависящая от градусо-часов (n) твердения бетона.

Если количество градусо-часов (n) не превышает 375, то $\vartheta = e^{-0,0015n}$ и принимает вид:

$$Q_{\text{эц}} = 1,85 \cdot Q_{\text{ц}28} \cdot (В/Ц)^{0,44} \cdot (1 - e^{-0,0015n}), \quad (8)$$

а если $375 < n < 2000$, то $\vartheta = 0,666 \cdot e^{-0,0004n}$, принимает вид:

$$Q_{\text{эц}} = 1,85 \cdot Q_{\text{ц}28} \cdot (В/Ц)^{0,44} \cdot (1 - 0,666 \cdot e^{-0,0004n}). \quad (9)$$

Инженерный расчет позволил определить расход тепловой энергии на тепловую обработку материалов

и изделий, в том числе расход пара по загрузке бетона и габаритным размерам форм для изготовления бетонных и железобетонных изделий, а также внутренним размерам ямной пропарочной камеры и ее заглубления в грунт с учетом конструктивных особенностей стен, днища и крышки камеры.

Диаграмма сопоставления фактических удельных расходов пара на производство бетона, т/ч, с расчетными данными по методике [1] представлена на рисунке 1.

В соответствии с данным рисунка 1 делается вывод об адекватности математической модели и инженерной методики фактическим данным по расходу

водяного пара на производство, полученным по прибору учета (расчетная линия практически повторяет динамику значений по прибору учета). Индикаторная диаграмма (рис. 2) позволила установить, что диапазон наиболее часто встречающихся значений фактических удельных расходов пара на производство бетона составляет 0,38...0,75 т/ч.

Расчеты показали снижение расхода пара при увеличении степени загрузки пропарочной камеры, которую можно описать степенной функцией с точностью корреляции 0,66 (рис. 3).

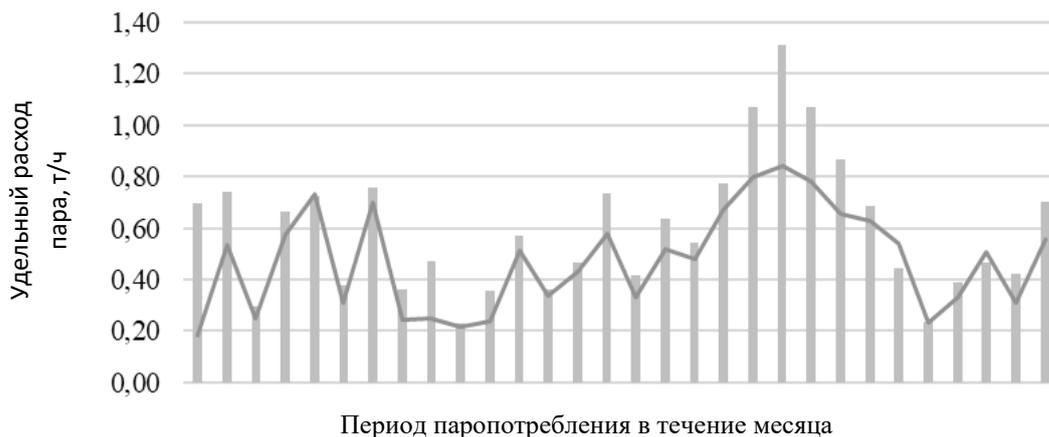


Рис. 1. Диаграмма сопоставления фактических удельных расходов пара (столбцы) на производство бетона, т/ч, с расчетными данными (ломаная линия) по методике [1]

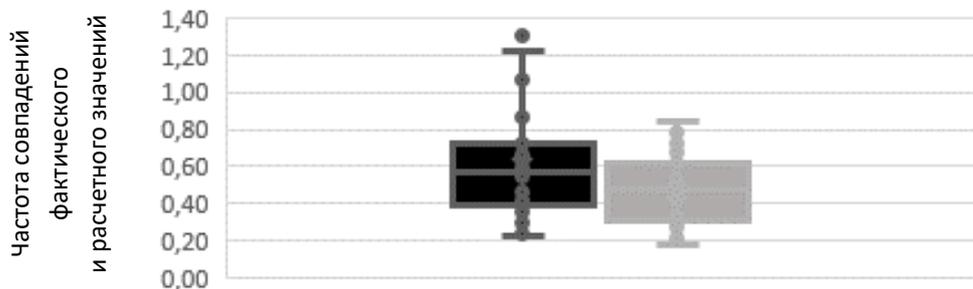


Рис. 2. Индикаторная диаграмма частоты совпадения значений фактических (темный цвет) и расчетных (серый цвет) удельных расходов пара на производство бетона, т/ч

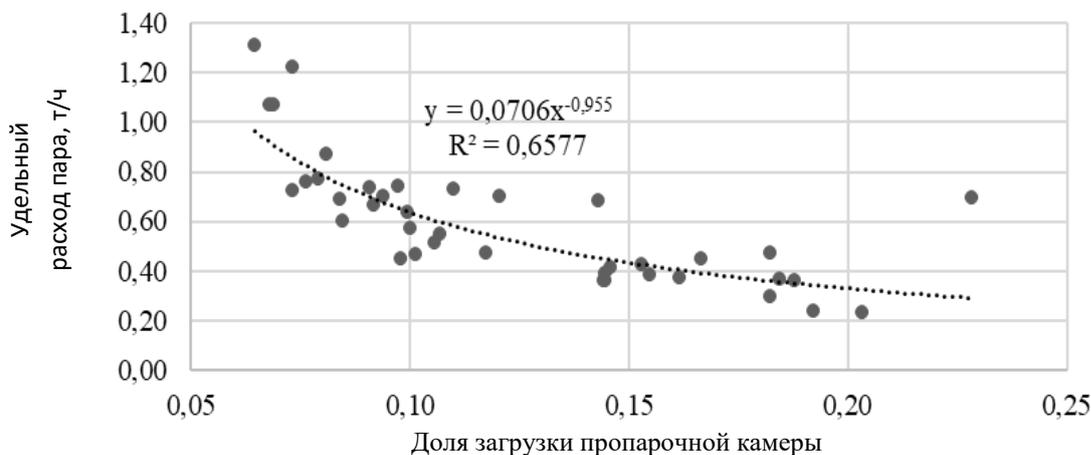


Рис. 3. Диаграмма зависимости удельного расхода пара, т/ч, от загрузки пропарочной камеры

Подобный анализ выполнен для ЖБЦ при тепловлажностной обработке железобетонных изделий.

Выводы по результатам анализа информации по ЖБЦ позволяют также подтвердить сходимость математической модели и инженерной методики с фактическими данными по расходу водяного пара, при этом диапазон наиболее часто встречающихся значений фактических удельных расходов пара на производство бетона составляет 0,35...0,45 т/ч. Снижение расхода пара при увеличении степени загрузки пропарочной камеры также подтверждено, при этом точность корреляции составила 0,75.

Данные расчеты позволили сформировать основные технологические показатели процесса тепловлажностной обработки железобетонных изделий, а также дать рекомендации по технологической безопасности проведения работ, связанных с использованием насыщенного пара, а также санитарно-гигиенические требования к производственным процессам и технологическому оборудованию предприятий сборного железобетона.

Сформированы рекомендации по осуществлению производственных процессов в соответствии с требованиями безопасности по ГОСТ 12.3.002-81, а также использованию производственного оборудования в соответствии с требованиями ГОСТ 12.2.003-74.

Также отмечено, что камеры твердения ямного типа должны быть оборудованы гидравлическими затворами или другой специальной конструкцией, обеспечивающей герметичность соединения крышки с камерой для предотвращения выделения пара, при этом рабочее давление среды в камере не должно превышать указанное в режимной карте. Камеры, находящиеся внутри закрытых помещений, должны быть оборудованы системой парогашения или вытяжной вентиляцией, при этом все камеры (полигона и ЖБЦ) должны быть оборудованы приборами, контролирующими температуру среды в ней.

Результаты определения расходов тепловой энергии и водяного пара на производственные нужды позволили провести сопоставление расчетных и фактических расходов технологической линии предприятия. К примеру, в таблице приведен сравнительный анализ фактических данных коммерческого узла учета и результатов расчета тепловых нагрузок потребления на 28.02.19 г. и 02.03.19 г. (дни с сопоставимыми технологическими нагрузками).

Таблица

Сравнительный анализ фактических данных коммерческого узла учета и результата расчета тепловых нагрузок потребления

Дата	Температура наружного воздуха, °С	Технологический блок предприятия	Фактические данные	Расчетные данные	Отклон.
1	2	3	4	5	6
28 февраля 2019 г.	+1	Полигон	3,83	2,94	23 %
		ЖБЦ	8,42	9,43	12 %
02 марта 2019 г.	-8	Полигон	3,85	3,12	19 %
		ЖБЦ	7,58	7,26	4 %

На основании сопоставления данных можно говорить о том, что в целом расчетные и фактические значения совпадают в пределах отклонения не более 23 % для исследуемых режимов загрузки системы паропотребления, что показывает соответствие осуществленного производства рекомендуемым технологическим режимам.

При исследовании вопроса оценки эффективности энергоиспользования при тепловлажностной обработке бетона, установлено, что эффективность работы пропарочных камер зависит от многих внешних и внутренних факторов. Тепловую эффективность производства сборного бетона можно существенно повысить, снизив тепловые потери, связанные с неудовлетворительным состоянием пропарочных камер, тепловых сетей, запорной арматуры и средств контроля расхода пара.

Анализ распределения расхода тепловой энергии в пропарочных камерах ООО «Завод ЖБК ВСЗ» показал, что наибольшая доля тепловой энергии идет на нагрев ограждающих конструкций (54 %) и восполнение потерь теплоты через ограждающие конструкции (23 %).

По итогам обследования разработаны и предложены мероприятия по повышению эффективности существующей системы пароснабжения предприятия.

Актуальность работы обусловлена потребностью предприятия в повышении энергетической эффективности собственного производства, результаты которой могут стать основой для принятия технических решений и мероприятий по экономии энергоресурсов и снижения себестоимости продукции.

Данная работа стала продолжением комплексных исследований эффективности промпредприятий Вологодской области научно-образовательным центром «Современные проблемы техносреды» Вологодского государственного университета, выполнявшим ранее хозяйственные работы по проведению первичных энергетических обследований зданий и сооружений предприятий СП Вологодский завод ЖБКиСД СМТ № 5 филиал ОАО «РЖД» (Вологда), СХПК «Племптица-Можайское» (Вологодский район), ОАО «Солдек» и «Соколостром» (Сокол), СХПК АПК «Надеево» (Вологодский район), а также ОАО «Северный коммунары» (Вологда), результаты которых отражены в работах [5–8].

Авторский коллектив искренне благодарит сотрудников энергетического сектора предприятия за предоставленные материалы и оказанную ими неоценимую помощь при проведении инструментального исследования системы пароснабжения технологического участка.

Литература

1. Корюкин, С. И. Основы проектирования систем теплоснабжения : учебное пособие к курсовым и дипломным проектам / С. И. Корюкин, А. А. Синицын. – Вологда : ВоГТУ, 2013. – 71 с.
2. Regional management of district heating / Sovetova N., Sinityn A., Tritenko E., Derevianko O., Mukhametova L., Fedukhin A., Makoev S., Kalyutik A. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Collection of materials International Scientific and Practi-

cal Conference. Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – IOP Publishing Ltd. – P. 012121.

3. Sinitsyn, A. Practical applicability of the method for measuring pressure of controlled medium on the example of a pulsating combustion boiler / Sinitsyn A., Mukhametova L. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Proceedings of the Conference the international scientific conference "Efficient waste treatment – 2018" (EWT-2018). 2019). – IOP Publishing Ltd. – P. 012063.

4. Small-scale steam generation from local solid waste / Cauich-López D. A., Barrera Payan L. F., Abdelhalim A. M. N., Socolova E., Sinitsyn A.A., Akhmetova I.G. // International Journal of Civil Engineering and Technology. – Vol. 10, № 2. – 2019.

5. Sinitsyn, A. A. Experience of small innovative enterprises foundation in the Vologda region / Sinitsyn A. A. //

Middle East Journal of Scientific Research. – Vol. 16, № 10. – 2013.

6. Sinitsyn, A. A. Application of the us small innovative business model in case of research and education center "Теплоэнергетика" / Sinitsyn, A. A. // Problems and trends of economy and management in the modern world Proceedings of the International Conference. – Kirov, 2012. – P. 537–541.

7. Специфика определения энергетического пространства состояния предприятия / Петухов В. В., Синицын А. А., Игонин В. И., Корюкин С. И. // Вузовская наука – региону. – Вологда, 2004. – С. 445–447.

8. Шитова, В. П. Особенности представления экспериментальных данных через потоки и силы в теплотехническом объекте / Шитова В. П., Синицын А. А., Игонин В. И. // Молодые исследователи – региону. – Вологда, 2004. – С. 253–254.

A.A. Sinitsyn, O.V. Stratunov, D.V. Baskov
Vologda State University

RESULTS OF ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT OF THE ENTERPRISE THAT PRODUCES REINFORCED CONCRETE PRODUCTS

The paper considers the main results of instrumental analysis of energy and technological efficiency of production associated with steaming of reinforced concrete products in steaming chambers operating on saturated water vapor.

Reinforced concrete products, steaming chamber, heat and humidity treatment, energy efficiency, energy-saving measures.