

*Е. М. Дербасова, П. В. Яковлев*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СКОРОСТНОЙ ОТЛИВКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СТАЦИОНАРНЫХ НЕФТЯНЫХ ПЛАТФОРМ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ

Рассматривается возможность использования бетона и железобетона для изготовления опорных конструкций и оснований морских нефтегазовых сооружений, возводимых в условиях замерзающей части Северного Каспия. Анализируются основные проблемы, возникающие при транспортировке плавучих крупногабаритных сооружений из морских портов на места их строительства. В связи с перегруженностью судостроительных предприятий, на территориях которых сосредоточен весь производственный цикл по созданию стационарных нефтяных платформ, отмечена необходимость в реализации новой технологии непрерывной скоростной отливки бетонных и железобетонных конструкций в морских условиях. Большое внимание уделено вопросам интенсификации процессов твердения бетонных и железобетонных изделий с использованием различных методов. В процессе анализа способов ускоренного твердения железобетона, их достоинств и недостатков произведен выбор оптимального для приобъектных условий изготовления – инфракрасный нагрев. Реализована методика расчета параметров тепловых режимов скоростной отливки железобетонных изделий с учетом климатических и технологических параметров твердения и получено критериальное уравнение, которое в дальнейшем будет положено в основу алгоритма для реализации процесса непрерывной отливки железобетонных конструкций морских нефтегазовых сооружений.

**Ключевые слова:** опорная бетонная конструкция, нефтяная платформа, скоростная отливка, транспортировка, тепловлажностная обработка, инфракрасное излучение, уравнение технологических режимов.

### **Введение**

Северная часть Каспийского моря является одной из богатейших территорий в мире по величине запасов углеводородов. Согласно последним данным [1], на территории Северного Каспия открыто 8 крупных многопластовых нефтегазовых месторождений: им. Ю. Корчагина, Хвалынское, 170-й км, Ракушечное, Западно-Ракушечное, им. Ю. Кувыкина, Центральное и им. В. Филановского, суммарные извлекаемые запасы которых превышают 1 млрд 870 млн т условного топлива.

Наличие столь значительных запасов углеводородного сырья и определило основную специализацию судостроительных предприятий, расположенных в прибрежных зонах Каспия и р. Волги: строительство стационарных нефтегазовых платформ, основным материалом для изготовления которых является сталь. Однако в мировой практике, в зависимости от конструктивных особенностей, для возведения оснований, колонн или опорных блоков морских инфраструктурных объектов и платформ давно и успешно используются бетон и железобетон [2]. За их счет обеспечиваются местная и общая прочность и жесткость колонны, требуемые для сопротивления ледовым нагрузкам, что весьма актуально для условий замерзающей части Северного Каспия. Примером может служить построенное в заливе Кука у берегов Аляски ледостойкое сооружение. Его верхнее строение опирается на четыре бетонные колонны большого диаметра, внутри каждой из которых по периметру забито несколько свай. Колонны имеют диаметр 4,6 м и высоту 42 м. Еще одним уникальным сооружением является норвежская платформа «Тролль», построенная в 1995 г. Основание гигантского сооружения состоит из бетонных цилиндров высотой более 300 м. Опорные бетонные конструкции обеих платформ собирались на береговых площадках и буксировались к месту эксплуатации, что весьма удобно в связи с достаточно большими значениями глубины морского дна в районах транспортировки и эксплуатации.

### **Основные проблемы и предлагаемое решение**

Особенностью Северного Каспия является его мелководная (глубина 2–8 м) структура. Частое понижение уровня воды в морских судоходных каналах и небольшие значения глубины морского шельфа, значительный вес и осадка бетонных оснований и конструкций создают определенные трудности при транспортировке плавучих крупногабаритных сооружений из морских портов на место их возведения. Значительные затраты приходится на дноуглубительные

работы, обеспечение высокого уровня безопасности и промерных работ на всем маршруте буксировки, содержание высококвалифицированного персонала. Еще одной проблемой является отливка бетонных и железобетонных изделий (БИ и ЖБИ), которая должна вестись непрерывно (более чем на сутки останавливать это процесс нежелательно). Это особенно важно, т. к. в условиях стационарных производственных баз бетонные конструкции из монолитного бетона раньше, чем через 28 суток после укладки бетона перемещать нельзя.

Судостроительные предприятия, на территориях которых базируется весь производственный цикл по созданию стационарных нефтегазовых сооружений, в настоящее время являются перегруженными в связи с увеличением количества заказов на строительство нефтяных платформ и других объектов для различных каспийских проектов. Выход из ситуации – изготовление бетонных оснований вне судостроительных предприятий, что освободит их для строительства высокотехнологичных объектов. Таким образом, возникает необходимость в создании новой технологии непрерывной скоростной отливки бетонных и железобетонных конструкций в условиях Каспийского моря, а именно его северной части, с интенсификацией процесса их твердения.

В настоящее время интенсификация процесса твердения БИ и ЖБИ (тепловлажностная обработка (ТВО)) является неотъемлемой и ответственной частью технологического процесса производства ЖБИ строительного комплекса России. Энергетические затраты на выполнение этой технологической операции составляют более 50 % всех энергозатрат предприятия. На рис. 1 представлены методы ускоренного твердения БИ и ЖБИ, применяемые в России.

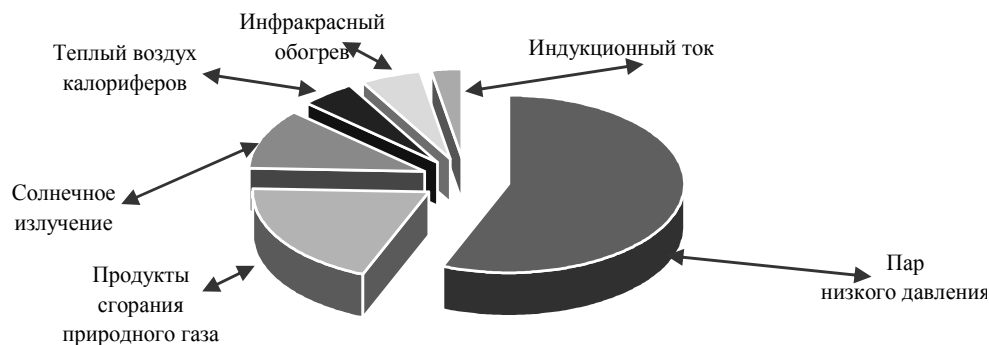


Рис. 1. Методы ускоренного твердения БИ и ЖБИ, наиболее распространенные в России

Классическая (заводская) технология ускоренного твердения БИ и ЖБИ базируется на применении паровой энергии в качестве энергоносителя. При этом используются ямные, щелевые (туннельные) и вертикальные камеры, кассетные установки, а также специальные формы для изготовления объемных элементов (шахты лифтов, вентиляционных коробов, санитарных кабин и др.). Общим для всех типов этих установок являются:

- передача тепла от теплоносителя (пара) к изделию теплопроводностью;
- совмещение стадии формования изделия и его ТВО в одном технологическом процессе.

Помимо традиционного теплоносителя (пара низкого давления), широкое распространение получило использование в установках ТВО (в частности, ямных и щелевых камерах) продуктов сгорания природного газа. Данная технология может применяться только для изготовления БИ и ЖБИ из мелкозернистых бетонов, бетонов на плотных и пористых заполнителях и цементов общестроительного назначения.

В последнее время в строительной индустрии южных районов РФ для ускоренного твердения БИ на открытых площадках (полигонах) используется солнечная энергия [3]. Это объясняется повышенной энергоемкостью процесса производства сборного железобетона в заводских условиях. Климатические факторы жарких районов можно использовать на всех стадиях изготовления ЖБИ: при приготовлении бетонной смеси (нагрев крупного и мелкого заполнителя, воды, водных растворов химических добавок), тепловой обработке изделий, снижении отпускной влажности и пр.

Менее широкое распространение получили следующие способы ускоренного твердения ЖБИ:

- обработка теплым воздухом, нагреваемым в калориферах;
- обработка бетона в масляной среде;
- нагрев бетона индукционными токами в электромагнитном поле;
- инфракрасный (ИК) прогрев конструкций.

Большинство из перечисленных способов реализуются в заводских условиях. Основные затраты при этом связаны с обустройством технологического оборудования, установкой системы автоматизации и решением экологических проблем, возникающих вследствие образования загрязненного конденсата, который неизбежно будет попадать в море, а также невозможности использовать его без применения серьезных и дорогостоящих методов очистки. Многие из этих проблем, успешно решаемых в береговых условиях, при организации непрерывной отливки бетонного основания в морских условиях создают серьёзные трудности. Так, наиболее распространённый способ поддержания температуры – пропарка, требует значительных капитальных вложений при использовании для получения пара как центрального, так и автономного источников теплоснабжения и пропарочной камеры, которая для такого размера объектов нефтегазового комплекса пока не разработана.

Анализ технических, технологических и экологических проблем перечисленных способов показал, что оптимальным вариантом ускоренного твердения бетона в условиях моря является ИК-излучение.

ИК-излучение относится к категории тепловых излучений, испускаемых всеми телами, нагретыми до определенной температуры. Источниками ИК-лучей в коротковолновой области являются электрические лампы накаливания, ртутные лампы, газовые горелки, металлические и керамические излучатели.

В технологии сушки и ТВО можно выделить следующие области применения ИК-излучения:

- сушка лакокрасочных поверхностей;
- сушка древесины;
- термопрогрев бетонных изделий в технологии монолитного домостроения;
- сушка зерна;
- термообработка продуктов пищевой промышленности и др.

Преимущества применения излучателей в технологии ТВО, по мнению многих авторов [4–6], заключаются в следующем:

- более высокая экономичность по сравнению с конвекционным способом и теплопроводностью;
- меньшая скорость и затрачиваемая энергия по сравнению с традиционными методами;
- бесконтактный способ передачи тепла;
- повышенное качество термообработки бетона;
- экологичность технологии.

В строительном производстве источники ИК-излучения используются в целях ускоренного твердения бетонных (железобетонных) строительных конструкций при возведении зданий по технологии монолитного домостроения (особенно в зимних условиях) и при изготовлении строительных конструкций в заводских условиях. В первом варианте ИК-излучение применяется для периферийного обогрева бетона. При этом в качестве источников ИК-излучения используются металлические, трубчатые (ТЭНы) и стержневые карборундовые излучатели. При использовании заводской технологии существующие установки ТВО на предприятиях стройиндустрии переоборудуются в установки с ИК-излучателями.

Однако ИК-нагрев при тепловой обработке элементов нефтегазовых сооружений в объектных условиях отличается тем, что обогрев бетона осуществляется только с одной стороны и, как следствие, прогрев неравномерен по толщине изделия. Это может вызвать нарушение технологии бетонирования и привести к снижению качества. Готовой технологии непрерывной отливки с использованием ИК-нагрева в переменных климатических условиях, характерных для моря, и при лимите времени, определяемом параметрами застывания бетона, не существует. Решение данной задачи мы видим в управлении плотностью теплового потока и толщиной слоя единовременно отливаемого бетона.

### Постановка задачи о нестационарном переносе тепла в слое твердеющего бетона с использованием источников ИК-нагрева

При анализе процесса тепловой обработки бетона с использованием источников ИК-нагрева нами были приняты следующие допущения:

- при значительных лучистых потоках термодиффузия пара незначительна и ее влиянием на нестационарное поле температуры можно пренебречь;
- физические свойства тела одинаковы во всех направлениях;
- в пределах времени схватывания внутреннее тепловыделение бетона близко к постоянному;
- теплотери через изоляцию малы по сравнению с потерями через толщу бетона.

Расчётная модель приведена на рис. 2.

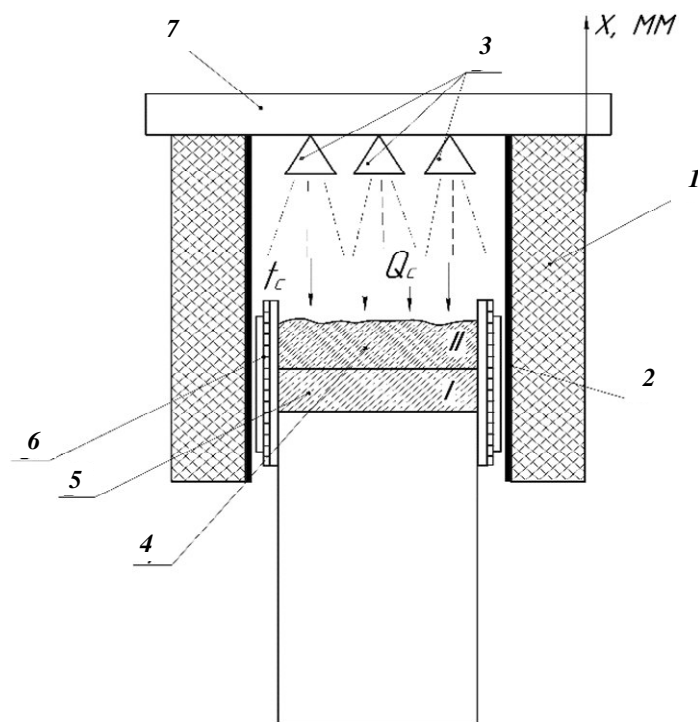


Рис. 2. Расчётная модель отливки ЖБИ:

- 1 – теплоизоляция; 2 – отражающий экран (фольга); 3 – источники ИК-нагрева;  
 4 – слой свежеуложенного железобетона, подвергаемого тепловой обработке;  
 5 – слой застывшего бетона; 6 – опалубка; 7 – герметичная крышка;  
 $Q_c$  – тепловой поток;  $t_{\text{окр.ср}}$  – температура окружающей среды

Для решения задачи необходимо задать начальные условия, определяющие распределение температуры в толще и на границах изделия в начальный момент времени; уравнение теплопроводности, описывающее процесс передачи тепла через толщу; граничные условия, определяющие условия теплообмена на всех характерных плоскостях.

Начальные условия:

- исходная температура бетона – 28 °С;
- максимальная температура нагрева –  $80 < t < 90$  °С;
- учитывается температура окружающей среды и тепловое поле, образовавшееся в результате предыдущей отливки;
- мощность нагрева – 400–800 Вт;
- время ускоренного твердения – 6 и 12 ч.

Моделирование процесса твердения бетона с использованием ИК-излучения осуществлялось при помощи программного комплекса MathLab.

Слой, равный 100 мм, подвергается тепловой обработке, длительность пропарки составляет 6 ч, по окончании твердения опалубка перемещается. На рис. 3 показано, как меняется температурное поле в процессе отливки.

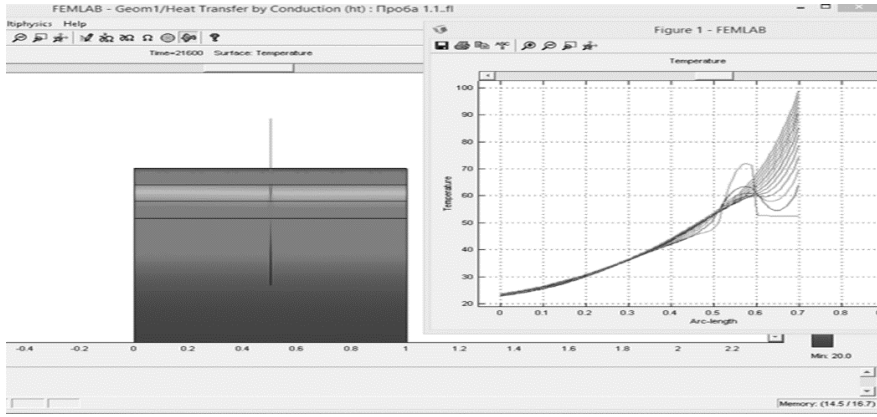


Рис. 3. Изменение температурного поля в процессе отливки

Исходное уравнение теплопроводности для твердения ЖБИ в общем случае имеет следующий вид [7]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + Q(x, \tau),$$

где  $a = \frac{\lambda}{(c \cdot \rho)}$  – коэффициент температуропроводности ( $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c$  – коэффициент объемной теплоемкости;  $\rho$  – плотность);  $Q$  – внутренние тепловыделения бетона.

На поверхности бетона приняты переменные, в зависимости от технологического цикла, граничные условия 1-го и 2-го рода. В качестве примера приведем постановку граничных условий для случая, соответствующего рис. 2:

– для первого слоя, отлитого на слой бетона с температурой окружающей среды, – граничные условия 1-го рода –  $t(0, \tau) = t_{окр.ср}$ ;

– на поверхности второго слоя (нагревается ИК-подогревателями):  $-\lambda \frac{\partial t(H, \tau)}{\partial x} = Q$

и  $-\lambda \frac{\partial t(H, \tau)}{\partial x} = 0$  во время отключения ИК-подогрева при переносе опалубки.

Один из результатов численных экспериментов приведен на рис. 4.

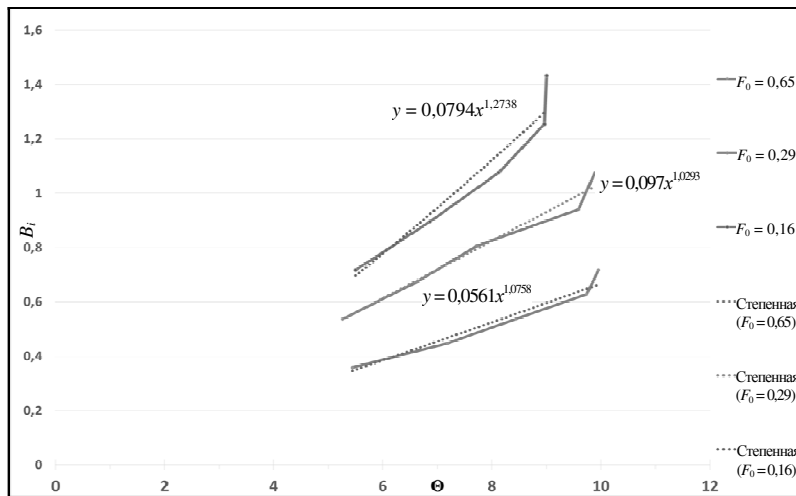


Рис. 4. Обработка полученных результатов в безразмерном виде (один из вариантов)

Обработка результатов экспериментов осуществлялась в безразмерном виде. Нами предложены модифицированные значения определяющих критериев подобия:

– Био:

$$B_i = \frac{q \cdot l}{\Delta t \cdot \lambda}, \quad (1)$$

где  $q$  – мощность нагрева, Вт;  $l$  – характерный размер тела, мм;  $\Delta t = t_{\text{опт.бет}} - t_{\text{нач.бет}}$  – разность между оптимальной температурой твердеющего бетона (90 °С) и начальной температурой, с которой производится укладка бетона в опалубку и осуществляется его твердение (28 °С).

– Фурье:

$$F = \frac{\alpha \cdot \tau}{l^2},$$

где  $a = \frac{\lambda}{(c \cdot \rho)}$  – коэффициент температуропроводности;  $\tau$  – характерное время изменения внешних условий;  $l$  – то же, что в формуле (1).

Безразмерная температура:

$$\theta = \frac{t_{\text{max.бет}} - t_{\text{окр.ср}}}{t_{\text{нач.бет}} - t_{\text{окр.ср}}},$$

где  $t_{\text{max.бет}}$  – максимальная температура бетона, подвергаемого тепловой обработке, °С;  $t_{\text{нач.бет}}$  – начальная температура, с которой производится укладка бетона в опалубку, °С;  $t_{\text{окр.ср}}$  – температура окружающей среды, при которой осуществляется твердение бетона, °С.

Для расчёта параметров нестационарного теплообмена при ускоренном изготовлении оснований нефтяных платформ в морских условиях нами в безразмерном виде было получено уравнение технологических режимов скоростной отливки опорных железобетонных корпусов морских ледостойких сооружений, которое имеет следующий вид:

$$B_i = \frac{0,186}{4+0,3 \cdot \theta} F_0^{-1,06} \theta^{\frac{9+2,5 \cdot F_0}{5+0,2 \cdot \theta}}.$$

Данное уравнение положено в основу алгоритма технологических режимов твердения бетона, оптимизирующего процесс скоростной отливки железобетонных конструкций нефтегазовых сооружений в условиях Каспийского моря.

### Заключение

Предложенный метод скоростной отливки железобетона при его реализации дает возможность качественно изменить технологию строительства ледостойких платформ в условиях Северного Каспия, а также и других морских транспортных сооружений. Метод позволяет определить возможности снижения нагрузки на судостроительные предприятия Астраханского региона, оптимизировать риски транспортировки готовых сооружений морского нефтегазового комплекса по Волго-Каспийскому каналу.

Предложенная методика расчета параметров тепловых режимов скоростной отливки ЖБИ с учетом климатических и технологических параметров твердения обеспечит возможность интенсификации процесса отливки бетонных и железобетонных корпусов ледостойких платформ в условиях Каспийского моря.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинина М. А. Перспективы развития проектов ОАО «ЛУКОЙЛ» на Северном Каспии / М. А. Дубинина // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2015. № 1 (59). С. 102–109.
2. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа / Т. Доусон. Л.: Судостроение, 1986. 288 с.

3. Подгорнов Н. И. Методы термообработки сборного и монолитного железобетона с использованием солнечной энергии: дис. ... д-ра техн. наук / Н. И. Подгорнов. М., 2005. 455 с.
4. Худоногов И. А. Разработка и исследование эффективных ИК-облучателей / И. А. Худоногов // Вестн. Иркут. гос. сельскохозяй. акад. 1999. Вып. 16. С. 23–31.
5. *Инструкции* по ремонту и строительству // URL: <http://axk.com.ru/progreb-betona-infrakrasnym-metodom>.
6. Богомолов А. И. Газовые горелки инфракрасного излучения / А. И. Богомолов, Д. Я. Вигдорчик, М. А. Маевский. М.: Изд-во лит. по строительству, 1967. 257 с.
7. Ибрагимов А. М. Нестационарный тепло- и массоперенос в многослойных ограждающих конструкциях: дис. ... д-ра техн. наук / А. И. Ибрагимов. М., 2006. 310 с.

Статья поступила в редакцию 29.06.2015

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Дербасова Евгения Михайловна** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский инженерно-строительный институт; старший преподаватель кафедры «Инженерные системы и экология»; [ederbasova@ausci.ru](mailto:ederbasova@ausci.ru).

**Яковлев Павел Викторович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; г-р техн. наук, профессор; профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и гидромеханика»; [astral37@mail.ru](mailto:astral37@mail.ru).



*E. M. Derbasova, P. V. Yakovlev*

### STUDY OF THERMAL MODES OF HIGH-SPEED CASTING OF REINFORCED CONCRETE SUPPORTING STRUCTURES OF STATIONARY OIL PLATFORMS IN THE NORTHERN CASPIAN

**Abstract.** The possibility of the use of concrete and reinforced concrete for the manufacture of supporting structures and foundations of the offshore oil constructions erected in a freezing part of the Northern Caspian Sea is considered. The main problems encountered in the transportation of large floating structures of seaports to the place of their construction are analyzed. Due to congestion of the shipyards, on whose territory the whole production cycle is concentrated on the creation of stationary oil platforms, the need to implement the new technology of continuous casting speed of concrete and reinforced concrete structures in marine environments is highlighted. Much attention is paid to the issues of intensification of the processes of hardening of concrete and concrete products using a variety of the methods. The analysis of the methods of accelerated hardening of concrete and their advantages and disadvantages helped make the choice of the optimal conditions for the on-site production – infrared heating. The method of calculating the parameters of a high-speed thermal regimes of casting of the concrete products, taking into account the climatic and technological parameters of hardening, is actualized and the criterion equation, which will continue to form the basis of the algorithm to implement the process of continuous casting of concrete structures of the offshore oil and gas installations, is received.

**Key words:** bearing concrete structure, oil platform, speed casting, transportation, steam curing, infrared radiation, equation of technological regimes.

#### REFERENCES

1. Dubinina M. A. Perspektivy razvitiia proektov OAO «LUKOIL» na Severnom Kasp'ii [Perspectives of the development of the projects of JSC "LUKOIL" in the Northern Caspian]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 1 (59), pp. 102–109.
2. Douson T. *Proektirovanie sooruzhenii morskogo shel'fa* [Designing of the structures of the offshore shelf]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1986. 288 p.

3. Podgornov N. I. *Metody termoobrabotki sbornogo i monolitnogo zhelezobetona s ispol'zovaniem solnechnoi energii* [Methods of thermal processing of precast concrete using solar energy. Dis. Dr. tech. sci.]. Moscow, 2005. 455 p.
4. Khudonogov I. A. *Razrabotka i issledovanie effektivnykh IK-obluchatelei* [Development and study of the effective infrared radiators]. *Vestnik Irkutskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii*, 1999, iss. 16, pp. 23–31.
5. *Instruktsii po remontu i stroitel'stvu* [Instructions on the repair and building]. Available at: <http://axk.com.ru/progreb-betona-infrakrasnym-metodom>.
6. Bogomolov A. I., Vigdorichik D. Ia. Maevskii, M. A. *Gazovye gorelki infrakrasnogo izlucheniia* [Gas burners of infrared radiation]. Moscow, Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1967. 257 p.
7. Ibragimov A. M. *Nestatsionarnyi teplo- i massoperenos v mnogosloinykh ograzhdaiushchikh konstruktssiakh* [Mobile heat and mass transfer in multilayered limiting constructions. Dis. Dr. tech. sci.]. Moscow, 2006. 310 p.

The article submitted to the editors 29.06.2015

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Derbasova Evgenia Mikhailovna** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan Institute of Civil Engineering; Senior Lecturer of the Department "Systems Engineering and Ecology"; [ederbasova@aucu.ru](mailto:ederbasova@aucu.ru).

**Yakovlev Pavel Viktorovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department "Life Security and Hydromechanics"; [astral37@mail.ru](mailto:astral37@mail.ru).

