

Павел Юрьевич МИХАЙЛОВ¹
Максим Викторович СОЗОНОВ²

УДК 69.001.5

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОЭФФЕКТИВНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

¹ кандидат физико-математических наук,
доцент базовой кафедры расходомерии нефти и газа,
Тюменский государственный университет
rav84369437@yandex.ru

² магистрант кафедры прикладной и технической физики,
Тюменский государственный университет
m.v.sozonov@yandex.ru

Аннотация

Современные строительные технологии развиваются в основном по пути использования новых материалов и незначительных изменений в конструкции зданий. При этом строительная техника мало изменилась за последние 30 лет. Строительная 3D-печать позволяет повысить эффективность строительства за счет использования новых строительных материалов, сокращения трудозатрат, практически безотходного метода строительства и применения различных новых геометрических решений конструкций, которые трудно или невозможно применять при традиционном строительстве. В работе представлено три варианта конструкций наружной стены здания, некоторые из которых применялись на практике. В качестве расчетных строительных материалов используются популярные утеплители и бетонные смеси, которые применялись или могут применяться при строительстве данным методом. Проведен тепловой расчет конструкций по разработанной методике с учетом нормативных требований к ограждающим конструкциям жилого здания. Методика расчета ограж-

Цитирование: Михайлов П. Ю. Разработка теплоэффективной ограждающей конструкции зданий, выполненных по технологии 3D-печати / П. Ю. Михайлов, М. В. Созонов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 1. С. 55-68.
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-55-68

дающей конструкции основана на применении закона Фурье, расчет производится с помощью программного комплекса ANSYS. По каждому варианту конструкции было рассчитано несколько комбинаций используемых строительных материалов. Получена зависимость значения теплового потока от температуры наружного воздуха. Определены наиболее и наименее теплоэффективные варианты конструкций. Проведен экономический расчет для определения стоимостных показателей строительства и стоимости эксплуатации разработанных конструкций как между собой, так и в сравнении с традиционной конструкцией. Определена наиболее выгодная по стоимости эксплуатации конструкция наружной стены жилого здания.

Ключевые слова

Строительная 3D-печать, строительство, аддитивное производство, теплоэффективность, моделирование, строительный 3D-принтер, тепловой расчет.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-55-68

Введение

Повысить эффективность технологий строительства и решить некоторые существующие проблемы традиционного гражданского строительства можно с помощью аддитивных методов производства. Аддитивное производство — процесс создания физического объекта по цифровой геометрической модели путем добавления (наращивания) материала слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства, например вытачивания детали на станке, или традиционного формообразующего производства — литья, штамповки [4]. 3D-печать — основной метод аддитивного производства. На сегодня существует ряд успешных проектов по строительной 3D-печати. Основным лидером в применении строительной 3D-печати на практике является Китай, однако в России также существуют компании, занимающиеся этой технологией.

Сегодня с помощью строительного 3D-принтера можно напечатать конструкцию практически любой формы, а следовательно, можно решать задачи по увеличению прочности и теплоэффективности, не только применяя более совершенные материалы, но и задавая различные геометрические параметры конструкций. На данный момент не существует каких-либо нормативов по строительству данным методом.

В работе предложено три варианта конструкций наружной стены, которые можно создать на строительном 3D-принтере (некоторые из них уже применялись на практике).

Разработка вариантов конструкций

Общей для всех конструкций выбрана толщина слоя опалубки. Выбор одинаковой толщины целесообразен, т. к. на практике перенастройка толщины печатаемого слоя может занять длительное время или быть невозможной из-за

конструктивных особенностей экструдера — устройства для пластификации материала и придания ему формы продавливанием через профилирующий инструмент (экструзионную головку) с определенной формой сечения [10]. Разработанные конструкции отличаются общей толщиной, длиной и характером распределения материала внутри. Распределение слоев материала по высоте конструкции принимается равномерным и однородным.

Длина фрагмента разработанных конструкций неодинакова и зависит от симметрии и размера слоев внутри поперечного сечения. То же самое касается толщины конструкций. Можно было бы привести все конструкции к одной и той же толщине, но тогда, ввиду сложности геометрии и разного распределения пустот в конструкции, даже комбинация самых лучших материалов не будет способствовать соблюдению критерия теплоэффективности. Рассматриваемые конструкции не имеют стандартных элементов арматуры, поскольку роль ее в увеличении теплопотерь невелика. Большее влияние на теплопотери оказывают ребра опалубки. В качестве замены стандартному армированию конструкции можно использовать фибробетон — конструкционный материал на основе мелкозернистого бетона с добавлением тонкодисперсных стеклянных или синтетических волокон либо тонких металлических нитей [6]. Для сравнительного экономического расчета также проведен расчет конструкции наружной стены, выполненный традиционным методом строительства (кирпичная кладка).

Первый вариант конструкции

Первый вариант конструкции основан на предложенном в технической документации Aris Cor [1] строении стенки. Данная конструкция уже применена на практике при строительстве небольшого дома [2]. Расчетная толщина слоя опалубки всех конструкций принимается равной той, что предложена Aris Cor для данного варианта конструкции, а именно 25 мм. Расчетная толщина данной конструкции составляет 355 мм. Чертеж расчетной модели первого варианта конструкции представлен на рис. 1.

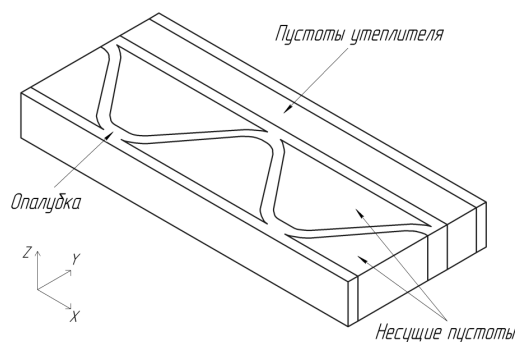


Рис. 1. Первый вариант конструкции

Fig. 1. The structure's first design

Второй вариант конструкции

Второй вариант конструкции также предложен в технической документации Aris Cor [1]. Применялся на практике при строительстве наружной стены дома, возводимого компанией «СПЕЦАВИА» [9]. Из-за особенностей распределения пустот в данном варианте стенки, помимо несущей части стены и слоя утеплителя, можно выделить еще один вид полостей — «большие пустоты», ограниченные непосредственно опалубкой наружной и внутренней поверхностей стены. Общая толщина разработанной конструкции — 620 мм. Чертеж расчетной модели второго варианта конструкции представлен на рис. 2.

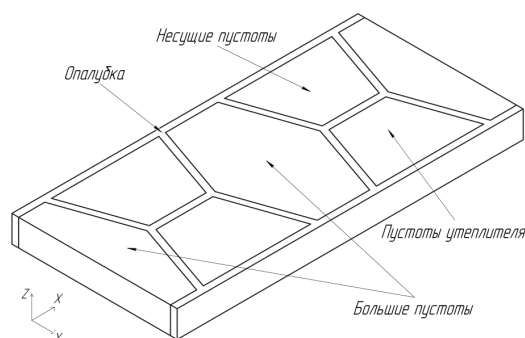


Рис. 2. Второй вариант конструкции

Fig. 2. The structure's second design

Третий вариант конструкции

Третий вариант конструкции по характеру распределения пустот схож с первым: также имеются два вида пустот и опалубка. Контур опалубки данной конструкции содержит сетчатую структуру в зоне несущей части и дополнительные ребра в зоне утеплителя. Такая структура должна придать большую прочность конструкции по сравнению с другими расчетными вариантами. Однако ребра создают мостики холода, по которым тепло будет легко уходить, не встречая на своем пути препятствия в виде слоя утеплителя, как это реализовано в первом варианте конструкции стены. Общая толщина конструкции — 500 мм. Чертеж расчетной модели данной конструкции представлен на рис. 3.

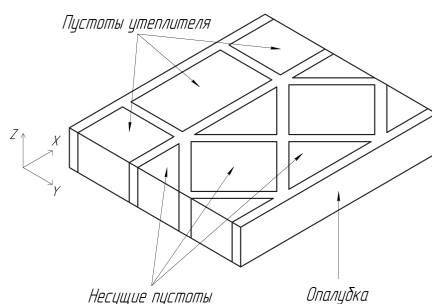


Рис. 3. Третий вариант конструкции

Fig. 3. The structure's third design

Кирпичная стенка

Расчетная конструкция кирпичной стенки состоит из следующих слоев (начиная с наружной поверхности стены): кирпичная облицовка, слой утеплителя, основная кирпичная кладка, слой штукатурки.

Материал основной кирпичной кладки — керамический пустотный кирпич на цементно-песчаном растворе. Слой облицовочной кладки выполнен из сплошного силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе. Материал штукатурки — раствор цементно-песчаный. Коэффициенты теплопроводности данных слоев принимаются по СП 50.13330.2012 [8]. Материал утеплителя — PIR-плита, коэффициент теплопроводности которой принимается по [5].

Тепловой расчет конструкций

Определение теплоэффективности конструкции сводится к определению теплопотерь через нее. Для этого используются различные методики и критерии. На практике используется СП 50.13330.2012, согласно которому теплозащитная оболочка здания должна соответствовать нескольким требованиям. Только при одновременном выполнении этих требований обеспечивается надлежащая тепловая защита сооружения [8].

Для каждого вида ограждающих конструкций эти требования различаются. Т. к. в работе исследуются только наружные стены, то в расчете используются необходимые критерии только для конструкций наружных стен: санитарно-гигиеническое требование (ограничивает величину температуры внутренней поверхности ограждающей конструкции в зависимости от точки росы) и поэлементное требование (приведенное сопротивление теплопередаче $R^{пр}$, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$, должно быть больше нормируемого значения, определяемого методикой по СП 50.13330.2012 [8]).

Расчет приведенного сопротивления теплопередаче по СП 50.13330.2012 [8] базируется на представлении фрагмента ограждающей конструкции как совокупности независимых, но при этом влияющих на тепловые потери всего фрагмента элементов. Путем сравнения потока теплоты через содержащий исследуемый элемент узел и через тот же узел, но без исследуемого элемента, определяются удельные потери теплоты через каждый такой элемент. Ввиду того, что конструкция стены может иметь множество слоев и сложную геометрию их распределения, поперечное сечение такой стены будет различаться вдоль всей протяженности стены. Свод правил [8] предполагает разбиение таких конструкций на несколько простых элементов и проведение расчета каждого из них. Таких элементов может получиться очень много, и расчет по приведенным в СП 50.13330.2012 [8] формулам будет очень громоздким и долгим. Т. к. разработанные конструкции стен имеют сложное внутреннее строение, то проведение теплового расчета по стандартной методике, приведенной в [8], невозможно. Поэтому была разработана методика проведения теплового расчета с помощью программного комплекса ANSYS.

Конструкция кирпичной стенки имеет более простую геометрию, поэтому расчет приведенного сопротивления теплопередаче для этой конструкции производился по стандартной методике, представленной в [8]. Согласно этой методике,

определяется минимально допустимая толщина утеплителя через приравнивание значения приведенного сопротивления теплопередаче к нормируемому значению. После чего, учитывая толщину отпускаемого утеплителя, приведенное значение сопротивления теплопередаче необходимо пересчитать.

Расчетное значение $R^{пр} = 4,63 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$, а общая толщина кирпичной стены — 0,6 м.

Методика расчета приведенного сопротивления теплопередаче

Расчет сопротивления теплопередаче разработанных конструкций основывается на преобразовании уравнения закона Фурье для одномерного температурного поля при постоянном значении коэффициента теплопроводности. Рассмотрим любую из разработанных конструкций. Температура, °C, вдоль толщи стены меняется от t_b на внутренней поверхности до t_n на внешней поверхности. Следовательно, присутствует градиент температур, который можно записать в виде $(t_b - t_n)/\delta$. Тогда можно записать закон Фурье для разрабатываемых конструкций в виде:

$$q = \frac{(t_b - t_n)}{R}, \quad (1)$$

где R — термическое сопротивление стены, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$.

Отсюда получаем, что сопротивление теплопередаче конструкции равно:

$$R = \frac{(t_b - t_n)}{q}. \quad (2)$$

Эта формула справедлива для конкретных значений теплового потока и градиента температур. Значения температур t_b и t_n являются усредненными величинами, т. к. вдоль стены (по оси X) из-за наличия различных теплопроводных включений температура будет меняться. То же самое касается значения теплового потока. Поперечное сечение любой из разработанных конструкций не меняется по высоте (по оси Z). Следовательно, задачу можно свести к плоской и для численной обработки результатов использовать любое из сечений расчетной модели конструкции вдоль вертикальной оси. Т. к. температура наружного воздуха меняется в зависимости от времени года и времени суток, то имеет смысл получить значения R при разных температурах наружного воздуха. Выбрав некоторый набор значений температур наружного воздуха, можно получить среднее значение сопротивления теплопередаче конструкции, которое можно использовать для проверки критерия теплоэффективности. Таким образом, для любой из разработанных конструкций наружной стены значение приведенного сопротивления теплопередаче будет определяться по формуле:

$$R^{пр} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (3)$$

где R_i — сопротивление теплопередаче конструкции при i расчетной температуре наружного воздуха, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$.

После получения значения $R^{\text{нр}}$ нужно обратиться к СП 50.13330.2012 [8] и выполнить проверку поэлементного критерия. Если $R^{\text{нр}} > R^{\text{тп}}$, тогда такой вариант конструкции (комбинация материалов конструкции) удовлетворяет критерию теплоэффективности.

Определение нормируемого значения сопротивления теплопередаче

Определение нормируемого значения сопротивления теплопередаче происходит по методике, приведенной в СП 50.13330.2012 [8]. В данной работе предполагается возведение конструкций в Тюмени, соответственно, все нужные значения используемых величин берутся по СП 131.13330.2012 [7] для этого города. Согласно описанной методике,

$$R^{\text{норм}} = R^{\text{тп}}. \quad (4)$$

Значение $R^{\text{тп}}$ (требуемое значение сопротивления теплопередаче) определяется исходя из расчета ГСОП (градусо-сутки отопительного периода), $\text{°C} \cdot \text{сут./год}$:

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{в}} - t_{\text{от}}) \cdot z_{\text{от}} = (21 + 6,9) \cdot 223 = 6\,221,7 \text{ °C} \cdot \text{сут./год},$$

где $t_{\text{от}} = -6,9 \text{ °C}$ — средняя температура наружного воздуха, принимаемая по своду правил [7] для отопительного периода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более 8 °C ; $z_{\text{от}} = 223 \text{ сут./год}$ — продолжительность отопительного периода, принимаемая по своду правил [7] аналогично значению $t_{\text{от}}$; $t_{\text{в}} = 21 \text{ °C}$ — расчетная температура внутреннего воздуха здания, принимаемая при расчете ограждающих конструкций жилых зданий по значению минимальной оптимальной температуры воздуха жилых комнат в районах с температурой наиболее холодной пятидневки (с обеспеченностью 0,92) -31 °C и ниже в соответствии с ГОСТ 30494 [3] (температура холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 в Тюмени составляет -35 °C [7]).

Поскольку посчитанное значение ГСОП отличается от табличных значений, приведенных в СП 50.13330.2012 [8], то требуемое значение сопротивления теплопередаче, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$, определяется по формуле:

$$R^{\text{тп}} = a \cdot \text{ГСОП} + b = 0,000\,35 \cdot 6\,221,7 + 1,4 = 3,58,$$

где a , b — коэффициенты, значения которых принимаются по СП 50.13330.2012 [8] в зависимости от типа рассматриваемого здания и типа рассматриваемой ограждающей конструкции.

Следовательно, нормируемое значение сопротивления теплопередаче составляет $3,58 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$.

Задание граничных условий

Чтобы произвести расчет конструкций по разработанной методике, нужно создать поток тепла от одной поверхности стены (внутренней или наружной) к другой. Для этого нужно задать граничное условие третьего рода, определяющее тепловой режим внутри здания, условия окружающей среды и условие теплообмена

между соответствующей поверхностью и соответствующей средой. Величины, задающие граничное условие, определяются согласно СП 50.13330.2012 [8]. Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции стены составляет $8,7 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$, для наружной поверхности стены — $23 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$. Далее необходимо определить значения температур внутри помещения и снаружи. Согласно ГОСТ 30494 [3], оптимальная температура составляет $21\text{-}23 \text{ °C}$, а допустимая — $20\text{-}24 \text{ °C}$. Для расчетов используется наиболее комфортная допустимая температура 24 °C . Для более точной оценки значения коэффициента сопротивления теплопередаче конструкции, согласно предложенной методике, нужно задать несколько значений температур наружного воздуха, относительно которых будет проводиться расчет. Согласно СП 131.13330.2012 [7], абсолютная максимальная температура воздуха в Тюмени составляет 38 °C , а температура воздуха наиболее холодных суток (обеспеченностью $0,92$) составляет -41 °C . Можно задать некоторый ряд значений температур в этом диапазоне. В данной работе используются следующие значения температуры наружного воздуха: -40 °C , -30 °C , -20 °C , -10 °C , 0 °C , 10 °C , 20 °C , 35 °C .

Результаты расчета

В ходе расчета обработано 56 комбинаций материалов для первого варианта конструкции, 168 комбинаций для второго варианта конструкции и 62 варианта для третьей конструкции. В результате расчета получена зависимость величины теплового потока от температуры наружного воздуха для каждой конструкции (рис. 4-6). По каждой конструкции для сравнения взяты наиболее теплоэффективная комбинация, наименее теплоэффективная комбинация и самая дешевая из прошедших проверку комбинаций материалов. Величина коэффициента сопротивления теплопередаче по каждой из сравнительных комбинаций приведена в таблицах 1-3. В таблицу также включены две последующие комбинации материалов после наиболее теплоэффективной.

Таблица 1

Расчетные комбинации материалов первого варианта конструкции

Table 1

Calculation combinations of materials of the first embodiment

Опалубка	Несущая часть	Утеплитель	$R, \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$
СФБ	ПГБ(т)	Крошка PIR	5,12
БФБ	ПГБ(т)	Крошка PIR	4,90
СФБ	ПГБ(т)	ППУ	4,71
СФБ	ПГБ(т)	Пеноизол	3,98
СФБ	БФБ	БФБ	0,44

Примечания: СФБ — стеклофибробетон, БФБ — базальтофибробетон, ПГБ(т) — пеногипсбетон теплоизоляционный, ППУ — пенополиуретан, PIR — пенополиизоцианурат.

Notes: GFRC — glass fiber reinforced concrete, BFRC — basalt fiber reinforced concrete, FGCh — foam gypsum concrete (heat-insulating mod.), PUR — foam polyurethane, PIR — polyisocyanurate.

Таблица 2

Расчетные комбинации материалов второго варианта конструкции

Опалубка	Большие пустоты	Пустоты несущие	Пустоты утеплителя	$R, (m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$
СФБ	ПГБ(т)	ПГБ(т)	Крошка PIR	5,55
СФБ	ПГБ(т)	ПГБ(т)	ППУ	5,50
СФБ	ПГБ(т)	ПГБ(т)	Пеноизол	5,36
СФБ	Пенобетон	ПГБ(т)	Пеноизол	3,98
СФБ	БФБ	БФБ	БФБ	0,73

Table 2

Calculation combinations of materials of the second embodiment

Таблица 3

Расчетные комбинации третьего варианта конструкции

Опалубка	Несущая часть	Утеплитель	$R, (m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$
СФБ	ПГБ(т)	Крошка PIR	4,00
СФБ	ПГБ(т)	Пеноизол	3,71
СФБ	ПГБ(т)	ППУ	3,91
СФБ	БФБ	БФБ	2,66

Table 3

Calculation combinations of materials of the third embodiment

Зависимость значения теплового потока от температуры наружного воздуха

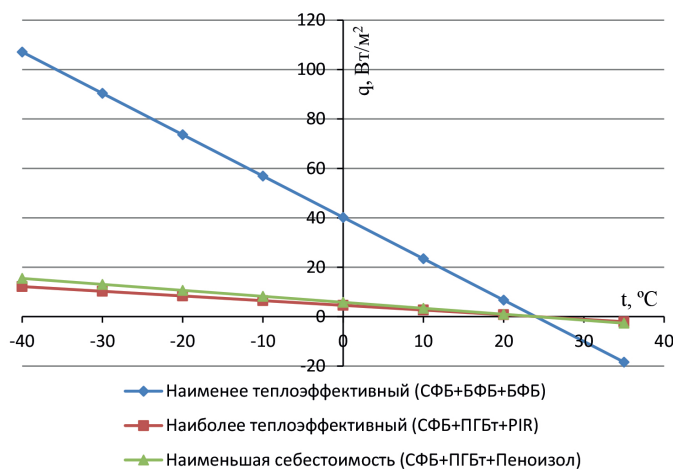


Рис. 4. Зависимость значения теплового потока от температуры наружного воздуха для первого варианта конструкции

Fig. 4. The dependence of the heat flux values of the outdoor temperature for the first design

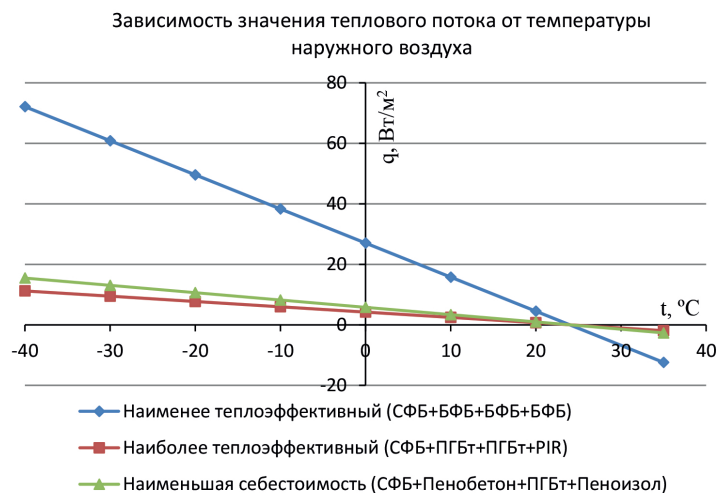


Рис. 5. Зависимость значения теплового потока от температуры наружного воздуха для второго варианта конструкции

Fig. 5. The dependence of the heat flux values of the outdoor temperature for the second design

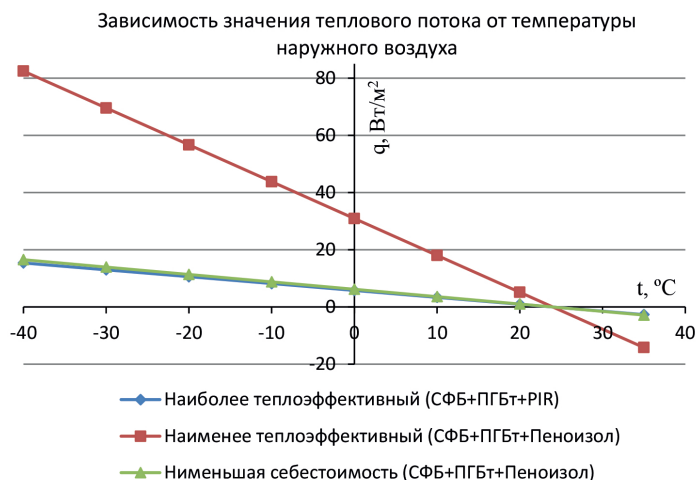


Рис. 6. Зависимость значения теплового потока от температуры наружного воздуха для третьего варианта конструкции

Fig. 6. The dependence of the heat flux values of the outdoor temperature for the third design

Выводы

Основным выводом является то, что конструкции, созданные с помощью 3D-печати, более теплоэффективны, чем традиционная конструкция. Это до-

стигается за счет более сложной геометрии внутреннего строения стены и использования различных комбинаций материалов. При этом различные комбинации материалов и геометрия конструкции также влияют на прочность конструкции, поэтому самая теплоэффективная конструкция может быть не самой прочной и совсем непригодной для многоэтажного строительства или использования в районах с высокой сейсмической активностью.

Выбор расчетных коэффициентов теплопроводности при проектировании достаточно сложен, т. к. эти значения не нормируются и зависят от многих факторов. Для более точного определения коэффициентов теплопроводности следует проводить тесты конкретных образцов материалов, которые будут использоваться для строительства.

Разработанная методика теплового расчета позволяет быстро определить теплоэффективность 3D-печатных конструкций. А применение программного пакета позволяет автоматизировать расчет.

Строительная 3D-печать позволяет снизить затраты на строительство за счет меньших трудозатрат (нет необходимости в большой строительной бригаде, за работой 3D-принтера может следить один человек), меньшего количества отходов (ввиду отсутствия съемной опалубки) и использования различных комбинаций материалов. Сравнительный экономический расчет показал, что даже если не учитывать трудозатраты на возведение кирпичной стены, такая конструкция все равно получится дороже. Сравнение разработанных конструкций по стоимости эксплуатации показало, что третий вариант конструкции может быть дешевле по себестоимости, чем второй вариант, но спустя примерно 15 лет их стоимости эксплуатации сравняются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбом технических решений Apis Cor. URL: https://web.archive.org/web/20170713060409/http://apis-cor.com/files/ApisCor_TechnicalSolutions_RU.pdf (дата обращения: 28.02.2019).
2. В России напечатали первый жилой дом. URL: <https://web.archive.org/web/20170715132008/http://apis-cor.com/about/news/first-house> (дата обращения: 28.02.2019).
3. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М.: Стандартинформ, 2013. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095053> (дата обращения: 12.02.2019).
4. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200146332> (дата обращения: 12.02.2019).
5. Плита теплоизоляционная LOGICPIR L-1185×585×40 (6 плит). URL: <https://shop.tn.ru/logicpir-l-1185h585h40-6-plit> (дата обращения: 28.02.2019).
6. Словарь строительных и архитектурных терминов. URL: <http://perekos.net/sections/view/523> (дата обращения: 12.02.2019).

7. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. М.: Минстрой России, 2015. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095546> (дата обращения: 12.02.2019).
8. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. М.: Минрегион России, 2012. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095525> (дата обращения: 12.02.2019).
9. Строительная 3D-печать. Практические рекомендации. URL: <http://spesavia.pro/articls/stroitelnaa-pечат-rekomendacii-1/> (дата обращения: 12.02.2019).
10. Энциклопедический словарь по металлургии. В 2-х томах / под ред. Н. П. Лякишева и др. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. Том 2: П-Я. 416 с.

Pavel Yu. MIKHAYLOV¹
Maxim V. SOZONOV²

UDC 69.001.5

DEVELOPMENT OF A HEAT-EFFICIENT ENCLOSING STRUCTURE OF BUILDINGS MADE USING 3D PRINTING TECHNOLOGY

¹ Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Oil and Gas Flow Measurement Department,
University of Tyumen
pav84369437@yandex.ru

² Master Student, Department of Applied and Technical Physics,
University of Tyumen
m.v.sozonov@yandex.ru

Abstract

Modern construction technologies are developing mainly through the use of new materials and minor changes in the design of buildings. At the same time, construction equipment has changed little over the past 30 years. In construction, 3D printing allows to increase the efficiency using new building materials, reducing labor costs, applying an almost waste-free construction method, and employing various new geometric solutions of structures that are difficult or impossible to use in traditional construction.

This paper presents three different designs of a building's outer wall, some of which have already been used in practice. For calculated construction materials, the authors use popular heaters and concrete mixes that have been or can be used in the construction by this method.

The authors have performed a thermal calculation of the structures according to the developed methodology, taking into account the regulatory requirements for the enclosing structures of a residential building. The method of calculating the building envelope is based on the application of the Fourier law, the calculation is performed using the ANSYS software package. For each design variant, several combinations of building materials were calculated.

The dependence of the heat flux on the outdoor temperature is obtained. The most and least heat-efficient design options are determined. An economic calculation was carried out to deter-

Citation: Mikhaylov P. Yu., Sozonov M. V. 2019. "Development of a heat-efficient enclosing structure of buildings made using 3D printing technology". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 1, pp. 55-68.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-55-68

mine the cost indicators of construction and the cost of operating the developed structures both among themselves and in comparison with the traditional structure. The most cost-effective design of the exterior wall of a residential building has been determined.

Keywords

Construction 3D printing, construction, additive manufacturing, thermal efficiency, modeling, construction 3D printer, thermal calculation.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-55-68

REFERENCES

1. Album of technical solutions Apis Cor. Accessed on 28 February 2019. https://web.archive.org/web/20170713060409/http://apis-cor.com/files/ApisCor_TechnicalSolutions_RU.pdf [In Russian]
2. First residential building printed in Russia. Accessed on 28 February 2019. <https://web.archive.org/web/20170715132008/http://apis-cor.com/about/news/first-house> [In Russian]
3. GOST 30494-2011. 2013. Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures. Moscow: Standartinform. Accessed on 12 February 2019. <http://docs.cntd.ru/document/1200095053> [In Russian]
4. GOST R 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. 2018. Additive manufacturing processes. General principles. Part 1. Terminology. Moscow: Standartinform. Accessed on 12 February 2019. <http://docs.cntd.ru/document/1200146332> [In Russian]
5. Heat insulating plate LOGICPIR L-1185×585×40 (6 plates). Accessed on 28 February 2019. <https://shop.tn.ru/logicpir-l-1185h585h40-6-plit> [In Russian]
6. Dictionary of Construction and Architectural Terms. Accessed on 12 February 2019. <http://perekos.net/sections/view/523> [In Russian]
7. SP 131.13330.2012. 2015. Building climatology. Updated edition of SNiP 23-01-99*. Moscow: Minstroy Rossii. Accessed on 12 February 2019. <http://docs.cntd.ru/document/1200095546> [In Russian]
8. SP 50.13330.2012. 2012. Thermal performance of the buildings. Updated edition of SNiP 23-02-2003. Moscow: Minregion Rossii. Accessed on 12 February 2019. <http://docs.cntd.ru/document/1200095525> [In Russian]
9. Construction 3D printing. Practical recommendations. Accessed on 12 February 2019. <http://specavia.pro/articls/stroitel'naya-pechat-rekomendacii-1/> [In Russian]
10. Lyakishev N. P. et al. (eds.). 2000. Encyclopedic dictionary of metallurgy in 2 vols. Vol. 2. P-Ya. Moscow: Internet Inzhiniring. [In Russian]