

УДК 536.242:691.421-478

Е. В. Корепанов, кандидат технических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

КОНВЕКТИВНЫЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН В ВОЗДУШНЫХ ПОЛОСТЯХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Приводятся поля температуры и компоненты векторного потенциала скорости в воздушных полостях стеновых строительных изделий различных размеров. Установлены режимы течения и структура поля температуры и векторного потенциала в воздушных полостях. Получены критериальные уравнения для вычисления коэффициента конвекции в полостях.

Ключевые слова: конвекция в замкнутой полости, эквивалентная теплопроводность, приведенная теплопроводность кирпича.

Величина термического сопротивления штучных строительных изделий (керамические кирпичи, керамические блоки и др.) определяется количеством, размерами и взаимным расположением воздушных полостей в объеме изделия. Прогнозирование величины термического сопротивления изделия на стадии разработки возможно только методами численного моделирования процессов теплопроводности в остове изделия и конвективного и лучистого теплообмена в полостях. В отличие от двухмерных постановок задачи конвективного теплообмена, которые используются для протяженных замкнутых полостей, например в окнах [1–6], задача конвективного теплообмена в полости строительных изделий должна решаться в трехмерной постановке.

В приближенных методах прогнозирования приведенной теплопроводности штучных строительных изделий воздух в полостях обычно рассматривается как твердое тело с эквивалентной теплопроводностью, учитывающей теплопроводность, конвекцию и излучение в полости. Приведенная теплопроводность изделия в целом определяется сложным теплообменом в воздушной полости и теплопроводностью в материале изделия, составляющем его несущую конструкцию.

Воздушные полости в строительных изделиях могут иметь самые разнообразные размеры – от кубической формы до плоского вертикального и плоского горизонтального слоев, которые нагреваются с боковых поверхностей или торцевых поверхностей. Для оценки возникающих процессов конвекции в полости решалась трехмерная задача термогравитационной конвекции в замкнутой воздушной полости в приближении Буссинеска в переменных вихрь-потенциал вектора скорости [7–9]. Задача решалась методом конечных разностей с использованием итерационной процедуры верхней (уравнения энергии и векторного потенциала) и нижней релаксации (уравнения вихря). Для конвективных членов уравнений энергии и вихря применялись разности против потока.

На рис. 1–4 показаны изотермы и изолинии компонент векторного потенциала в различных сечениях воздушных полостей с разным соотношением сторон: высоты h , ширины l и толщины δ .

Конвекция в воздушной полости начинается при числах Рэлея $Ra > 1000$ (с размерами 6...7 мм). При отсутствии конвекции стационарные профили тем-

пературы между нагреваемой и охлаждаемой поверхностями изменяется по линейному закону, а изотермы в плоскости xOy представляют собой прямые вертикальные линии.

В полости, близкой к кубической форме (рис. 1), в условиях естественной конвекции возникает течение неравномерно нагретого воздуха в виде двух потоков (сжатых эллипсоидов), один из которых движется вдоль нагретой поверхности, а другой – вдоль холодной, совершая циркуляцию в стационарном режиме. Такой характер течения подтверждается симметричностью полей составляющих векторного потенциала.

В условиях развитой конвекции ($Ra \approx 2 \cdot 10^5$) циркуляционное течение смещается к теплообменным поверхностям, что приводит к выравниванию температуры воздуха в центральной части полости (рис. 1). Температура воздуха в верхней части полости становится выше, чем в нижней. Нагреваемый воздух, поднимаясь вверх и протекая вдоль верхней поверхности полости, проникает к холодной фронтальной поверхности и вытесняет холодный воздух в нижнюю область полости. Холодный воздух опускается вниз вдоль холодной фронтальной поверхности и, растекаясь вдоль нижней поверхности, приближается к нагретой фронтальной поверхности. При $Ra > 10^7$ в полости образуются нестационарные вихри и возникает неустойчивое течение. Анализ температурных полей показывает, что влияние торцевых стенок в ядре потока сказывается незначительно. Влияние торцевых стенок (задание на поверхностях линейного распределения температуры) проявляется только в сечениях, находящиеся у стенок.

Увеличение отношения h/δ (широкие плоские вертикальные слои) сопровождается деформацией циркуляционных потоков, которые вытягиваются в высоту, взаимно проникая в соседнюю область течения. При $h/\delta > 5...7$ возникает единый поток в виде эллипсоида, поднимающийся вдоль нагретой поверхности и пускающийся вдоль охлажденной поверхности (рис. 2). При больших значениях h/δ течение переходит в многоячеековое течение – ячейки представляют собой эллипсоиды. Воздух движется в соседних эллипсоидах в разных направлениях. Вдоль одной границы воздух поднимается вверх,

а вдоль другой – опускается вниз. Описанный характер течения приводит к волнообразному изменению температуры в плоскости $z=0$ – воздух с высокой

температурой сверху затекает вниз, а холодный поток поднимается вверх на границах между циркулирующими потоками.

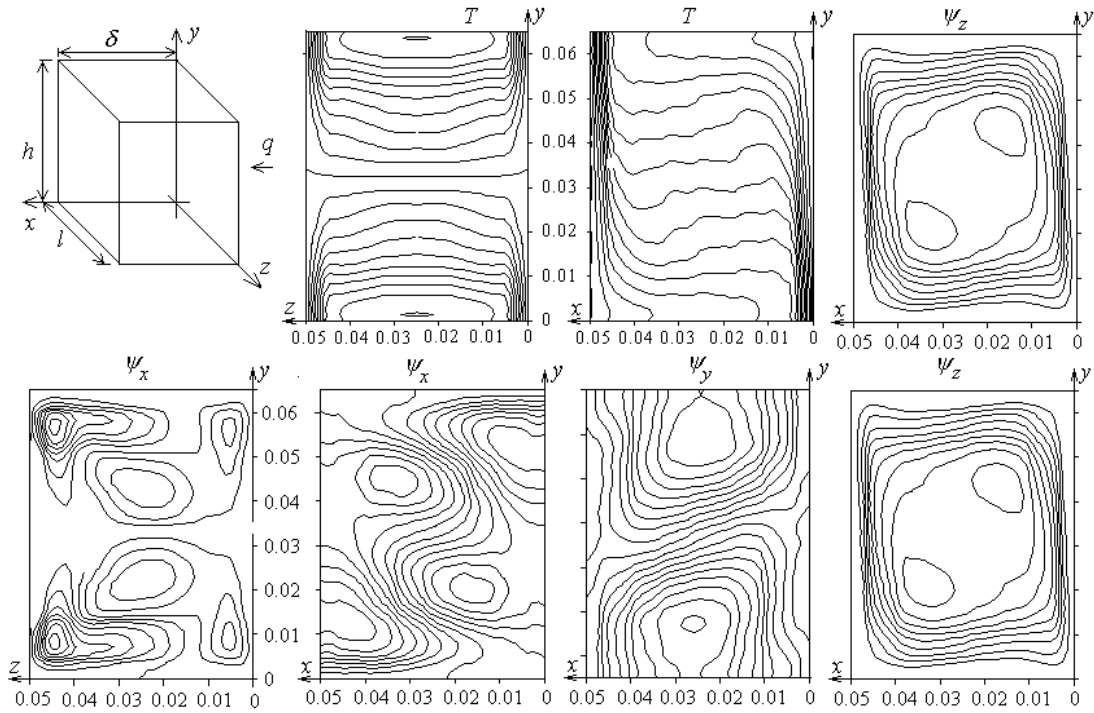


Рис. 1. Изотермы и изолинии компонент векторного потенциала в полости с размерами $h=0,065$ м, $l=0,05$ м, $\delta=0,05$ м ($Ra=219478$)

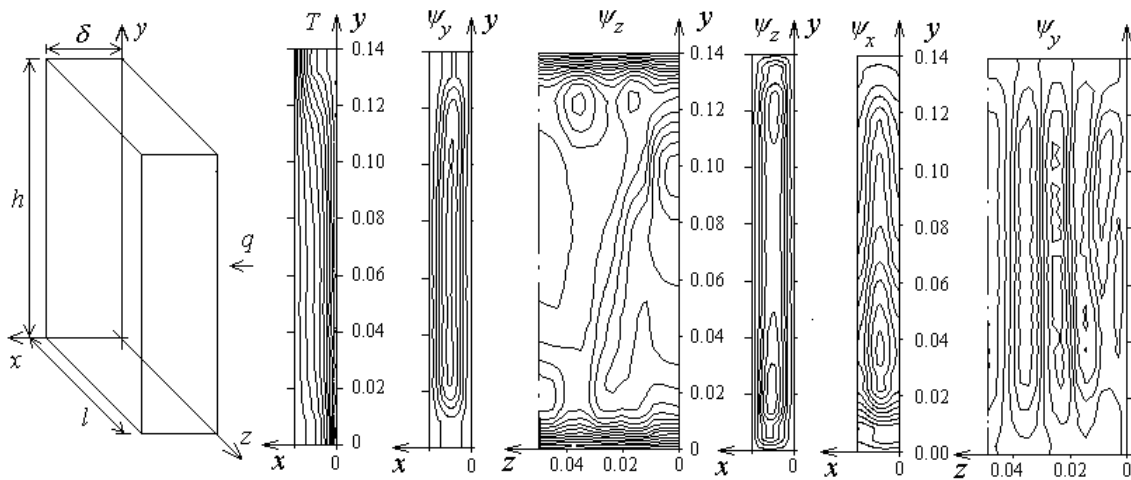


Рис. 2. Изотермы и изолинии компонент векторного потенциала в полости с размерами $h=150$ мм, $l=90$ мм, $\delta=15$ мм ($Ra=2150$)

Уменьшение ширины полости l (узкие вертикальные полости) приводит к эффекту, аналогичному уменьшению числа Ra , т. е. к приглушению конвекции. Характер течения в узкой воздушной полости большой толщины показан на рис. 3.

Течение концентрируется в верхней части полости у нагретой поверхности и в нижней части полости у холодной поверхности. Изотермы в центральной части узкой полости почти горизонтальны. Изменение температуры происходит только у нагретой и холодной поверхностей.

Уменьшение высоты h (плоские горизонтальные прослойки) приводит к образованию продольных горизонтальных валиков (аналогичные ячейкам Рэлея – Бенара). В плоскости xOy изотермы идут с наклоном, а в плоскости zOy – практически горизонтальны (рис. 4). Конвекция в тонких прослойках менее интенсивна, чем в вертикальных прослойках таких же размеров. Следовательно, наиболее интенсивная конвекция характерна для полостей кубической формы, а с увеличением или уменьшением одного из относительных размеров полости интенсивность конвективного течения уменьшается.

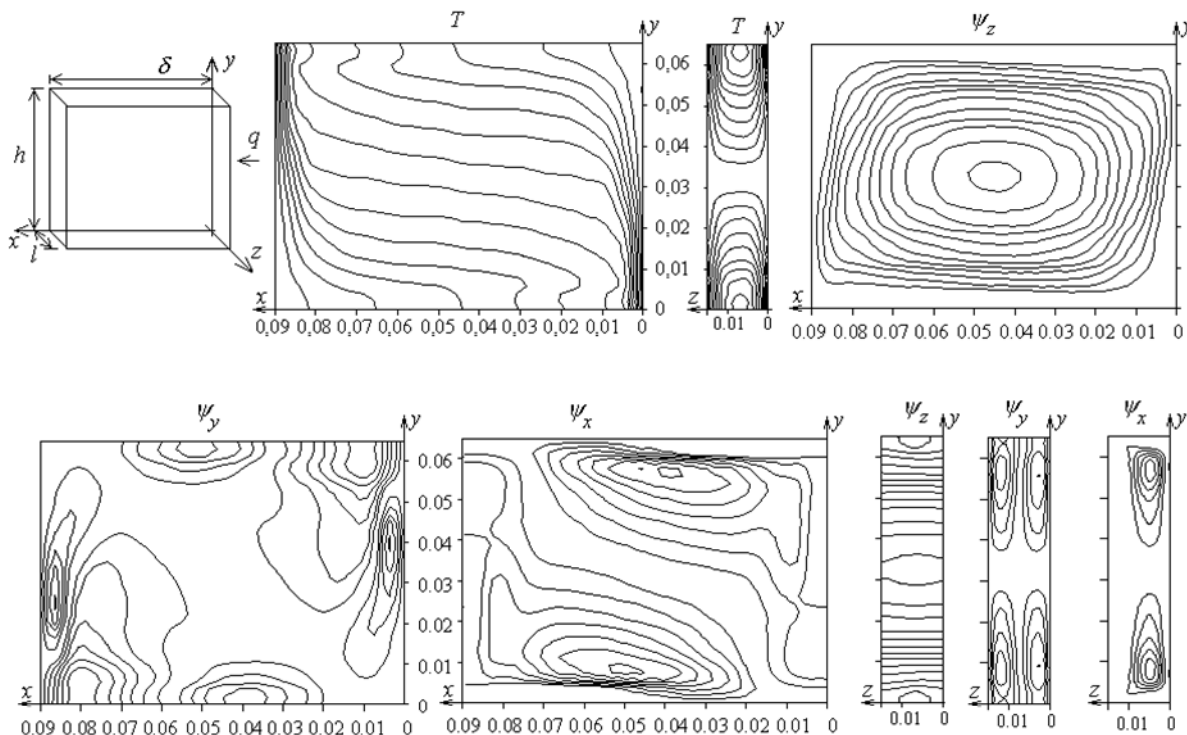


Рис. 3. Изотермы и изолинии компонент векторного потенциала в полости с размерами $h = 65$ мм, $l = 15$ мм, $\delta = 90$ мм ($Ra = 1,28 \cdot 10^6$)

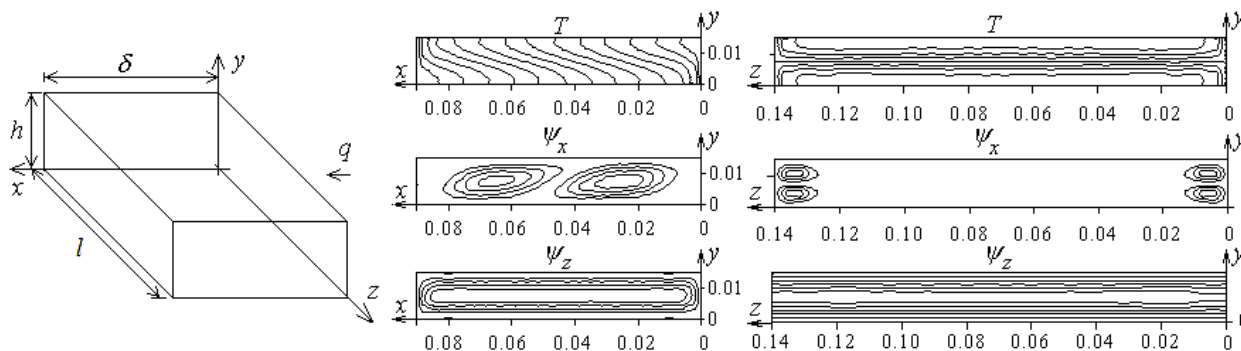


Рис. 4. Изотермы и изолинии составляющих векторного потенциала в полости с размерами $h = 15$ мм, $l = 140$ мм, $\delta = 90$ мм ($Ra = 1,28 \cdot 10^6$)

Задача расчета процесса переноса теплоты через стену из штучных строительных изделий с воздушными полостями сводится к решению уравнения теплопроводности твердого тела с эквивалентной теплопроводностью. Эквивалентная теплопроводность воздуха в полости равна сумме кондуктивной λ_t , конвективной λ_k и лучистой λ_l составляющих. Кондуктивная составляющая определяется по числу Нуссельта для замкнутой воздушной полости $\lambda_t = \lambda_t \cdot Nu$ [10–11]. В результате эквивалентная теплопроводность вычислялась как:

$$\lambda_3 = \lambda_t (1 + Nu) + \lambda_l.$$

Число Нуссельта замкнутой полости, учитывающее перенос теплоты теплопроводностью и конвекцией, зависит от числа Ra , относительной высоты h/δ и относительной ширины l/δ . При этом при увеличении h/δ от 0 до 1 число Нуссель-

та увеличивается, а при увеличении h/δ от 1 до 15 – уменьшается. Обработка данных численного эксперимента позволила получить критериальные уравнения для определения числа Нуссельта.

Для вертикальной полости с $h/\delta = 1,0 \dots 15$, $l/\delta = 0,1 \dots 1,0$ при числах Рэлея $Ra = 1500 \dots 11,6 \cdot 10^6$ (рис. 1):

$$Nu = 0,198 Ra^{0,265} (h/\delta)^{-0,159} (l/\delta)^{0,425}.$$

Для вертикальной полости с $h/\delta = 1,0 \dots 15$, $l/\delta = 1,07 \dots 15,0$ при числах Рэлея $Ra = 1500 \dots 11,6 \cdot 10^6$ (рис. 2):

$$Nu = 0,266 Ra^{0,23} (h/\delta)^{-0,118} (l/\delta)^{0,441}.$$

Для широкой горизонтальной полости с $h/\delta = 1 \dots 0,067$, $l/\delta = 1,0 \dots 15$ при числах Рэлея $Ra = 1000 \dots 6 \cdot 10^6$ (рис. 4):

$$Nu = 0,00755 Ra^{0,294} \times \left[\begin{array}{l} 14,3(h/\delta) - 23,6(h/\delta)^2 + 11,7(h/\delta)^3 - \\ - 0,313(l/\delta) - 0,0049(l/\delta)^2 + \\ + 0,00126(l/\delta)^3 + 0,902(h/\delta)(l/\delta) - \\ - 0,0282(h/\delta)(l/\delta)^2 - 0,336(h/\delta)^2(l/\delta) \end{array} \right]$$

Для узкой горизонтальной полости с $h/\delta = 1 \dots 0,067$, $l/\delta = 0,067 \dots 1,0$ при числах Рэлея $Ra = 1000 \dots 6 \cdot 10^6$:

$$Nu = 0,00518 Ra^{0,275} \times \left[\begin{array}{l} 16,14(h/\delta) - 19,5(h/\delta)^2 + 10,2(h/\delta)^3 + \\ + 2,09(l/\delta) - 3,09(l/\delta)^2 + 1,365(l/\delta)^3 + \\ + 3,98(h/\delta)(l/\delta) - 0,50(h/\delta)(l/\delta)^2 - \\ - 2,94(h/\delta)^2(l/\delta) \end{array} \right]$$

Расчеты показали, что в воздушных полостях строительных изделий толщиной более 10 мм доля лучистого теплового потока изменяется в пределах

45...65 % от общего потока и при определении их теплотехнических характеристик необходимо наряду с теплопроводностью и конвекцией обязательно учитывать теплообмен излучением.

В таблице приведены значения пористости p , плотности ρ и составляющих эквивалентной теплопроводности керамического кирпича с продольными тонкими длинными полостями (ложковый кирпич), с кубическими полостями (максимальная пористость) и с плоскими широкими полостями (тычковый кирпич). Приведенное сопротивление теплопроводности кирпича вычислено для одинаковой толщины (125 мм).

Лучистая составляющая эквивалентной теплопроводности определяется в основном переносом теплоты между фронтальными плоскостями полости (от нагретой поверхности к холодной). Перенос теплоты к боковым поверхностям, а также к верхней и нижней поверхности составляет несколько процентов. Поскольку для тонких полостей разность температуры фронтальных поверхностей уменьшается, то доля лучистого теплообмена снижается.

Теплотехнические характеристики фрагмента кирпича

Размеры воздушной полости					
$\delta=96$ мм, $l=15$ мм		$\delta=96$ мм, $l=96$ мм		$\delta=15$ мм, $l=96$ мм	
	$p=0,320$		$p=0,678$		$p=0,320$
	$\rho=1200$		$\rho=580$		$\rho=1200$
	$\lambda_{пр}=0,473$		$\lambda_{пр}=0,482$		$\lambda_{пр}=0,263$
	$\lambda_{л}=0,2312$		$\lambda_{л}=0,271$		$\lambda_{л}=0,059$
	$\lambda_{тк}=0,069$		$\lambda_{тк}=0,178$		$\lambda_{тк}=0,052$
	$\lambda_{з}=0,30$		$\lambda_{з}=0,449$		$\lambda_{з}=0,111$
	$R_{пр}=0,254$		$R_{пр}=0,249$		$R_{пр}=0,456$

Кондуктивно-конвективная составляющая эквивалентной теплопроводности растет с увеличением ширины полости, но с уменьшением толщины снижается. Поэтому для рассматриваемых полостей кондуктивно-конвективная составляющие отличаются незначительно. Эквивалентная теплопроводность воздушной полости кирпича с продольными полостями примерно в три раза больше, чем для кирпича с поперечными полостями.

Приведенная теплопроводность кирпича, вычисленная с учетом теплопроводности керамических перегородок для ложкового кирпича, в 1,8 раза больше приведенной теплопроводности тычкового кирпича.

Таким образом, комбинацией взаимного расположения воздушных полостей в кирпичах можно минимизировать величину его приведенного термического сопротивления.

Библиографические ссылки

1. Корепанов Е. В. Свободная конвекция в воздушных прослойках окон с двойным остеклением // Известия вузов. Строительство. – 2005. – № 2. – С. 106–112.
2. Корепанов Е. В. Выбор критерия сходимости решения задачи конвективного теплообмена в воздушной прослойке окна методом конечных разностей // Вестник ИжГТУ. – 2005. – №2. – С. 3–5

3. Корепанов Е. В. Температурные поля и тепловые потоки в окнах с тройным остеклением // Вестник ИжГТУ. – 2005. – № 3. – С. 18–3.
4. Корепанов Е. В. Численное моделирование процесса теплопередачи через стеклопакеты с газовым наполнением // Вестник ИжГТУ. – 2004. – № 3. – С. 29–32.
5. Корепанов Е. В. Численное моделирование теплопередачи через окна с тройным остеклением // Известия вузов. Строительство. – 2009. – № 7. – С. 44–52.
6. Корепанов Е. В. Математическое моделирование теплопередачи через наружные стены зданий с окнами : монография. – Ижевск : Изд-во Ижев. гос. техн. ун-та, 2011. – 192 с.
7. Юркевич А. А., Диденко В. Н., Корепанов Е. В. Метод расчета сложного теплообмена в воздушных полостях и порах // Вестник ИжГТУ. – 2000. – № 4. – С. 9–12.
8. Корепанов Е. В., Диденко В. Н. Конвективный теплообмен в воздушных полостях штучных стеновых материалов // Известия вузов. Строительство. – 2003. – № 11. – С. 116–118.
9. Корепанов Е. В. Метод прогнозирования приведенной теплопроводности неоднородных мелкоштучных строительных изделий // Вестник ИжГТУ. – 2006. – № 3. – С. 18–22.
10. Корепанов Е. В. Вычисление приведенной теплопроводности кирпичей с воздушными полостями // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – С. 161–166.

11. *Корепанов Е. В.* Приведенная теплопроводность кирпичей с воздушными полостями // Перспективы развития науки и образования : сб. науч. тр. по матер. Между-

нар. науч.-практ. конф. 01 июля 2014 г. Ч. IV. – М. : АР-Консалт, 2014. – С. 129–130.

* * *

E. V. Korepanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Convection flows and heat exchange in air spaces of construction units

The article presents temperature fields and components of vector potential of velocity in air spaces of wall construction units with different dimensions. Flow modes, structures of temperature field and vector potential in air spaces are determined. Criteria equations for calculating the convection factor in spaces are obtained.

Keywords: convection in closed spaces, equivalent heat conductivity, reduced heat conductivity of brick.

Получено: 02.10.14

УДК 621.314

А. В. Морозов, аспирант

В. К. Барсуков, кандидат технических наук, профессор

В. А. Морозов, кандидат технических наук, доцент

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ В SIMULINK

Представлены результаты моделирования МПЧ для асинхронного двигателя в среде Simulink MATLAB. Для построения блок-схемы были использованы известные алгоритмы управления.

Ключевые слова: преобразователь частоты, ТОП, Simulink, коэффициент мощности.

Для виртуального моделирования матричного преобразователя частоты (МПЧ) использована среда Simulink, позволяющая адекватно воспроизводить технические системы различной сложности благодаря разнообразию встроенных библиотек блоков. Целью моделирования было исследование свойств МПЧ как потребителя электрической энергии и источника питания асинхронного двигателя.

Создание силовой части преобразователя производилось с использованием библиотеки SimPowerSystem. На рис. 1 представлена Simulink-модель МПЧ, работающего в режиме, при котором питание фаз нагрузки осуществляется от максимального мгновенного линейного напряжения. Данный режим обеспечивается формированием синхроимпульсов, разрешающих открывание соответствующих ключей. Число синхроимпульсов соответствует шести интервалам коммутации за один период сетевого напряжения. Этот способ управления, называемый скалярным [1–3], выбран для моделирования как наиболее простой. При таком управлении появляется возможность регулировать начальную фазу потребляемого тока и, следовательно, коэффициент мощности МПЧ. Simulink-модель содержит генератор сетевого напряжения 1 с преобразователями Controlledvoltagesource 2, датчики входных и выходных токов 3 и 12, измеритель мощности Powermeter с дисплеями 4, блок simout 5, RL потребитель 6, блок коррекции 7, управляющий контроллер с блоком регулирования фазы синхроимпульсов 8, LC-фильтр 9, матрицу ключей 10, асин-

хронный двигатель с измерительным выходом 11, блок Powergui 13 (рис. 1)

Двунаправленные ключи Ideal_Switch взяты из раздела PowerElectronics. В качестве нагрузки подключен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором из раздела Machines, с возможностью изменения электромагнитного момента, скорости ротора, а также токов статора и ротора. На входе МПЧ подключен Г-образный LC-фильтр. Система управления содержит функциональные блоки из различных разделов корневой библиотеки Simulink. Генератор управляющих ШИМ-импульсов заимствован из файла power_pwm.mdl, находящегося в описании блока AsynchronousMachine. Система управления содержит формирователь импульсов синхронизации, который управляется сетевыми напряжениями. Изменение фазы синхроимпульсов возможно за счет регулирования начальной фазы входных напряжений блока. Далее синхроимпульсы совместно с ШИМ-сигналами обрабатываются согласно выбранному закону управления [4].

Моделирование совместной работы МПЧ и активно-индуктивного потребителя Three_Phase_Series_RL_Load (рис. 1) осуществлялось в целях исследования возможностей использования МПЧ для компенсации реактивной мощности. За счет изменения начальной фазы импульсов синхронизации α возможно получение tgφ на входе МПЧ в пределах от –0,5 до 0,6 (рис. 2).